



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Tesis:**

**Cuantificación de mercurio y arsénico en una matriz de maíz, chile, frijol y jitomate para la determinación de su posible riesgo a la salud por ingesta humana.**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

Blanco García Cristian Elías



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx.**

**2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: **José Agustín García Reynoso**

**VOCAL:** Profesor: **Alejandra Mendoza Campos**

**SECRETARIO:** Profesor: **Alberto Castellanos Campillo**

**1er. SUPLENTE:** Profesor: **Roció García Martínez**

**2° SUPLENTE:** Profesor: **Ricardo Torres Jardón**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA, LABORATORIO DE AEROSOL**

**ASESOR DEL TEMA: M. en C. Alejandra Mendoza Campos**

**SUPERVISOR TÉCNICO: I.Q. MOISÉS LÓPEZ CARRASCO**

**SUSTENTANTE: CRISTIAN ELÍAS BLANCO GARCÍA**

## Índice de contenido

1. Introducción.....	6
1.1. Planteamiento del problema.....	7
1.2. Objetivo general.....	8
1.3. Objetivo particular.....	8
1.4. Hipótesis.....	8
2. Marco teórico.....	8
2.1. Contaminación de suelos por mercurio.....	8
2.2. Ciclo Biogeoquímico del mercurio.....	11
2.3. Compuestos del arsénico.....	14
2.4. Presencia de arsénico en suelos y absorción en plantas.....	15
2.5. Efecto del pH en la movilización de arsénico en suelos.....	16
2.6. Toxicidad del arsénico.....	16
2.7. Etapas del proceso de atomización.....	17
2.8. Diferencias en el método de absorción atómica con vapor frío.....	19
2.9. Interferencias en el análisis de mercurio por absorción atómica con vapor frío.....	19
2.10. Preparación de las muestras de mercurio para el análisis de absorción atómica.....	20
2.11. Eliminación del color para el análisis de muestras con el sistema de vapor frío.....	20
2.12. Normatividad nacional e internacional: límites máximos permisibles de mercurio y arsénico.....	21
3. Procedimiento experimental.....	24
3.1. Metodología experimental: manejo de las muestras.....	24
3.2. Metodología experimental: determinación de mercurio en las muestras de jitomate, chile, frijol y maíz.....	26
3.3. Metodología experimental: determinación de arsénico en las muestras de jitomate, chile, frijol y maíz.....	32
3.4. Método de análisis de riesgo a cáncer.....	35
4. Resultados .....	38
4.1. Determinación de mercurio y arsénico en maíz, frijol, chile y jitomate.....	38
4.2. Gráficos de los resultados de RAC y concentración para mercurio y arsénico.....	41
5. Discusión de resultados.....	51
6. Recomendaciones.....	53
7. Conclusiones.....	54
8. Apéndice.....	57
8.1. Diluciones realizadas a los resultados de mercurio y arsénico.....	57
8.2. Razones de ingesta para mercurio y arsénico.....	59
9. Bibliografía.....	62

## Índice de tablas

Tabla 1: Límites máximos permitidos de ingesta de arsénico y mercurio.....	22
Tabla 2: Límites máximos permitidos de mercurio y arsénico en aire y concentración máxima de mercurio y arsénico en aire por un periodo de exposición de 8 horas.....	22
Tabla 3: Límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua.....	23
Tabla 4: Criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados .....	23
Tabla 5: Peso de las muestras de maíz.....	25
Tabla 6: Peso de las muestras de chile.....	25
Tabla 7: Peso de las muestras de frijol.....	25
Tabla 8: Peso de las muestras de jitomate .....	25
Tabla 9: Valores de concentración y absorbancia para la curva de calibración de mercurio.....	29
Tabla 10: Valores de concentración y absorbancia para la curva de calibración de arsénico.....	33
Tabla 11: Valores empleados para el cálculo de la ingesta.....	36
Tabla 12: Valores de RfD empleados para el cálculo de riesgo a cáncer (RAC).....	37
Tabla 13: Resultados del análisis cuantitativo de mercurio y arsénico en una matriz de maíz, chile, frijol y jitomate.....	38
Tabla 14: Resultados de concentración finales para mercurio y arsénico en una matriz de maíz, chile, frijol y jitomate.....	38
Tabla 15: Resultados del riesgo a cáncer en una matriz de maíz, chile, frijol y jitomate para distintos compuestos de mercurio y arsénico.....	39
Tabla 16-19: Diluciones de los resultados obtenidos de mercurio de las muestras de maíz, chile, frijol y jitomate.....	57
Tabla 20-23: Diluciones de los resultados obtenidos de las muestras de maíz, chile, frijol y jitomate para la determinación de arsénico.....	58
Tabla 24-27: Razones de ingesta para la matriz de maíz, chile, frijol y jitomate.....	59
Tabla 28: Valores de CR para maíz, chile, frijol y jitomate.....	60

## Índice de figuras

Imagen 1: Ciclo Biogeoquímico del mercurio.....	13
Imagen 2: Transporte y metabolismo de arsénico en plantas.....	16
Imagen 3, 4 y 5: Separación de muestras.....	24
Imagen 6: Preparación de los liners con ácido nítrico, peróxido de hidrogeno y las muestras previamente pesadas.....	26
Imagen 7 y 8: Liners montados en los marcos HP-500 y equipados dentro del horno para la digestión ácida.....	27
Imagen 9: Frascos de polietileno con el digerido.....	27
Imagen 10: Preparación de las disoluciones de HCl, borohidruro de sodio y disolución stock.....	28
Imagen 11: Disolución stock.....	29
Imagen 12: Remoción del color morado característico de $\text{KMnO}_4$ .....	30
Imagen 13: Muestras finales.....	31
Imagen 14 y 15: Equipo de espectrometría de absorción atómica con vapor frío.....	32
Imagen 16, 17 y 18: Espectro de absorción atómica con horno de grafito para la determinación de arsénico.....	34

## Índice de gráficos

Gráfico 1: Curva de calibración del mercurio .....	30
Gráfico 2: Curva de calibración del arsénico .....	33
Gráfico 3: RAC del fruto de la matriz de maíz por análisis de mercurio.....	41
Gráfico 4: RAC de suelo y fruto para las distintas matrices por análisis de mercurio..	42
Gráfico 5: RAC del fruto de la matriz de maíz por análisis de arsénico.....	42
Gráfico 6: RAC de suelo y fruto para las distintas matrices por análisis de arsénico..	43
Gráfico 7-10: Concentración (ug/g) de una matriz de maíz, chile, frijol y jitomate por análisis de mercurio.....	43
Gráfico 11-14: Concentración (ug/g) de una matriz de maíz, chile, frijol y jitomate por análisis de arsénico.....	45
Gráfico 15-17: Porcentaje de distribución de los contaminantes de mercurio en la matriz de maíz, chile, frijol y jitomate.....	47
Gráfico 18-21: Porcentaje de distribución de los contaminantes de arsénico en la matriz de maíz, chile, frijol y jitomate.....	49

## 1. Introducción

En este trabajo se cuantificará el mercurio y arsénico presente en matrices de maíz, chile, jitomate y frijol, con el fin de encontrar si el consumo de alimentos que presenten concentraciones de mercurio y arsénico en cantidades elevadas puede generar un posible riesgo a cáncer. La elección de las matrices que se emplearán en este estudio es debido a que tanto el maíz, chile, frijol y jitomate son alimentos que están presentes en la dieta diaria del mexicano por lo que son consumidos frecuentemente, lo que podría generar un mayor riesgo potencial, es por esta razón que fueron seleccionados estas matrices.

Dentro de los conceptos estudiados se encuentran las propiedades fisicoquímicas del mercurio y arsénico, esto con el fin de dar una visión general de ambos compuestos, posteriormente se mencionará la contaminación del suelo por mercurio y la transferencia que existe entre el suelo y la planta, también mencionando la presencia que tiene el arsénico en suelos, así como su absorción en las plantas.

Parte importante de este trabajo es la comprensión del método utilizado para obtener las concentraciones de los metales estudiados en las matrices propuestas es por esta razón que también se menciona en los antecedentes (marco teórico) distintos temas que tienen relación con la espectroscopia de absorción atómica. Algunos de ellos son las etapas del proceso de atomización, las interferencias que pueden existir al analizar mercurio por el método de absorción atómica con vapor frío, además de mencionar algunas de las reacciones propias del método.

Es de igual importancia mencionar la normatividad internacional que hace referencia a las regulaciones que tienen que ver con ingesta de mercurio y arsénico, ya que no existe normas nacionales con respecto a la ingesta de estos metales, por lo que este trabajo podría servir de ayuda para poder impulsar normatividad referente a la ingesta de metales pesados por consumo de alimentos dentro del territorio nacional. También se presentan normas que mencionan la exposición de mercurio y arsénico exposición

máxima de estos compuestos en aire o la concentración máxima permitida de contaminantes en el suelo.

Posteriormente se presenta la metodología empleada para llevar a cabo el experimento de este trabajo seguido de los resultados obtenidos con su correspondiente discusión y conclusiones.

### 1.1. Planteamiento del problema:

Durante la historia de este país una de las fuentes principales que constituyen su economía ha sido el sector agropecuario, tan importante es que tan solo en el 2017 México ocupó el primer lugar en producción de alimentos, siendo uno de los alimentos con mayor consumo dentro del territorio nacional el maíz en todas sus formas y variantes, es por ello que el presente trabajo se enfoca en conocer si el maíz, frijol, chile y jitomate que se consumen son sanos y realmente aporta un contenido nutritivo a las personas o si estos alimentos representan un peligro grave a la salud del consumidor. Para ello es importante basarse en la normatividad mexicana que establece los límites máximos en la concentración de ciertos contaminantes en este caso mercurio y arsénico.

La normatividad nacional e internacional es muy importante ya que es con base en esta es que podremos decidir si los resultados presentan un peligro en cuanto al nivel de mercurio y arsénico que se pueda encontrar en las muestras seleccionadas en este trabajo, además otra forma para comprobar la factibilidad en el consumo de este alimento son los cálculos propuestos en este proyecto.



### 1.2. Objetivo general:

Cuantificar la concentración de mercurio y arsénico en una matriz (suelo-raíz-tallo-hoja-fruto) de maíz, frijol, chile y jitomate en México para evaluar su posible riesgo a la salud por ingesta humana.

### 1.3. Objetivo particular:

Analizar las muestras obtenidas mediante espectroscopia de absorción atómica con un sistema de vapor en frío para la cuantificación de mercurio y con un sistema de horno de grafito para la cuantificación de arsénico.

### 1.4. Hipótesis:

Las matrices de maíz, chile, jitomate y frijol pueden contener metales pesados como mercurio o arsénico lo que puede generar un potencial riesgo a cáncer.

Las mujeres presentan una probabilidad de riesgo a cáncer más elevada que los hombres por ingesta de alimentos contaminados, debido a que el valor calculado de RAC será mayor en mujeres que en hombres.

## **2. Marco Teórico**

### 2.1. Contaminación de suelos por mercurio

La contaminación y la degradación de los recursos naturales del suelo es un problema actualmente. Entre los impactos más graves que éste sufre se destaca la contaminación por metales pesados, uno que crea problemas por su elevada toxicidad es el mercurio, el cual es considerado un contaminante a escala global. La entrada de mercurio en el suelo puede ser debida a numerosas causas, entre ellas la extracción minera y el riego con aguas residuales o no bien tratadas.

Las principales fuentes de liberación del mercurio al medio ambiente se pueden clasificar en dos grupos:

**Fuentes naturales:** La liberación del mercurio al medio es consecuencia de la movilización natural de éste desde la corteza terrestre, resultado de la actividad volcánica y la erosión de las rocas. Por lo tanto, las emisiones naturales de mercurio se encuentran fuera del control humano y deben considerarse como parte del entorno a escala local o global. Aun así, estas emisiones contribuyen a aumentar la concentración de mercurio ambiental.

**Fuentes antropogénicas:** Gran parte del mercurio que actualmente se encuentra en la atmósfera es consecuencia del desarrollo de actividades antropogénicas (minería, combustión de combustibles fósiles, industria química y metalúrgica, etc.). Se cree que estas actividades han multiplicado los niveles generales de mercurio en la atmósfera de 2 a 10 veces en el último siglo (Fernández et al., 2010).

La acumulación y toxicidad del mercurio es mucho más baja en los ecosistemas terrestres que en los acuáticos. Esto es debido a que en el suelo hay diversos agentes que pueden contribuir a su inmovilización.

En los ecosistemas terrestres, el mercurio puede ser fijado por los componentes del suelo, pero también puede ser inmovilizado por los microorganismos propios de este o puede ser absorbido por las raíces de las plantas y transferidos al interior de las mismas. La transferencia del mercurio a la planta a través de las raíces es muy lenta y no depende de la concentración del mercurio total presente, si no de cantidad de mercurio fácilmente disponible. (I. López Tejedor; M. J. Sierra; J. Rodríguez; R. Millán. (2010). Estudio del Comportamiento y Distribución del Mercurio Presente en Muestras de Suelo Recogidas en la Ribera del Río Valdeazogues. 2018)

Los distintos nutrientes se absorben principalmente por la raíz, junto con el agua, en forma de cationes o aniones (Esteban, E., 2008). La producción de biomasa de una especie vegetal es uno de los factores más importantes en la transferencia suelo-planta

del elemento tóxico, otro factor importante en la transferencia de elementos tóxicos desde el suelo hasta la planta es la resistencia inherente de la planta a distintos compuestos, es decir, la capacidad de extracción que presenta la planta con sus distintos nutrientes.

Las plantas absorben los nutrientes minerales necesarios para sus procesos vitales a través del suelo por medio de sus raíces. El suelo es una mezcla heterogénea de fases líquidas, gaseosas y sólidas, las cuales interactúan con los elementos minerales. En la fase sólida del suelo podemos encontrar diversas partículas orgánicas que contienen P, N y S. En la fase líquida se encuentran minerales disueltos y esta sirve como medio de transporte de los iones hacia la raíz de las plantas.

Las partículas orgánicas son formadas por la descomposición de los microorganismos a la materia, lo cual genera aniones por la pérdida de un  $H^+$  en un ácido carboxílico ( $COO^-$ ), además de otros iones formados por la disociación de un hidrógeno en partículas orgánicas como los fenoles.

Entre las partículas inorgánicas presentes se encuentran las arcillas que son cristales de  $Al^{3+}$  y  $Si^{4+}$  unidos covalentemente con átomos de oxígeno para formar aluminatos y silicatos.

La absorción de los compuestos mencionados anteriormente raramente se efectúa en forma de sales, siendo absorbidos los nutrientes que necesita la planta en forma de iones, para que la planta pueda absorber estos compuestos solubles o iónicos deben estar formando micelas con los componentes del suelo.

El mercurio se encuentra en forma de ion  $Hg^{2+}$  lo que le permite ser soluble con el agua que absorben las raíces de la planta y por lo tanto formar micelas con los distintos componentes ya mencionados.

El mercurio en su estado iónico atravesará los tejidos de la raíz de la planta hasta llegar al xilema, el cual es un tejido especializado de la planta que transporta agua, iones y

los distintos nutrientes que la planta necesita de un lugar a otro de esta, a esta mezcla de agua y distintos nutrientes se le llama savia bruta la cual será llevada por el tallo, hojas y fruto de la planta.

Para este proyecto se analizará una matriz de maíz, chile, frijol y jitomate. El suelo donde se cultivan estas especies debe tener un pH entre 5.5 y 7.8 para un crecimiento óptimo y sano de las plantas.

Si la concentración de iones de hidrogeno se encuentra fuera de estos límites puede aumentar o disminuir la disponibilidad de ciertos compuestos además se produce toxicidad si el pH no está en los límites adecuados.

Si el pH es inferior a 5.5 se presentan problemas de toxicidad por aluminio y manganeso entre otros metales pesados, además de una carencia en fósforo y magnesio, con un pH superior a 8 se presentará una carencia en hierro, manganeso y zinc. (Deras Flores, H. (s.f.). Guía técnica: el cultivo de maíz. Recuperado de <http://repiica.iica.int/docs/b3469e/b3469e.pdf>)

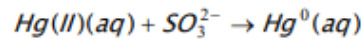
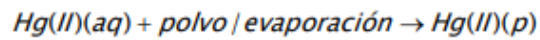
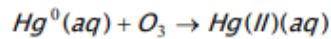
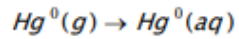
## 2.2. Ciclo Biogeoquímico del mercurio

El mercurio sigue un ciclo biogeoquímico por el cual se puede distribuir no solo al suelo terrestre sino al medio ambiente en general, dicho ciclo se lleva a cabo continuamente entre suelo, agua y la atmosfera.

La cantidad de mercurio presente en el ciclo dependerá de distintos factores entre los cuales se encuentran:

- Circulación atmosférica de los vapores de mercurio.
- La producción del mercurio local y regional generada por las diversas actividades humanas.
- Factores naturales.

El mercurio empieza su ciclo en la atmosfera, las emisiones de mercurio pueden tener su origen en procesos naturales o antropogénicos. Investigaciones más recientes estiman que entre el 40 y 75% del mercurio presente en la atmosfera se debe a fuentes



antropogénicas (Gaona, 2004). Dichas emisiones generan vapores de  $Hg^0$  y otras formas oxidadas del mismo.

El esquema de reacción mostrado en la página anterior nos indica cual es la vía que sigue el mercurio elemental para oxidarse y así formar  $Hg^{2+}$  ya que el mercurio elemental no puede ser depositado por vía húmeda, por lo tanto, es necesario llevarlo a su forma oxidada.

Una vez que está presente en la atmosfera este metal será depositado en forma de  $Hg^{2+}$  a la superficie de los vegetales, o bien será respirado por los animales en esta forma. Si se tiene  $Hg^{2+}$  este será más soluble en agua por lo que puede ser depositado por el agua de las lluvias en seres vivos y el suelo, lo que ocasiona una absorción de mercurio en los tejidos de plantas y animales, así como la filtración del agua en el suelo. (Imagen 1: Ciclo Biogeoquímico del mercurio. Pablo Rivera Machado y Juan Sebastián Valencia Herrera. (2013). Validación de la metodología para el análisis de mercurio en agua tratada y cruda, y estandarización del análisis de mercurio en pescados.2018)

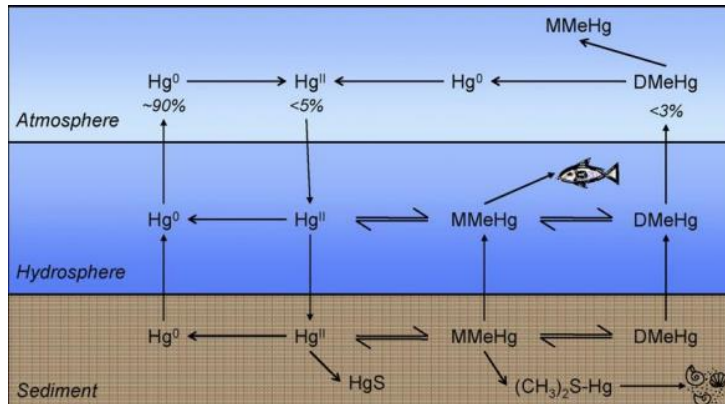


Imagen 1: Ciclo Biogeoquímico del mercurio. Se observan los distintos estados de oxidación por los que pasa el mercurio en la atmosfera la hidrosfera y finalmente en su deposición en el suelo

Otra forma en que el mercurio puede ser depositado en el suelo es mediante distintos procesos metabólicos de las bacterias en los cuales pueden reducir  $Hg^{2+}$  a  $Hg^0$  o bien pueden metilar el mercurio formando así metilmercurio (MMeHg)

Por otra parte, el mercurio también puede llegar a los ambientes marinos, ya sea porque las aguas subterráneas o el agua de las lluvias arrastraron los distintos compuestos de mercurio presentes en el suelo o también se puede depositar tanto  $Hg^{2+}$  y metilmercurio (MMeHg) directamente desde la atmosfera. Además, si en las aguas terrestres se tiene  $Hg^0$  mediante un proceso con pH menor a 7, suficiente materia orgánica y bajas concentraciones de oxígeno este puede ser oxidado hasta MMeHg. También se puede tener el proceso inverso en donde el MMeHg se demetila formando mercurio elemental el cual se incorporará a las capas de agua superiores para que finalmente se volatilice a la atmosfera. Finalmente, si tiene una gran concentración de materia orgánica y bajas concentraciones de oxígeno, el MMeHg puede metilarse una vez más formando dimetilmercurio el cual se volatilizará a la atmosfera.

El mercurio que está presente en el suelo se debe como ya se mencionó anteriormente a factores antropogénicos o a deposiciones atmosféricas, pero principalmente se debe a factores naturales como la erosión de rocas. Se ha reportado que los niveles de mercurio en zonas donde no se presentan alteraciones de tipo geológico o ninguna otra anomalía pueden alcanzar valores de 100  $\mu g/kg$  (Adriano, 2001)

### 2.3. Compuestos del arsénico.

Además de las formas inorgánicas del arsénico (arseniato y arsenito), también existen compuestos orgánicos de este metal, los cuales pueden ser formas metiladas entre las cuales se encuentran:

- Ácido monometilarsónico (MMA (V) )
- Ácido metilarsenioso (MMA (III) )
- Ácido dimetilarsínico (DMA (V) )
- Ácido dimetilarsenioso (DMA (III) )
- Óxido de trimetilarsina (TMAO)
- Ion tetrametilarsonio (TETRA)

O se pueden encontrar compuestos orgánicos más complejos que incluyen arsénico como:

- Arsenobetaína ( AsB)
- Arsenocolina (AsC)
- Arsenoazúcares
- Arsenolípidos
- Compuestos de base proteica como metalotioneínas o fitoquelatinas.

Los procesos de transformación que puede sufrir el arsénico en el medio ambiente ocurren a través de reacciones de óxido-reducción y reacciones de síntesis de compuestos orgánicos (que van desde metilación hasta la formación de moléculas más complejas como las ya mencionadas). Las formas orgánicas del arsénico pueden ser degradadas para que el arsénico regrese a su forma inorgánica 5+ y 3+.

Los compuestos de arsénico que se encuentran en el suelo, estarán en función de varios factores como el tipo de compuestos que están presentes en el suelo, además de la concentración de los componentes adsorbidos al suelo. Dando como resultado que para suelos ácidos los arseniats de aluminio y los arseniats de hierro son los que

están en mayor concentración, mientras que en suelos más alcalinos la especie de arsénico más predominante son los arseniatos de calcio.

#### 2.4. Presencia de arsénico en suelos y absorción en plantas

El arsénico que está presente en suelos se encuentra formando parte de minerales, pero no como componente principal. Alrededor del 60% del arsénico en suelos se encuentra en forma de arseniato, el 20% se encuentra como azufre y el otro 20% se encuentra como arsenito, óxidos, silicatos y arsénico elemental. (Mandal y Suzuki 2002). Como se mencionó anteriormente el arsénico (V) tiende a comportarse como fósforo, esto en el suelo cobra especial importancia ya que el arsénico (V) competirá por lugares de adsorción en las partículas de suelo, para que posteriormente se transporte a través de la membrana plasmática en las raíces. El As (V) es absorbido por el sistema de transporte de fosfato que presentan las plantas, por lo que intervendrá en las reacciones de fosforilación de la planta. Como el ATP se forma a través de reacciones de fosforilación del ADP, en este caso al haber sido absorbido a la planta arsénico en lugar de fósforo, formará un complejo de As(V)-ADP. El problema que presenta este complejo es que es inestable por lo que se descompondrá de manera rápida, lo que causará la muerte celular, pues la planta se habrá quedado sin la energía necesaria que brindan los átomos de fósforo en las moléculas de ATP. En el caso del As (III) será absorbido a la planta a través de proteínas encargadas de transportar las moléculas de agua, las cuales son conocidas como acuaporinas. Como el As (III) presenta una afinidad elevada a los grupos sulfhídrico de las proteínas, es capaz de desactivar grupos enzimáticos que contengan esta especie. (Imagen 2: Transporte y metabolismo de arsénico en plantas. Garcia Salgado Sara, Quijano Nieto M. Angeles (2013). Estudios de especiación de arsénico y acumulación de metales en muestras de interés ambiental (Tesis doctoral). Universidad politécnica de Madrid.)



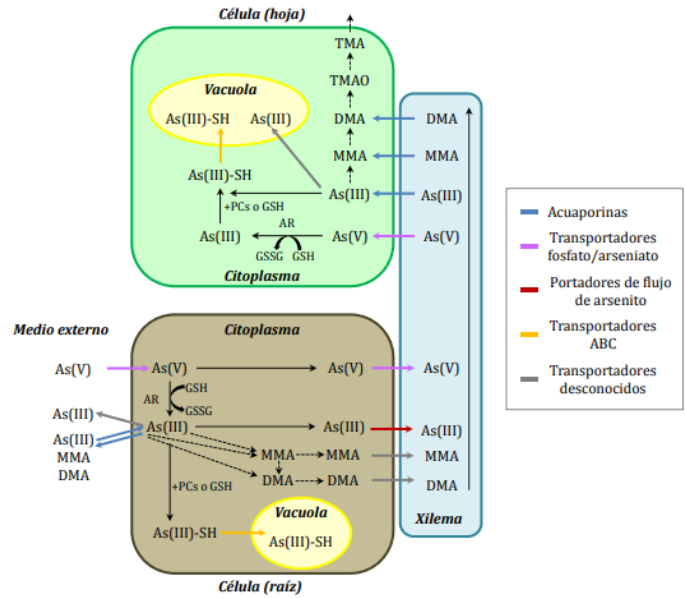


Imagen 2: Transporte y metabolismo de arsénico en plantas. Una vez que las especies iónicas del arsénico (As (III) y As (V)) han sido absorbidas por la raíz de la planta, estas pueden ser almacenadas, liberadas al medio o ubicadas en las distintas partes de la planta por medio del xilema

2.5. Efecto del pH en la movilización de arsénico en suelos

Para este metal un aumento en el pH conlleva a un aumento en la movilización que tiene en el suelo. Esto ocurre debido a que al aumentar el pH se liberarán aniones, por lo que las formas As (III) y As (V) serán liberadas en el suelo. Además, a valores de pH elevados se puede hacer reaccionar el suelo con carbonatos o sulfatos dando como resultado un precipitado de arsénico que posteriormente formará oxi-hidroxidos. Este precipitado se formará a un valor de 10.5 de pH, lo cual indica que la máxima concentración de As (V) se encuentra en este valor de pH. De manera contraria cuando el pH en el suelo pasa el valor de 2.5 el arseniato está completamente protonado.

2.6. Toxicidad del arsénico

La toxicidad que puede presentar este metal está ligada al estado de oxidación que tenga, así como al radical al que este unido. Al contrario que con la mayoría de los metales, en donde sus compuestos orgánicos presentan una toxicidad mucho más

elevada que sus contrapartes inorgánicas, para el arsénico ocurre exactamente lo opuesto en donde sus compuestos inorgánicos son mucho más tóxicos, esto es debido a que a mayor metilación presente en el arsénico menor será el grado de peligro que presente.

Si nos basamos en el estado de oxidación para determinar el riesgo que presentan los compuestos de arsénico, se obtiene que las formas con un estado de oxidación de +3 son más tóxicas que las que presentan un estado de oxidación de +5. La toxicidad de la especie As (III) se debe a que puede interferir con procesos enzimáticos y de transcripción celular, generando un deterioro en la salud.

El arsénico es un veneno que se acumula en el cuerpo humano y que afecta a casi todos los sistemas de este. Su efecto se conoce como arsenicosis. Los efectos de este metal sobre el cuerpo pueden ser agudos o crónicos dependiendo de la cantidad que sea ingerida y el periodo de tiempo de la ingesta, pudiendo causar la muerte en pocas horas. Los primeros síntomas del envenenamiento suelen ser de tipo dermatológico seguidos de síntomas gastrointestinales como vómitos, dolores de estómago, de garganta o diarrea, además se pueden presentar problemas de tipo nervioso o problemas del sistema circulatorio e incluso distintos tipos de cáncer.

## 2.7. Etapas del proceso de atomización

1. Transporte de la muestra: para poder transportar la muestra esta debe estar en disolución (digestión de la materia orgánica), una vez que el metal pesado que se analizará cumple con esta condición, la disolución será llevada a través de un pequeño tubo de plástico hasta la cámara de nebulización. Este transporte se realiza por aspiración, para ello se pueden emplear bombas peristálticas o jeringas que inyecten la muestra en la cámara de nebulización, es importante que tanto la muestra como el patrón se trabajen a condiciones de velocidad idénticas. Además, las características físicas de las muestras y de los patrones deben de ser idénticas, por lo que para ambos se debe utilizar el mismo disolvente.

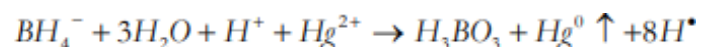
2. **Nebulización:** en esta etapa se llevará la disolución desde el extremo del tubo de plástico donde fue tomada la muestra hasta un nebulizador neumático, el cual dispersará la solución en pequeñas gotas las cuales se mezclarán con un combustible que será inyectado al equipo. Este tipo de nebulizadores neumáticos producen un aerosol cuyas gotas tienen un diámetro entre 1-25  $\mu\text{m}$ . Los nebulizadores neumáticos son los que limitan los equipos de absorción atómica que emplean llama, ya que las gotas que se consideran adecuadas para entrar al proceso de incineración (llama) deben tener menos de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro, por lo que representan un porcentaje muy pequeño de la muestra.
3. **Transporte del aerosol:** esta etapa consiste en evitar que las gotas de diámetros muy grandes lleguen a la llama, para esto se emplean bolas de impacto, tabiques deflectores, entre otros, con esto se pretende aumentar las partículas de tamaño adecuado.
4. **Desolvatación:** este proceso consiste en que por acción del calor de la llama se eliminará el agua y demás solventes de la gota, dejando así partículas de sal seca. La velocidad de evaporación que presentan las gotas depende del tamaño de las gotas, las características del disolvente y de la temperatura que pueda alcanzar la llama, es por este motivo que si las partículas que llegan hasta la llama son muy grandes no se produce una desolvatación completa.
5. **Vaporización:** este paso consiste en cambiar de estado de agregación las partículas de sal, pasando de sólido a vapor por acción del calor. Las sales que tienen bajo punto de ebullición o que son fácilmente sublimables se vaporizarán con facilidad, mientras que aquellas que se descomponen en la llama darán óxidos estables, estas sales son las de magnesio, aluminio y calcio, por lo que no se vaporizarán completamente.

## 2.8. Diferencias en el método de absorción atómica con vapor frío

Con la modificación de vapor en frío para el método de absorción atómica se determinará mercurio en una matriz de maíz, frijol, chile y jitomate. Se deberán hacer consideraciones especiales en cuanto al método previamente descrito, puesto que este metal es un caso especial, ya que debido a su volatilidad no se emplea la llama, sino que puede determinarse en forma de vapor frío.

Para realizar este método se utiliza un agente reductor el cual puede ser cloruro estañoso o borohidruro de sodio, para el caso del borohidruro de sodio se prepara en una solución al 3% en NaOH al 1%. La reacción del mercurio en solución con el agente reductor produce mercurio atómico muy volátil, este mercurio será llevado al detector del espectro de absorción mediante un gas de arrastre como argón o nitrógeno.

En la siguiente reacción se muestra cómo se forma el  $Hg^0$  por la interacción con el agente reductor, en este caso borohidruro de sodio, el cual será arrastrado posteriormente por el gas inerte hasta el detector del espectro de absorción. (Cabrera-Vique 2007).



## 2.9. Interferencias en el análisis de mercurio por absorción atómica con vapor frío

1. Las muestras de mercurio se deben digerir completamente, ya que si se encuentran presentes compuestos orgánicos que no han sido degradados completamente, pueden generar interferencias espectrales en las mediciones realizadas.
2. Si se presentan concentraciones elevadas de sólidos disueltos en la disolución de mercurio (materia orgánica digerida), esto causará interferencias debido a la diferencia de viscosidades entre las soluciones patrón y las muestras digeridas.

3. Si se presentan concentraciones altas de cloruros esto impedirá la correcta toma de muestras, debido que los cloruros absorben la misma longitud de onda que el mercurio.
4. Si no se tiene cuidado en el lavado del material se pueden presentar interferencias con la experimentación.
5. Altas concentraciones de mercurio, hierro, cobalto, cobre y níquel, pueden formar precipitados en la reducción.

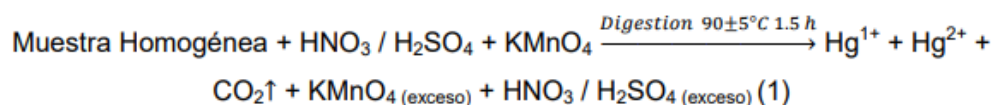
#### 2.10. Preparación de las muestras de mercurio para el análisis de absorción atómica.

Para poder realizar un análisis cuantitativo del mercurio en muestras orgánicas (ya sean plantas o carnes como pescado), aguas crudas y potables, se debe realizar la completa destrucción de las muestras que se quiere analizar, esto con el fin de lograr la disolución del mercurio, para ello se deben digerir dichas muestras.

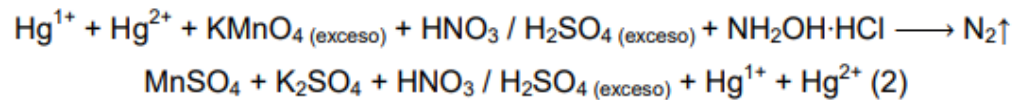
El tratamiento usado para la digestión de materia orgánica consiste en calentar la muestra de materia orgánica, ya sea por microondas o por baño maría, las muestras son preparadas generalmente con mezclas de ácidos y permanganato de potasio.

Este proceso deberá realizarse bajo condiciones controladas debido a la volatilidad que presenta el mercurio. La reacción del proceso es la que se muestra abajo.

#### 2.11. Eliminación del color para el análisis de muestras con el sistema de vapor frío



La formación de color ocasionada por el permanganato de potasio en la muestra de mercurio resulta un problema, el cual ocasiona interferencias con la técnica de absorción atómica-vapor frío, es por ello que se hace reaccionar el permanganato de potasio en exceso con una solución de cloruro de hidroxilamina para formar una sal soluble y con ello desaparecer el color morado del permanganato



## 2.12. Normatividad nacional e internacional: límites máximos permisibles de mercurio y arsénico

Para poder establecer los límites en los cuales la concentración de metales pesados en diferentes sustancias se torna un riesgo para la salud humana, es necesario tener un control bajo el marco establecido por las leyes, el cual nos indique cuando un producto como lo puede ser el agua embotellada o los alimentos enlatados sobrepasan ciertos niveles permitidos de contaminantes u otras sustancias toxicas. Con el fin de no solamente tener una referencia hacia lo que está establecido como permitido, sino utilizarlo en este trabajo para corroborar si las muestras de maíz, frijol, chile y jitomate escogidas superan estos límites o no, es decir, sí es viable el consumo de estos productos y por lo tanto no presentará un riesgo a la salud.

Es por ello que se nombrarán los límites máximos permitidos de arsénico y mercurio dictados por las leyes nacionales e internacionales.

## Normas

- OMS: límites máximos permitidos de ingesta de arsénico y mercurio

Tabla 1: Límites máximos permitidos de ingesta de arsénico y mercurio

Metales	Límite máximo por ingesta
Arsénico	20-300 $\mu\text{g}/\text{kg}$ día
Mercurio	1.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ día

- OSHA: límites máximos permitidos de mercurio y arsénico en aire y concentración máxima de mercurio y arsénico en aire por un periodo de exposición de 8 horas

Tabla 2: Límites máximos permitidos de mercurio y arsénico en aire y concentración máxima de mercurio y arsénico en aire por un periodo de exposición de 8 horas

	exposición en un periodo de 8 horas	límite máximo permisible
Mercurio inorgánico		1 mg/10m <sup>3</sup>
compuestos orgánicos de mercurio	0.01 mg/m <sup>3</sup>	0.04 mg/m <sup>3</sup>
Arsénico inorgánico	5 ug/m <sup>3</sup>	10 ug/m <sup>3</sup>

- NOM-127-SSA1-1994: Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.

Tabla 3: Límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua

Metales	Límite permisible
Arsénico	0.05 mg/L
Mercurio	0.001 mg/L

- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004: establece criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos.

Tabla 4: Criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados

Contaminante	Uso agrícola/residencial /comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Arsénico	22	260
Mercurio	23	310



### 3. Procedimiento experimental

#### 3.1. Metodología experimental: manejo de las muestras

1. Las muestras estudiadas fueron obtenidas de un ejido en el centro del país en el estado de Morelos (por cuestiones de confidencialidad no se mencionará de que centro de cultivo fueron obtenidas las muestras).
2. Se recolectaron 4 matrices de diferentes cultivos (maíz, chile, frijol, suelo).
3. Se separó la raíz, el tallo, las hojas y el fruto de cada matriz, también se tomó una muestra de suelo de cada matriz para su posterior estudio.
4. Cada muestra se pesó en charolas individuales. (Tabla 5: liners y masa de las muestras de maíz)
5. Posteriormente se trituraron las muestras con el fin de realizar una correcta digestión acida.
6. Finalmente se digirieron las muestras y se cuantifico la cantidad de arsénico y mercurio de cada una de ellas por las técnicas de absorción atómica por horno de grafito y vapor frio respectivamente.



Imagen 3, 4 y 5: Separación de muestras: Muestras de las matrices de maíz, chile, frijol y jitomate separadas en suelo, raíz, tallo, hojas y fruto

Liner	masa (g)	Muestra
1	-	Blanco
2	0.5004	Suelo maíz
3	0.5011	Raíz maíz
4	0.5010	Tallo maíz
5	0.5001	Hoja maíz
6	0.5095	Maíz

Tabla 5. Peso las muestras de maíz.

Liner	masa (g)	Muestra
1	-	Blanco
2	0.5	Suelo chile
3	0.2598	Raíz chile
4	0.4276	Tallo chile
5	0.507	Chile

Tabla 6. Peso de las muestras de chile.

Liner	masa (g)	Muestra
1	-	Blanco
2	0.5031	Suelo frijol
3	0.1988	Raíz frijol
4	0.4596	Tallo frijol
5	0.2487	Hoja frijol
6	0.5047	Frijol

Tabla 7. Peso de las muestras de frijol.

Liner	masa (g)	Muestra
1	-	Blanco
2	0.5034	Suelo jitomate
3	0.5134	Raíz jitomate
4	0.5042	Tallo jitomate
5	0.5019	Hoja jitomate
6	0.5119	Jitomate

Tabla 8. Peso de las muestras de jitomate.

### 3.2. Metodología experimental: determinación de mercurio en las muestras de jitomate, chile, frijol y maíz

1. Preparación de muestras: Para poder eliminar la materia orgánica de las muestras se realizó una digestión. En este proceso primero se colocaron las muestras pesadas en los liners y además se utilizó un liner sin muestra, esto con el fin de usarlo como blanco.

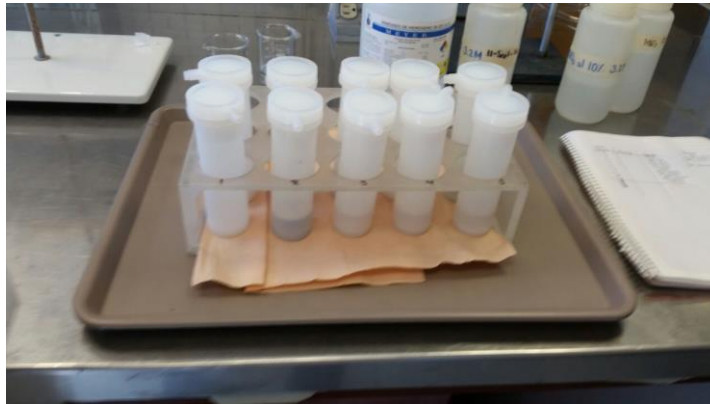


Imagen 6: Preparación de los liners con ácido nítrico, peróxido de hidrogeno y las muestras previamente pesadas

Después de haber colocado las muestras en cada liner se agregó a estos 2 ml de peróxido de hidrogeno Meyer 29-32% y 3 ml de ácido nítrico al 10% con una concentración de 3.2 M. Una vez que se agregó el peróxido de hidrogeno y el ácido nítrico junto con las muestras los liners se dejaron reposar 24 horas.

2. Digestión: Una vez que se prepararon los liners con el método previamente descrito, se colocaron en un marco HP-500 PLUS además de que se les equipo a cada uno un capuchón para que no se saliesen de los marcos y una membrana para evitar derrames en el horno. Ya acomodados los marcos en el horno se conectó la muestra en blanco a un sensor de temperatura y otro de presión.



Imagen 7 y 8: Liners montados en los marcos HP-500 y equipados dentro del horno para la digestión ácida

El horno que se utilizó es un sistema de digestión con microondas CEM MARSX press con controlador de temperatura, el cual se ajustó a los parámetros: 1 etapa, potencia 100%, MAX 1200 W, Rampa 20:00 min, 0250 psi, 180 °C, Mant 10:00 min. Con estos parámetros fue realizada la digestión.

Al término de la digestión se retiraron los marcos del horno y se dejaron reposar por 24 horas junto con los liners, con el fin de condensar los vapores dentro y reducir su presión interna.

3. Después de que los liners reposaron por 24 horas se vertió el digerido en matraces de 25 ml llevándolos al aforo con agua desionizada, para posteriormente depositar esta disolución en frascos de polietileno de 25 ml cada uno y almacenarlos en refrigeración.



Imagen 9: Frascos de polietileno con el digerido. Este digerido es el que se obtuvo después de que se mezclara el peróxido de hidrogeno con el ácido nítrico y la muestra y posteriormente se realizara la digestión en el horno.

4. Preparación de disoluciones: Para poder llevar a cabo este experimento se necesitó hacer reaccionar al mercurio que está presente en el digerido con un agente reductor, la reacción fue descrita previamente en este trabajo, para ello se realizaron las siguientes disoluciones, también se realizó la preparación de la disolución obtenida en la digestión de cada matriz, con el fin de analizar cuantitativamente la cantidad de este metal presente en las muestras previamente especificadas de maíz, frijol, chile y jitomate y por último se prepararon las disoluciones stock las cuales se utilizaron con el propósito de construir la curva de calibración del equipo de absorción atómica.

Se realizaron las disoluciones siguientes:

Ácido clorhídrico (HCl)

Borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ )



Imagen 10: Preparación de las disoluciones de HCl, borohidruro de sodio y disolución stock. Estas disoluciones se emplearán posteriormente para la generación de vapor frío para el análisis de mercurio.

Disolución stock:

- a) De una disolución de mercurio (marca: Crescent Chemical Co.) cuyo valor se conocía ( $1000 \mu\text{g/mL}$ ), se realizaron las diluciones correspondientes para poder obtener la disolución stock con la cual se construirá la curva de calibración.

Curva de calibración:

- a) Se utilizaron 8 matraces de 50 ml, a cada matraz se le agrego un volumen diferente de la disolución stock.

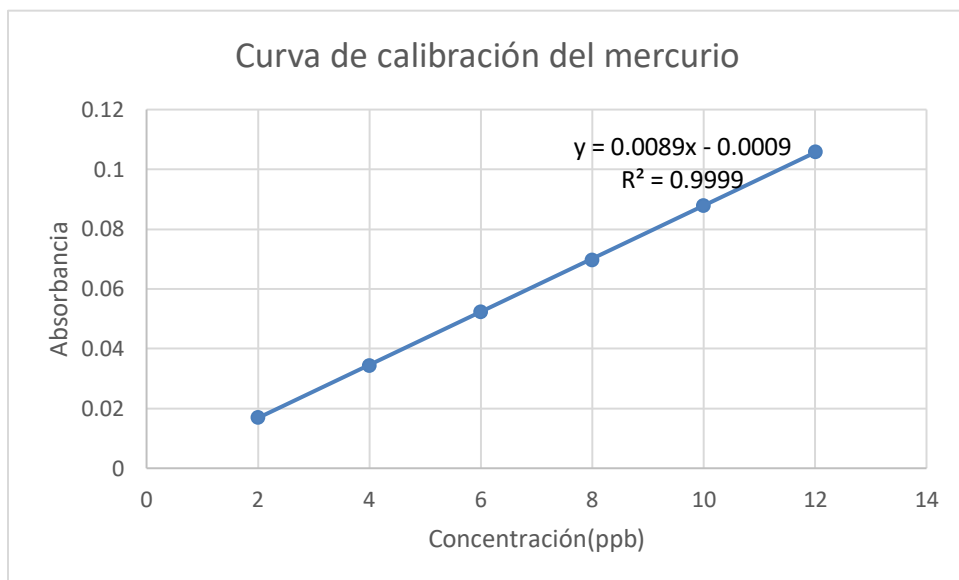
- b) Además de la disolución stock a todos los matraces se les añadió 3ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) concentrado y 2.5 ml de permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) al 5%.
- c) Las soluciones se dejaron reposar por 15 minutos, posteriormente se agregaron gotas de clorhidrato de hidroxilamina, esto con el fin de eliminar el color del permanganato de potasio.
- d) Finalmente se llevó al aforo todos los matraces.



Imagen 11: Disolución stock. En estos matraces se diluyeron distintos volúmenes de disolución madre de mercurio a fin de construir una curva de calibración para el espectro de absorción atómica con vapor frío.

Tabla 9: Valores de concentración y absorbancia para la curva de calibración de mercurio. Resultados obtenidos para el análisis de las disoluciones stock.

Matraz	Punto	Volumen Stock de Mercurio (ml)	Concentración ( $\mu\text{g/L}$ )	Absorbancia
1		0	0	
2		0.5	1	
3	1	1	2	0.0171
4	2	2	4	0.0345
5	3	3	6	0.0523
6	4	4	8	0.0697
7	5	5	10	0.0879
8	6	6	12	0.1059



Gráfica 1: Curva de calibración del mercurio. Obtenida a partir de los resultados mostrados en la tabla 9.

Preparación de disoluciones del digerido de la matriz de maíz, frijol, chile y jitomate:

- a) Se tomaron 5 ml de las muestras previamente digeridas de maíz, jitomate, chile y frijol (suelo, tallo, hoja y fruto) y se colocaron en matraces de 50 ml.
- b) A estos 5 ml se les añadió 1.5 ml de  $\text{HNO}_3$  concentrado y 1.25 ml de una disolución de  $\text{KMnO}_4$  al 5%.
- c) Esta mezcla se dejó reposar por 15 minutos.



Imagen 12: Remoción del color morado característico de  $\text{KMnO}_4$ . Se deberá de quitar esta coloración para que la técnica de absorción atómica no tenga interferencias.



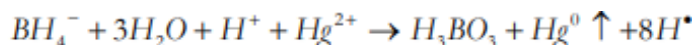
- d) Se añadieron gotas de  $\text{NH}_2\text{OHHCL}$  (clorhidrato de hidroxilamina), con el fin de remover el color morado característico de  $\text{KMnO}_4$ .
- e) Finalmente se aforaron los matraces de 50 ml.



Imagen 13: Muestras finales. Preparadas de acuerdo a los pasos anteriores.

5. Procedimiento en el uso del equipo de absorción atómica con generador de hidruros:

- a) Para el sistema de generación de hidruros se tomó la disolución de mercurio mediante una manguera conectada a un mini reactor, al cual se le suministro por medio de otras dos mangueras, el ácido clorhídrico que se preparó previamente y la solución de borohidruro de sodio.
- b) En el reactor se llevó a cabo la siguiente reacción (descrita previamente)



- c) Una vez que se generó el mercurio  $\text{Hg}^0$  este fue arrastrado por gases inertes a la cámara en donde se hizo incidir la radiación electromagnética del cátodo, que contiene el metal a analizar, para que los átomos de  $\text{Hg}^0$  absorbieran esta energía, y fuese posible determinar la cantidad de estos en la muestra.
- d) La longitud de onda que fue usada durante el experimento tuvo un valor de  $\lambda=253.7$ .



- e) Los datos obtenidos fueron almacenados en una computadora conectada al equipo para su posterior tratamiento.



Imagen 14 y 15: Equipo de espectrometría de absorción atómica con vapor frío. Este equipo emplea un generador de hidruros para el análisis de vapor de mercurio.

### 3.3. Metodología experimental: determinación de arsénico en las muestras de jitomate, chile, frijol y maíz

Para realizar la determinación de arsénico de todas las especies seleccionadas la metodología empleada es muy similar a la cuantificación de mercurio por absorción atómica con generador de hidruros, ya que de igual forma se utilizó un espectro de absorción atómica, pero no se empleó el método de vapor frío debido a que el arsénico no es volátil a altas temperaturas, por lo que no hubo necesidad de preparar las disoluciones de HCl y  $\text{NaBH}_4$ , además no se agregó al digerido 1.5 ml de  $\text{HNO}_3$  concentrado y 1.25 ml de una disolución de  $\text{KMnO}_4$  al 5%. Por lo tanto, los primeros 3 pasos de la metodología para la determinación de mercurio (también se debe de incluir la preparación de las disoluciones stock del paso 4) son exactamente los mismos para la determinación de arsénico, de modo que se enlistaran solo los pasos que sean diferentes.

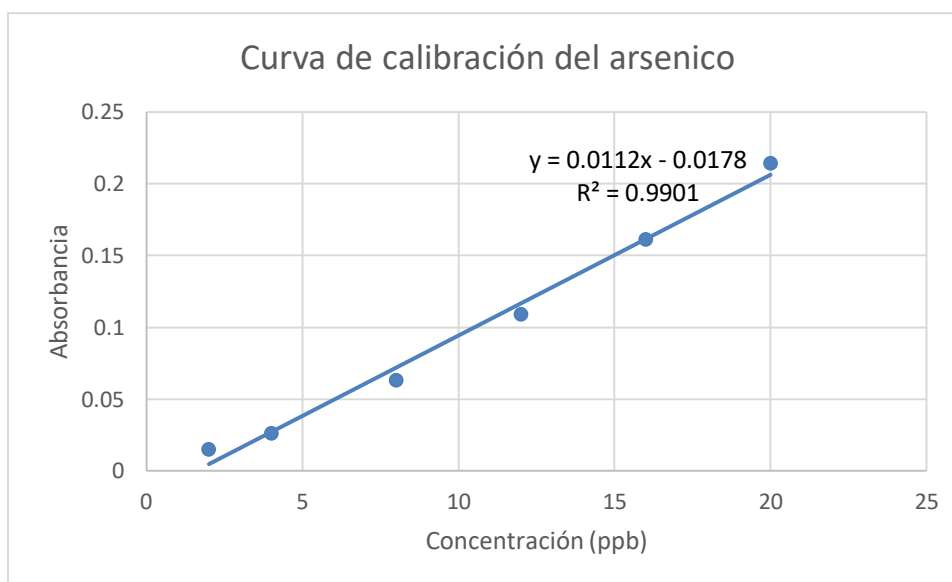
#### 6. Curva de calibración:

- a) Se utilizó de manera directa la disolución obtenida en el sistema de digestión con microondas CEM MARSX.

b) Se utilizaron 8 matraces de 50 ml, a cada matraz se le agrego un volumen diferente de la disolución stock.

Tabla 10: Valores de concentración y absorbancia para la curva de calibración de arsénico. Resultados obtenidos para el análisis de las disoluciones stock.

Matraz	Punto	Conc. ( $\mu\text{g/L}$ )	Absorbancia
1			0
2	1	2	0.015
3	2	4	0.026
4	3	8	0.063
5	4	12	0.109
6	5	16	0.161
7	6	20	0.214



Gráfica 2: Curva de calibración del arsénico. Obtenida a partir de los resultados mostrados en la tabla 10.

7. Preparación de disoluciones del digerido de la matriz de maíz, frijol. Chile y jitomate:

- a) A diferencia de las diluciones realizadas para el análisis de mercurio en este caso no fue necesario añadir  $\text{KMnO}_4$  ni gotas de clorhidrato de hidroxilamina.
- b) Además, la preparación de la dilución la realizó el equipo de absorción atómica con horno de grafito.
- c) La longitud de onda que fue usada durante el experimento tuvo un valor de  $\lambda=193$
- d) Los datos obtenidos fueron almacenados en una computadora conectada al equipo para su posterior tratamiento.

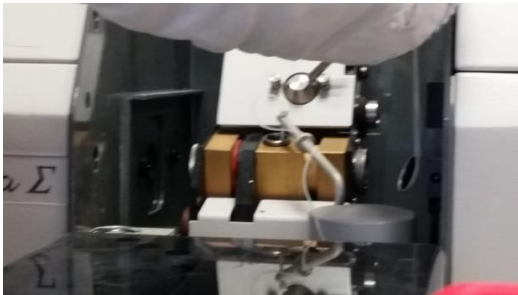


Imagen 16,17 y 18: espectro de absorción atómica con horno de grafito para la determinación de arsénico.

### 3.4. Método de análisis de riesgo a cáncer

Para realizar el tratamiento de datos concerniente al riesgo a cáncer presentado por el consumo de las matrices, se emplearon las siguientes formulas:

- Determinación de la ingesta:

$$I = C \frac{CR * EF * ED}{BW * AT}$$

Donde:

C = Concentración promedio de contaminante en la exposición (mg/L si es en agua, o mg/mg si es en suelo, o mg/m<sup>3</sup> si es en aire)

CR = Razón de contacto (en L/día, mg/día o m<sup>3</sup>/día)

EF = Frecuencia de exposición (en días por año)

ED = Duración de la exposición (en años)

BW = Peso corporal (en kg)

AT = Periodo en el cual la exposición es promedio (en días)

- Cálculo del riesgo a cáncer (RAC):

$$RAC = \frac{I}{RfD}$$

Donde:

I= Razón de ingesta (en mg/kg\*día)

RfD= Dosis del factor de referencia (en mg/kg\*día)

RAC=riesgo a cáncer

El valor del RAC es una cantidad adimensional, además de tener un valor critico de 1, lo que indica que si los valores del riesgo a cáncer sobrepasan la unidad se puede considerar que la materia analizada, presenta riesgos a la salud. (Nazaroff, W. W., & Alvarez-Cohen, L.2001)

Ejemplo de cálculo:

- Cálculo del RAC por ingesta de mercurio para suelo de maíz

Se realizan primero los cálculos de las diluciones para obtener la concentración

$$\frac{10.7954\mu\text{g}}{L} \div \left(\frac{1}{10}\right) \div \left(\frac{5}{50}\right) * \left(\frac{0.025L}{0.5004g}\right) = 53.9338\mu\text{g/g}$$

Ajustando las unidades para tener un resultado de ingesta en mg/kg\*día

$$\frac{53.9338\mu\text{g/g}}{1,000,000} = 0.0000539 \text{ mg/mg}$$

Finalmente se calcula I y RAC

$$I = 0.0000539 \frac{\text{mg}}{\text{mg}} * \left( \frac{\frac{100\text{mg}}{\text{día}} * \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} * \frac{22 \text{ años}}{76.92 \text{ años}}}{74.8 \text{ kg} * \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} * \frac{22 \text{ años}}{76.92 \text{ años}}} \right) = 0.0000721 \text{ mg/kg} * \text{ día}$$

$$RAC = \frac{\left(0.000072 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} * \text{ día}\right) * (1.075)}{0.0001} = 0.775$$

Tabla 11: Valores empleados para el cálculo de la ingesta

Valores constantes	Cantidad	Unidad
Peso promedio mujer (BW)	68.7	kg
Peso promedio hombre (BW)	74.8	kg
Días ingesta (EF)	365	días
Años promedio vida	76.92	años
Años del individuo (ED)	22	años
CR suelo	100	mg/día
CR maíz	538000	mg/día
CR chile	43000	mg/día
CR frijol	29500	mg/día
CR jitomate	41000	mg/día

El valor de 100 mg/día (valor para suelo) fue tomado del manual Public Health Assessment Guidance Manual de la ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry).

Los datos de CR para cada fruto estudiado fueron obtenidos de la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA).

Para los datos de peso promedio y años de vida se utilizaron los datos de esperanza de vida y peso del mexicano promedio publicados por la INEGI.

Para los días de ingesta se asumió un consumo en todo el año debido a que el maíz, chile, jitomate y frijol son alimentos de consumo básico en la dieta del mexicano promedio.

Finalmente, los años del individuo (ED) se supusieron para una persona de 22 años de edad.

El valor de 1.075 mostrado en la ecuación de RAC se explica en el apéndice.

Tabla 12: Valores de RfD empleados para el cálculo de riesgo a cáncer (RAC)

Metilmercurio	0.0001
HgCl <sub>2</sub>	0.0003
Mercurio	0.000086
Arsénico Inorgánico	0.0003

Los datos mostrados en esta tabla fueron obtenidos de la EPA (United States Environmental Protection Agency) además, se emplearon 3 compuestos distintos de mercurio debido a que no se conocía cuales compuestos se tenían en las matrices antes de realizar la digestión acida en ellas, es por esta razón que se tomó en cuenta un espectro amplio de compuestos

## 4. Resultados

### 4.1. Determinación de mercurio y arsénico en maíz, frijol, chile y jitomate

Tabla 13: Resultados del análisis cuantitativo de mercurio y arsénico en una matriz de maíz, chile, frijol y jitomate.

Muestra	Maíz		Chile		Frijol		Jitomate	
	Mercurio	Arsénico	Mercurio	Arsénico	Mercurio	Arsénico	Mercurio	Arsénico
Suelo (ppb, ug/L)	10.79	10.68	4.45	10.46	1.078	20.34	1.5	13.73
Raíz (ppb, ug/L)	3.025	10.87	3.3	8.179	6.017	13.78	10.86	11.69
Tallo (ppb, ug/L)	3.27	7.66	0.85	8.575	3.86	14.53	8.35	9.544
Hoja (ppb, ug/L)	3.67	9.27			3.75	11.97	7.092	8.169
Fruto (ppb, ug/L)	5.06	7.83	4.73	8.869	3.093	14.06	3.76	9.411

En esta tabla se encuentran los resultados de concentración obtenidos del espectro de absorción atómica con horno de grafito para el caso de arsénico y del espectro de absorción atómica con generador de hidruros para el caso del mercurio. Estas concentraciones son las iniciales pues falta calcular la dilución correspondiente en cada caso.

Tabla 14: Resultados de concentración finales para mercurio y arsénico en una matriz de maíz, chile, frijol y jitomate.

Muestra	Maíz		Chile		Frijol		Jitomate	
	Mercurio	Arsénico	Mercurio	Arsénico	Mercurio	Arsénico	Mercurio	Arsénico
Suelo [µg/g]	53.93	10.67	22.28	20.93	133.9	20.22	0.7464	68.27
Raíz [µg/g]	15.092	4.639	31.79	7.894	75.67	17.4	5.289	5.698
Tallo [µg/g]	1.634	3.822	0.5005	5.02	21.0063	14.53	4.143	4.762
Hoja [µg/g]	1.837	5.424			3.777	24.14	3.532	4.052
Fruto [µg/g]	62.076	3.846	2.336	4.373	1.532	13.95	1.84	4.604

En esta tabla se muestran los resultados finales de concentración para mercurio y arsénico una vez que se han eliminado todas las diluciones realizadas. Si comparamos los resultados obtenidos en esta tabla se puede encontrar que la distribución de la concentración para cada matriz es distinta. Si analizamos la matriz de frijol para mercurio se puede observar que la raíz tiene una mayor tendencia a absorber los contaminantes de suelo que, si la comparamos con la matriz de maíz y chile. En la matriz de jitomate se encuentra un patrón diferente al resto de las muestras, ya que aquí la mayor parte de los contaminantes de mercurio presentes en el suelo se absorben por completo a la raíz, para que posteriormente se absorba en el tallo y la hoja en mayor medida. Otra tendencia que se puede observar es que la distribución de mercurio en la matriz de chile muestra que la concentración de este metal en el tallo es muy baja. En la matriz de miz ocurre un fenómeno similar en donde la mayor parte de la concentración de mercurio se almacena en el fruto.

Tabla 15: Resultados del riesgo a cáncer en una matriz de maíz, chile, frijol y jitomate para distintos compuestos de mercurio y arsénico.

	RAC (metil mercurio)		RAC (HgCl <sub>2</sub> )		RAC (mercurio elemental)		RAC (Arsénico inorgánico)	
	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Suelo Maíz	0.775	0.843	0.325	0.354	0.838	0.912	0.047	0.051
Maíz	4800	5226	2016	2196	5192	5650	92.2	100
Suelo Chile	0.32	0.348	0.134	0.146	0.346	0.377	0.093	0.1
Chile	14.44	15.72	6.06	6.6	15.6	17	8.38	9.13
Suelo Frijol	1.92	2.09	0.808	0.88	2.08	2.27	0.09	0.098
Frijol	6.51	7.09	2.73	2.98	7.05	7.67	18.4	20
Suelo jitomate	0.01	0.011	0.0045	0.0049	0.0116	0.0126	0.3	0.33
Jitomate	10.87	11.83	4.56	4.97	11.8	12.8	8.43	9.18

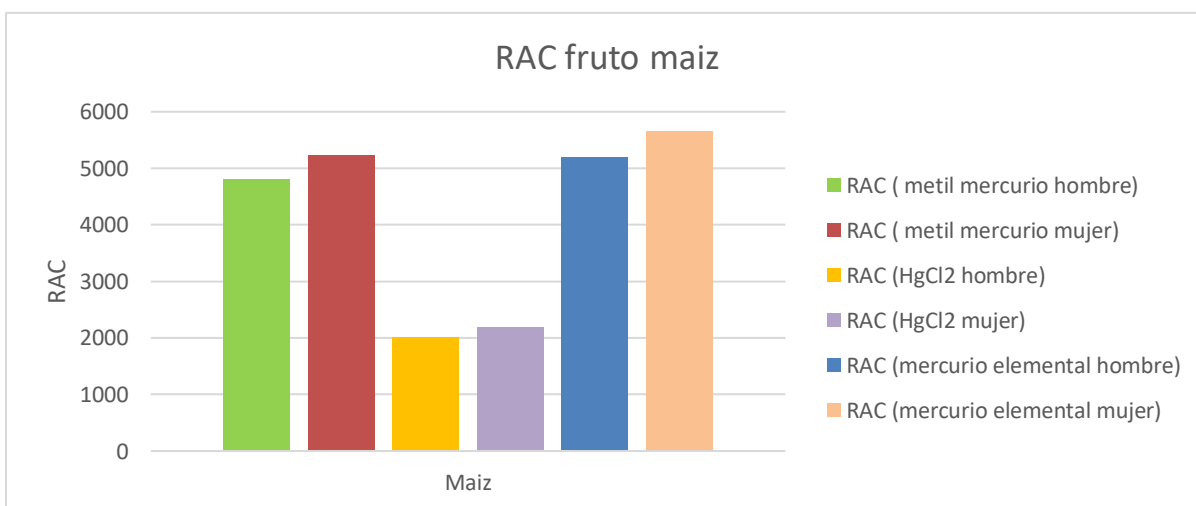


En esta tabla se muestran los distintos resultados de riesgo a cáncer por ingesta de suelo y frutos de las distintas matrices estudiadas para mercurio y arsénico. Al analizar el RAC se debe tener en cuenta que este valor es una cantidad adimensional, además de que para poder interpretar el potencial riesgo a cáncer de una manera correcta se establece un rango en el que se indique si existe un riesgo potencial o si no existe dicho riesgo. Para este rango se toma la unidad como base, si el RAC excede la unidad esto indica que por el consumo de la muestra analizada (en este caso el suelo y los frutos de las matrices estudiadas) existirá un potencial riesgo a cáncer, pero si el RAC es inferior a la unidad no existirá un potencial riesgo. Otro punto importante a destacar es que en esta tabla solo se muestran los valores de RAC para suelo y frutos y no se tienen los valores de raíz, tallo y hojas. Esto se debe a que el consumo humano se centra en los frutos y en una menor cantidad se puede ingerir suelo. Para el cálculo del RAC para mercurio se emplearon los factores RfD para mercurio inorgánico, orgánico y elemental. El cálculo fue realizado de esta manera ya que consideraron distintos factores de riesgo para los distintos compuestos de mercurio que se pudiesen encontrar en las muestras analizadas. Analizando los resultados se puede observar que en todas las matrices y en el suelo de la matriz de frijol, tanto para hombre como para mujer, el riesgo potencial supera la unidad con los tres RfD propuestos para los distintos compuestos de mercurio, es decir, que la ingesta de frutos y de suelo de la matriz de frijol representa un riesgo a la salud. De la misma forma podemos analizar los resultados obtenidos para arsénico en el caso tanto de hombres y mujeres se encuentra que todos los frutos superan la unidad, es decir, que también existe un potencial riesgo a cáncer por arsénico. Otra observación importante es que si comparamos los resultados del riesgo para hombre y mujer en la matriz de maíz se encuentra que los valores más altos los presenta la mujer. Es decir, se puede establecer que el RAC es distinto tanto para hombres como para mujeres por la diferencia que existe en peso.

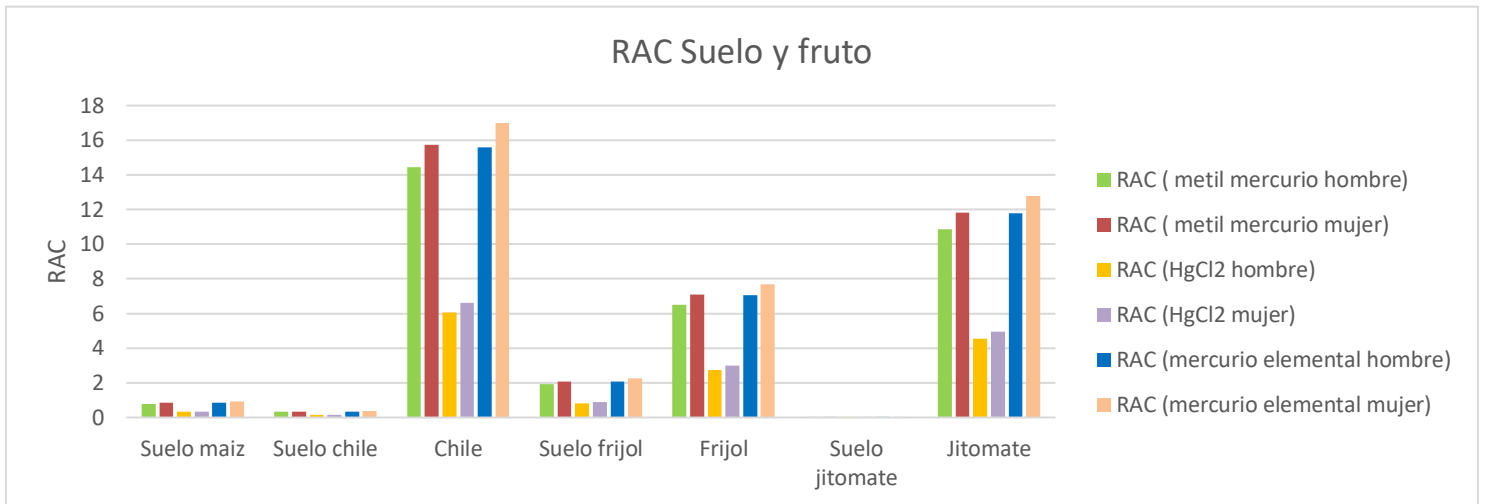
## 4.2. Gráficos de los resultados de RAC y concentración para mercurio y arsénico

- Gráficos RAC para los resultados de mercurio

En estos gráficos podemos observar la proporción de RAC que existe tanto para hombres como para mujeres encontrando que en todos los casos del análisis de mercurio el valor que presenta el RAC para mujeres es mayor. También se observan los resultados para los distintos RfD de mercurio que se emplearon en este trabajo, encontrando que los valores más altos de RAC los presenta el mercurio elemental, posteriormente el metil mercurio y finalmente el cloruro de mercurio. En la gráfica 3 encontramos que los valores de RAC de maíz sobrepasan los 2000 y en el caso más alto los 5000 lo que indica dos posibles explicaciones. La primera es que para el caso del maíz se presenta una ingesta elevada en la dieta diaria del mexicano promedio. La segunda explicación es la concentración de mercurio en el fruto la cual es elevada. En la gráfica 4 se encuentra que para el resto de las matrices el fruto de chile es el que presenta el mayor riesgo a cáncer seguido por el fruto de frijol, también se puede observar que el suelo con un RAC más alto es el del maíz.



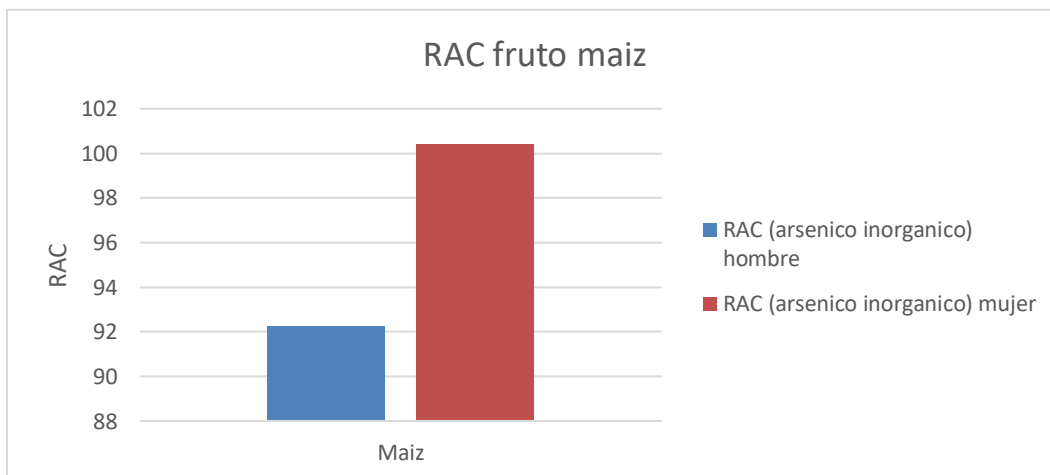
Gráfica 3: RAC del fruto de la matriz de maíz por análisis de mercurio.



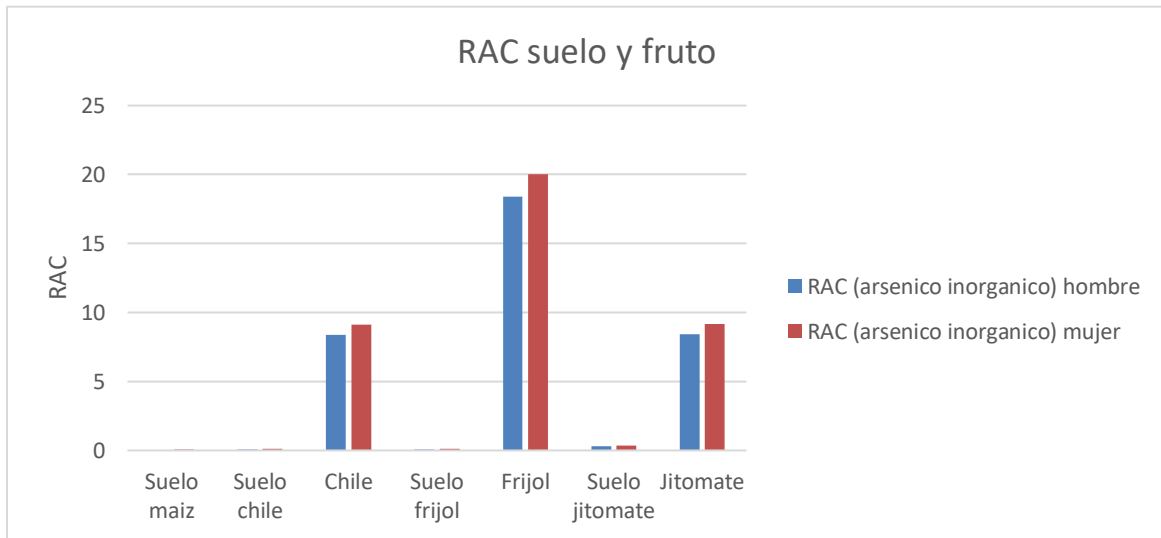
Gráfica 4: RAC de suelo y fruto para las distintas matrices por análisis de mercurio.

- Gráficos RAC para los resultados de arsénico.

En la gráfica 5 podemos encontrar que al igual que lo que sucede con el análisis de mercurio para el fruto de maíz en el análisis de arsénico el fruto de maíz también muestra valores superiores al resto de frutos y suelos analizados de igual forma esto es debido a la alta ingesta que presenta el maíz o a la concentración encontrada de arsénico en el fruto. También se encuentra que los valores de RAC calculados para mujer son mayores que los que presentan los hombres. Finalmente, en el gráfico 6 se tiene que el fruto con mayor RAC por ingesta de mercurio es el frijol y el suelo más contaminado es el de jitomate.



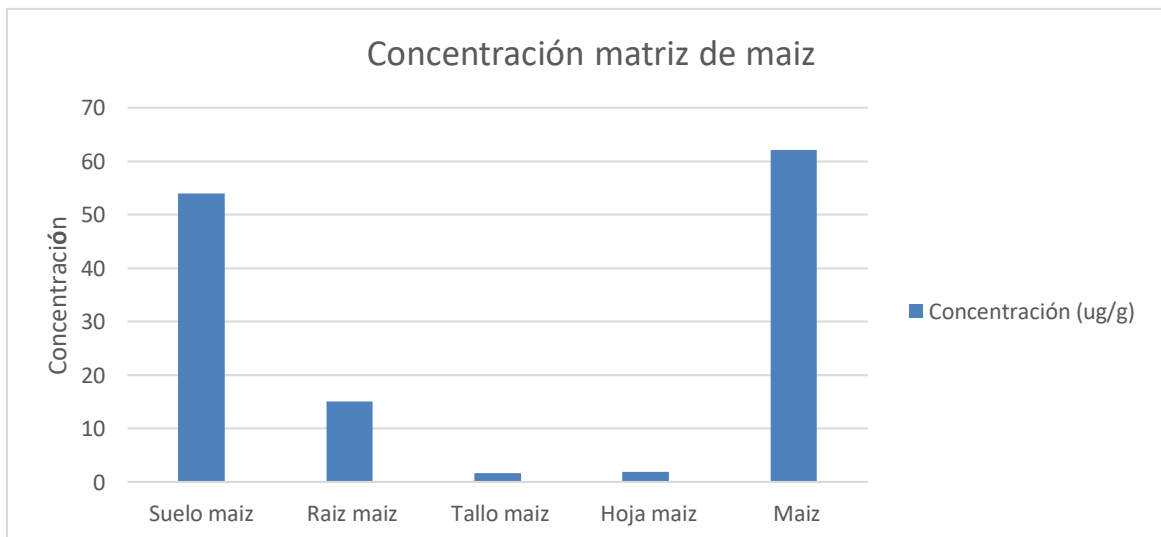
Gráfica 5: RAC del fruto de la matriz de maíz por análisis de arsénico.



Gráfica 6: RAC de suelo y fruto para las distintas matrices por análisis de arsénico (cálculos para mujer y hombre).

- Gráficos de concentración (ug/g) para los resultados de mercurio

En el grafico 7 y 8 se puede observar los perfiles de concentración de mercurio que presentan las matrices de maíz y chile. Para la matriz de maíz el fruto es donde se encuentra la mayor concentración de mercurio, mientras que para la matriz de chile la raíz tiene una mayor tendencia a acumular los contaminantes presentes en el suelo para el caso de mercurio.

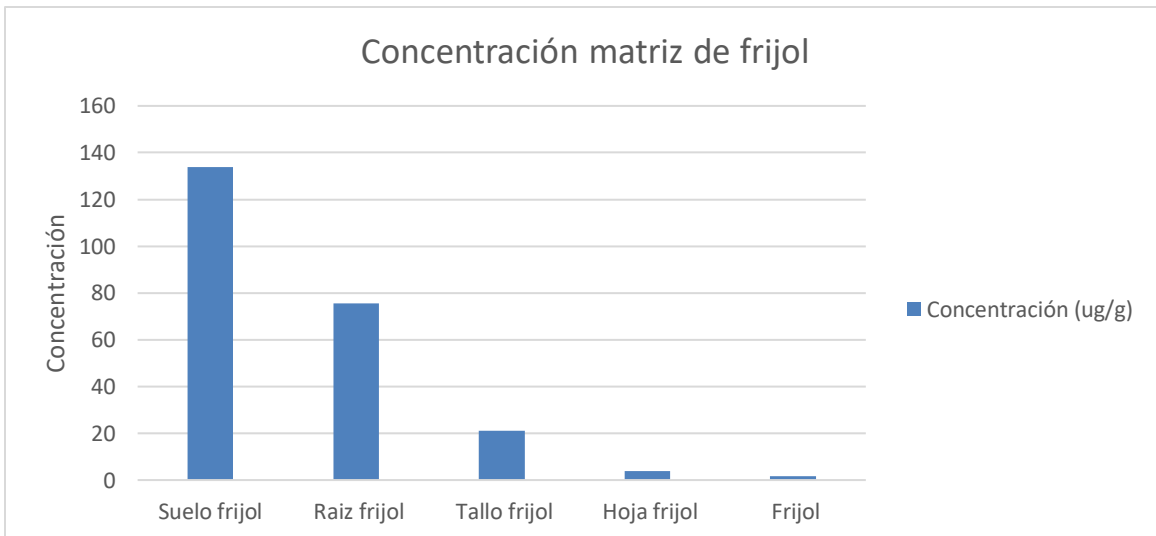


Gráfica 7: Concentración (ug/g) de una matriz de maíz por análisis de mercurio.

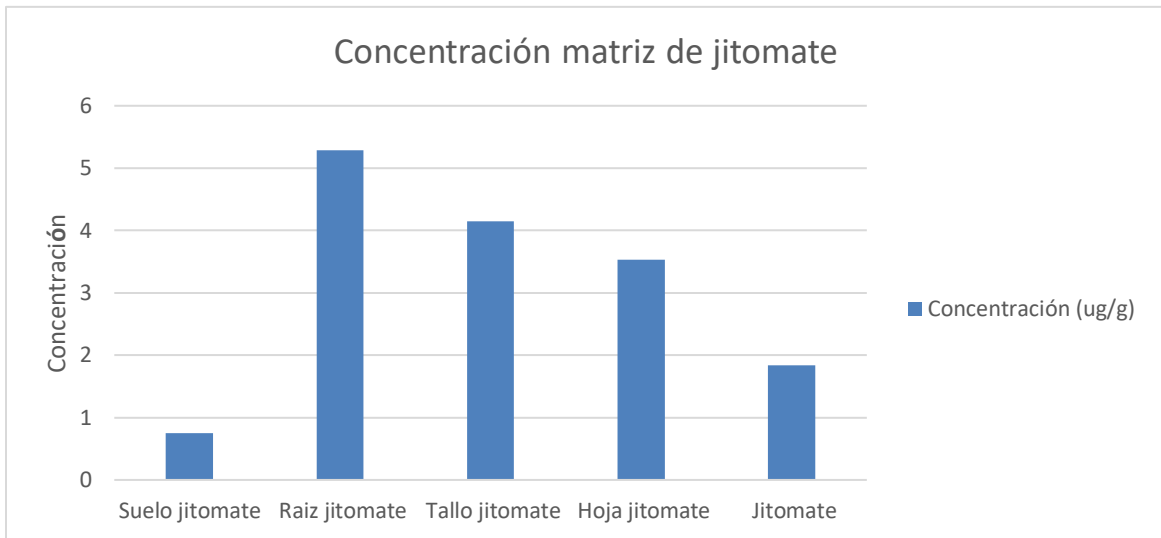


Gráfica 8: Concentración (ug/g) de una matriz de chile por análisis de mercurio.

Para el perfil de concentración presente en las matrices de frijol y jitomate por análisis de mercurio se tiene que la matriz de frijol presenta una distribución totalmente decreciente, en donde no se tiene una tendencia a almacenar los contaminantes en una parte específica de la matriz. Para el matiz de jitomate la raíz absorbe gran parte del mercurio del suelo para distribuirlo de manera decreciente en las distintas partes de la matriz.



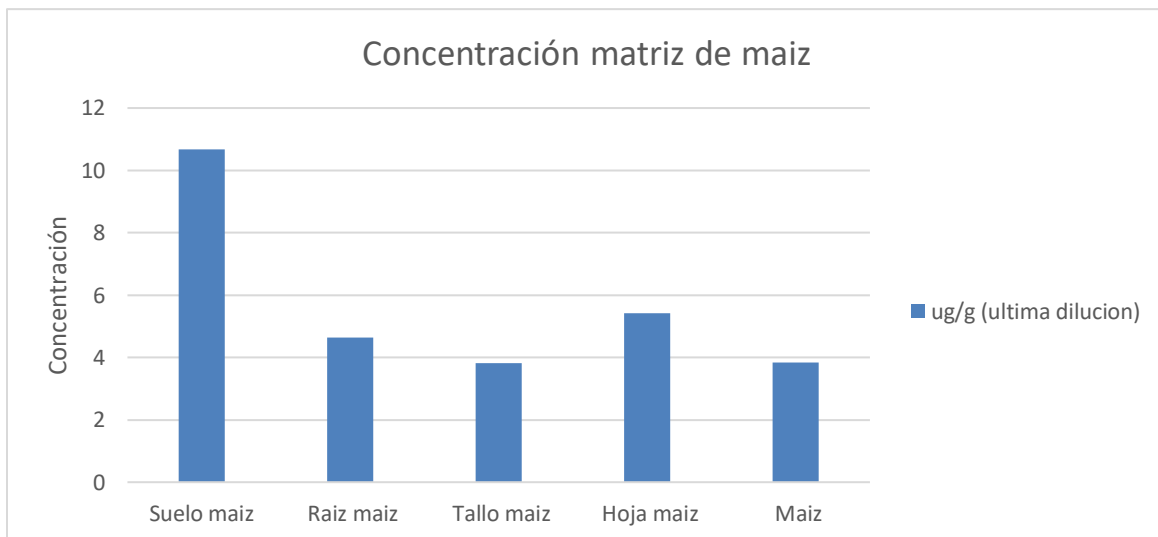
Gráfica 9: Concentración (ug/g) de una matriz de frijol por análisis de mercurio.



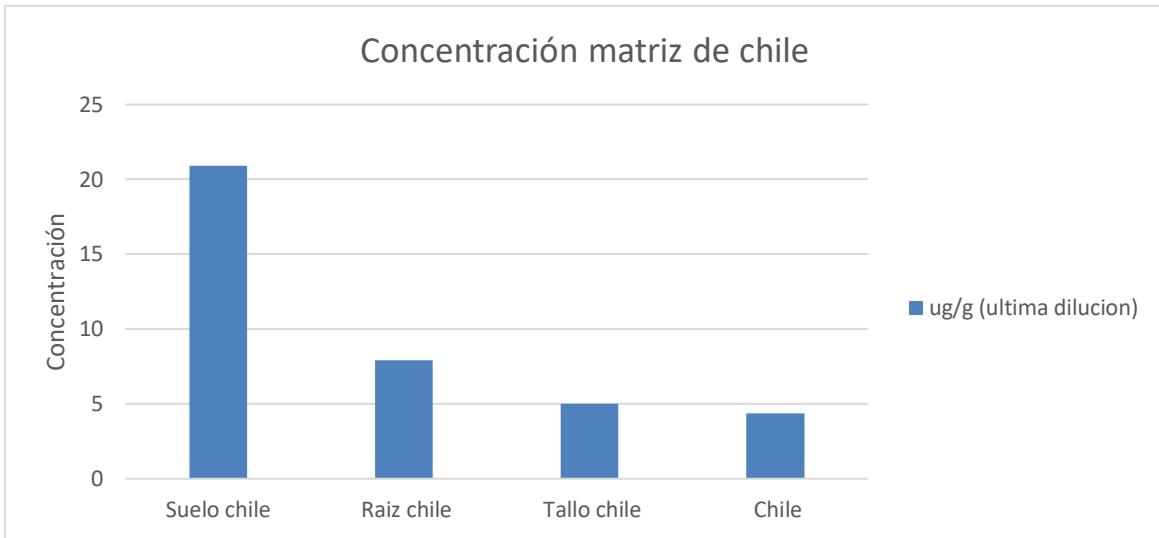
Gráfica 10: Concentración (ug/g) de una matriz de jitomate por análisis de mercurio.

- Gráficos de concentración (ug/g) para los resultados de arsénico

Para los resultados del análisis de arsénico la matriz de maíz, a diferencia de lo que sucedía con mercurio, almacena el arsénico en las hojas, mientras que para la matriz de chile se tiene una tendencia totalmente decreciente en la distribución de los contaminantes.

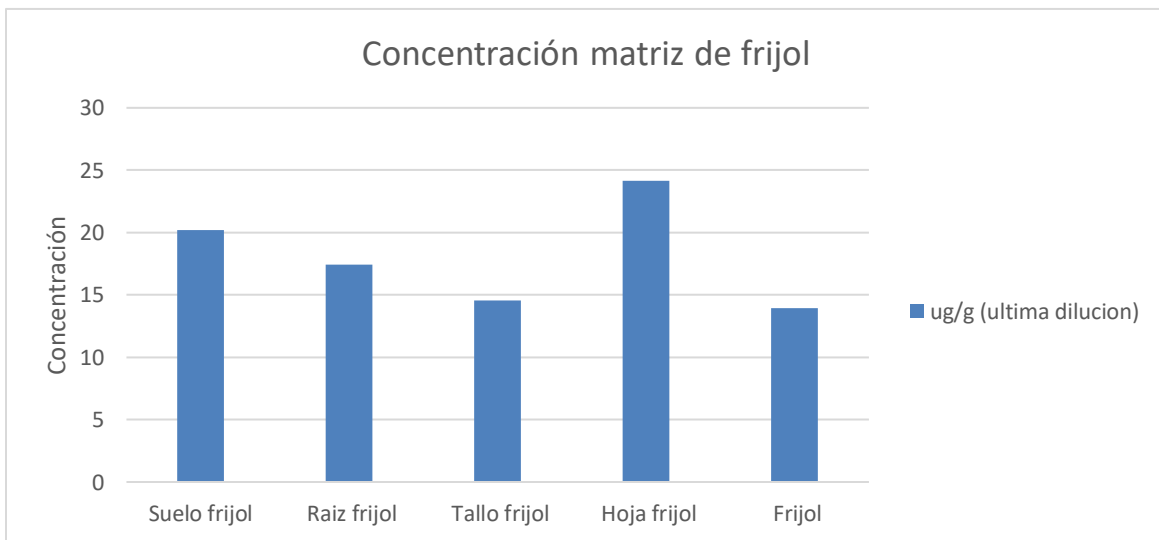


Gráfica 11: Concentración (ug/g) de una matriz de maíz por análisis de arsénico.

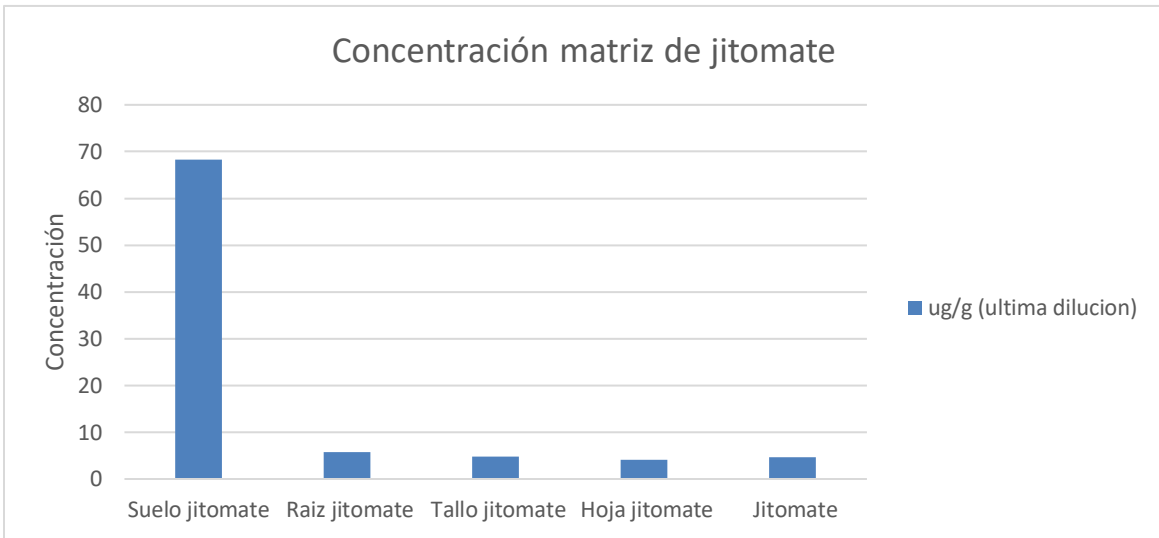


Gráfica 12: Concentración (ug/g) de una matriz de chile por análisis de arsénico.

Al igual que con lo que sucede para la matriz de maíz en el análisis de arsénico la matriz de frijol presenta una tendencia para almacenar este metal en las hojas de la matriz, mientras que la matriz de jitomate presenta una absorción del arsénico casi nulo, lo que indica que la raíz no absorbe el arsénico presente en el suelo.

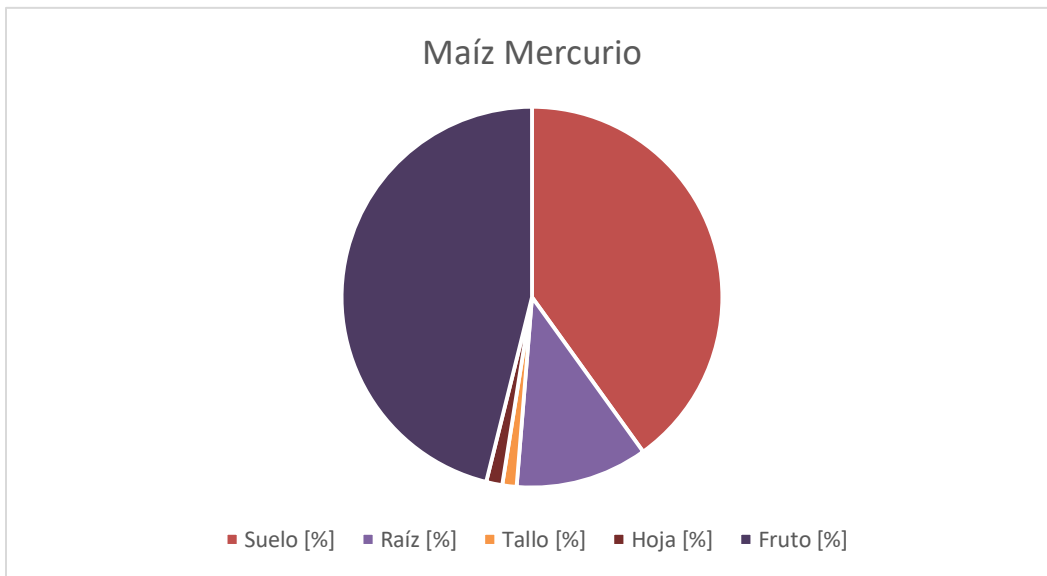


Gráfica 13: Concentración (ug/g) de una matriz de frijol por análisis de arsénico.



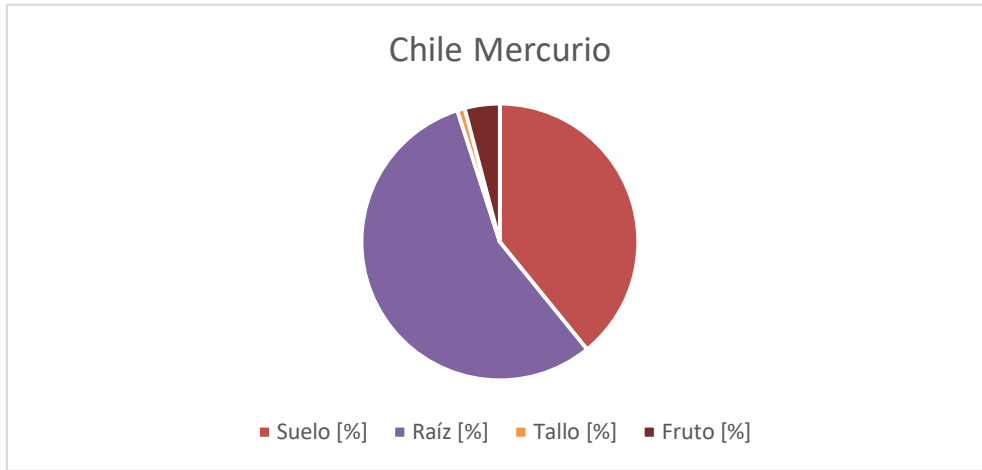
Gráfica 14: Concentración (ug/g) de una matriz de jitomate por análisis de arsénico.

- Gráficos de distribución de mercurio (%) en las matrices

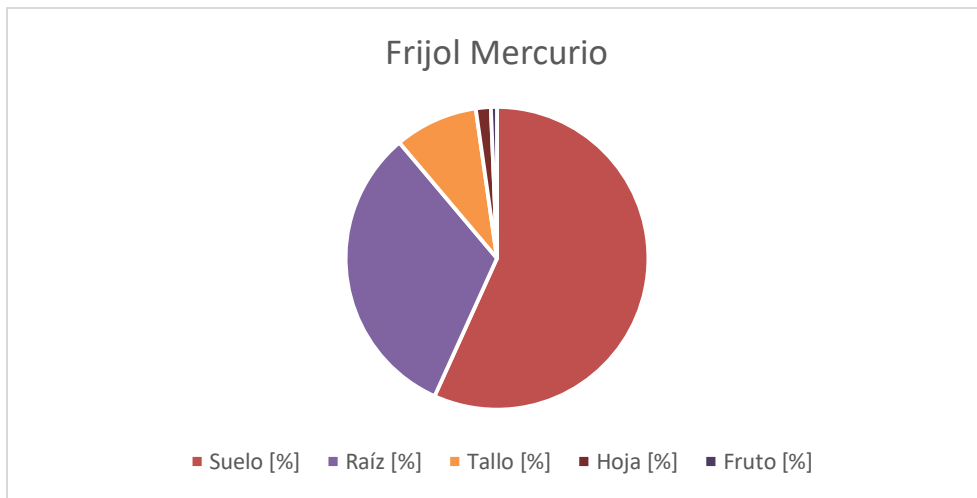


Gráfica 15: Porcentaje de distribución de los contaminantes de mercurio en la matriz de maíz.

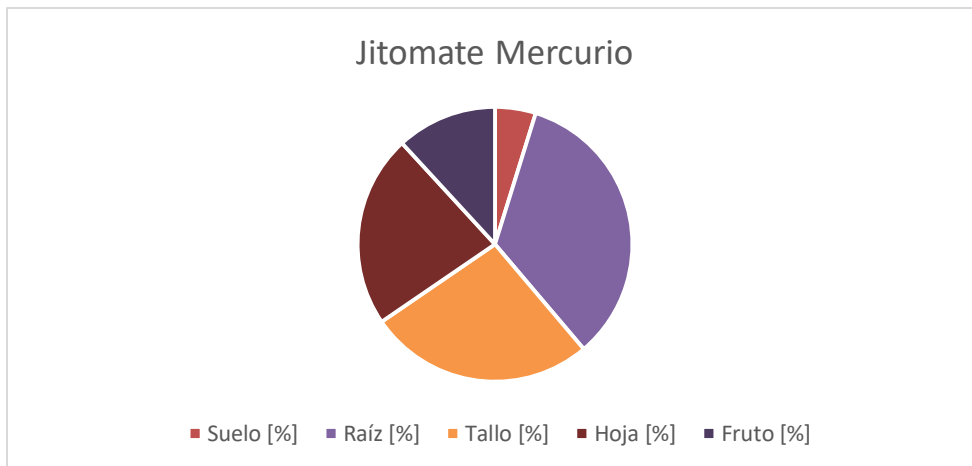




Gráfica 16: Porcentaje de distribución de los contaminantes de mercurio en la matriz de Chile.

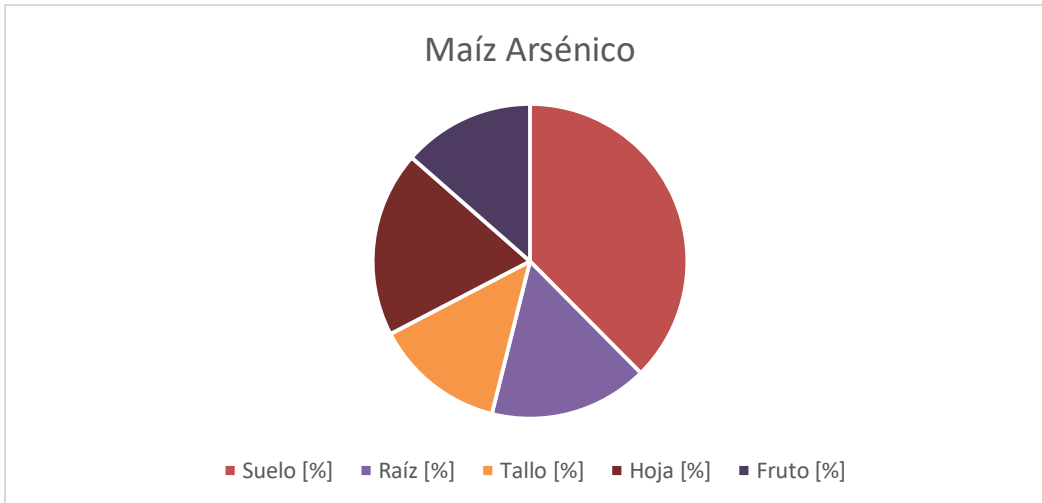


Gráfica 17: Porcentaje de distribución de los contaminantes de mercurio en la matriz de frijol.

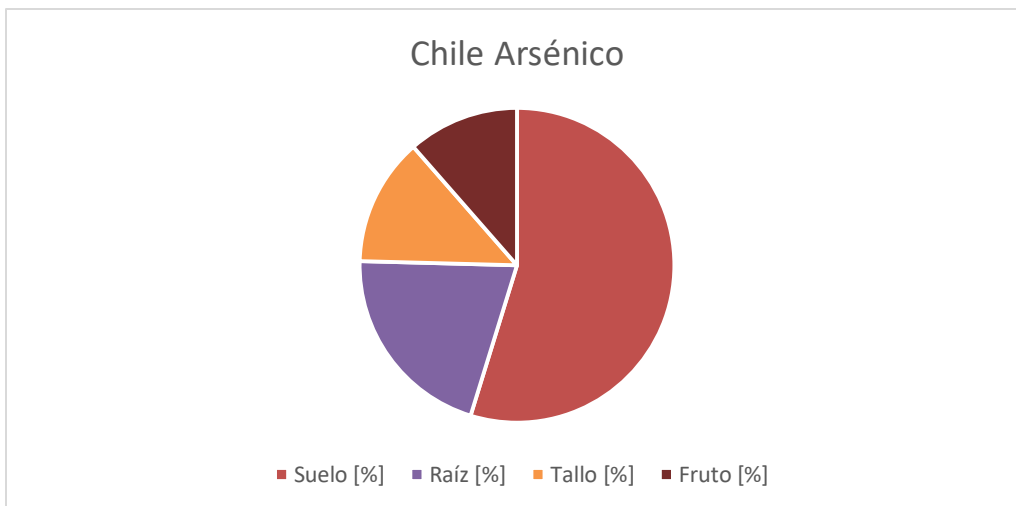


Gráfica 17: Porcentaje de distribución de los contaminantes en la matriz de jitomate.

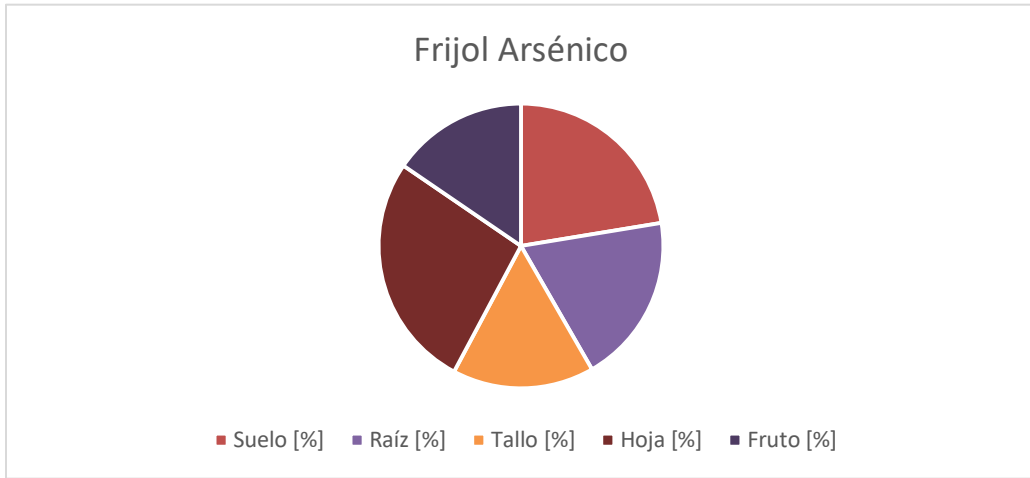
- Gráficos de distribución de arsénico (%) en las matrices



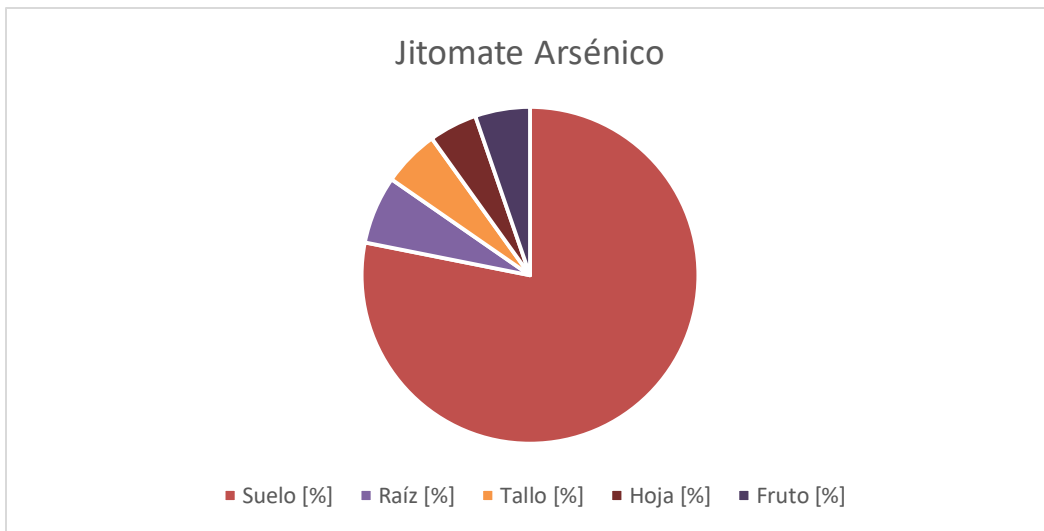
Gráfica 18: Porcentaje de distribución de los contaminantes de arsénico en la matriz de maíz.



Gráfica 19: Porcentaje de distribución de los contaminantes de arsénico en la matriz de Chile.



Gráfica 20: Porcentaje de distribución de los contaminantes de arsénico en la matriz de frijol.



Gráfica 21: Porcentaje de distribución de los contaminantes de arsénico en la matriz de jitomate.

## 5. Discusión de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se puede observar que tanto los valores de ingesta obtenidos, así como los valores de RAC dependen de las concentraciones de metal cuantificadas por espectrofotometría de absorción y de la cantidad de alimento, en este caso maíz, chile, frijol y jitomate, que sea consumido. Para la cantidad de alimento se obtuvieron valores de razón de contacto o ingesta para el consumo de maíz, chile, frijol y jitomate. Estos valores muestran el posible consumo promedio de un mexicano de las partes de la matriz ya mencionadas. Además, se obtuvieron valores de razón de ingesta o contacto para suelo o polvo, ya que tanto el suelo como los frutos pueden ser potencialmente ingeridos por humanos.

Cabe mencionar que los valores obtenidos de CR son promedios per cápita de lo que puede consumir un individuo de un cierto alimento o sustancia en un periodo de tiempo, además los valores obtenidos para ingesta solo representan una parte de la realidad, ya que estos fueron calculados con muestras de un centro de cultivo y por lo tanto solo representan el riesgo potencial de las hortalizas cultivadas ahí. También los valores de ingesta fueron calculados con los datos de CR que muestra la SAGARPA, como ya se dijo en el párrafo anterior estos son estimados de lo que puede consumir el mexicano promedio, de modo que si esta razón varía lo hará directamente proporcional la ingesta y por lo tanto el potencial riesgo a cáncer. Otras consideraciones importantes son el tiempo de consumo, como en este trabajo se analizaron alimentos que están incluidos en la dieta diaria del mexicano promedio se consideró que todo el año se estará consumiendo tanto maíz como chile, frijol y jitomate, también se consideró el peso promedio tanto para hombre como para mujer. Entonces si cambiara el peso promedio o el tiempo de consumo también se vería afectado de manera directa la ingesta, así como los valores de RAC

Otras consideraciones importantes que influyen en los resultados de riesgo potencial a cáncer son el tipo de matices estudiadas, es decir, el tipo de maíz que se cultivó, así como los distintos tipos de chile, frijol y jitomate que se estudiaron. También las condiciones del suelo como pH humedad cantidad de microorganismos, etc. Todos estos son factores que se deben de tener en cuenta ya que pueden influir en los resultados del estudio.

Para el análisis realizado para mercurio se consideraron distintos factores (RfD) tanto para metilmercurio, cloruro de mercurio y mercurio elemental, ya que no se conoce que compuestos se encuentran originalmente en las matrices estudiadas, es por ello que se consideraron estos tres compuestos para poder abarcar todas las posibles moléculas que las matrices pudieran contener.

Por lo expuesto anteriormente se puede afirmar que los valores obtenidos de RAC pueden representar un potencial riesgo a cáncer con las condiciones mencionadas anteriormente. De la misma forma se puede asegurar que el RAC será mayor en mujeres que en hombres solo si se cumple el peso promedio.

Para el cálculo de la razón de ingesta para las matrices de maíz, chile, jitomate y frijol en el análisis de mercurio y arsénico tanto para la cantidad ingerida por hombres como en mujeres, al observar las tablas se encuentra que las razones de ingesta para todas las matrices son más altas en las mujeres que en los hombres, esto nos indica que las mujeres tienen más posibilidades de riesgo a cáncer por la ingesta de hortalizas contaminadas por mercurio y arsénico que los hombres.

Analizando las tablas de cálculo del riesgo a cáncer para hombres y comparándolas con las tablas de cálculo del riesgo a cáncer para mujeres, se puede observar que para los frutos de maíz, chile, jitomate y frijol los valores del riesgo a cáncer para todos los posibles compuestos de mercurio considerados (metilmercurio, mercurio elemental,  $HgCl_2$ ) son potencialmente más altos en las mujeres que en los hombres, de igual forma ocurre con los resultados de arsénico.

El que tanto la ingesta como el RAC sean mayores en mujeres que en hombres es debido a que existe una diferencia en el peso promedio entre hombres y mujeres. Para poder una relación más clara entre el peso del individuo y el potencial riesgo a cáncer que existe por ingesta de alimentos contaminados con metales se deben realizar investigaciones a profundidad sobre el tema, pues en este trabajo no se estudian este tipo de relaciones. En el caso de la concentración final para el fruto de la matriz de maíz se obtuvieron resultados normales, es por esta razón que tanto los valores de la ingesta como los de RAC corresponden a lo esperado dado el CR propuesto por la SAGARPA.

## 6. Recomendaciones

Algunas de las recomendaciones que se pueden hacer para evitar un posible riesgo a cáncer son ingerir una menor cantidad de maíz o de alimentos que contengan maíz como tortillas, ya que este es el que presenta la mayor ingesta por año por parte del mexicano promedio. En general es una buena recomendación llevar una dieta más variada lo que reduciría la ingesta de alimentos contaminados y por lo tanto el riesgo a cáncer.

Otra recomendación en lo que concierne a los resultados es una reducción en el tiempo de consumo de alimentos, es decir, no consumir todos los días maíz, chile, frijol y jitomate, ya que con ello se puede reducir un potencial riesgo a cáncer.

Algunas recomendaciones para mejorar el estudio realizado pueden ser el considerar analizar distintas variedades de maíz, chile frijol y jitomate además considerar analizar cultivos de una misma especie, pero con distintas condiciones de pH y humedad.

También se debe de tener en cuenta que el agua de riego empleada para el cultivo de las matrices propuestas para este estudio provenía de una planta cuyas actividades principales son los procesos mineros. Es por esta razón que el agua fue tratada para poder emplearse en el cultivo de las muestras previamente estudiadas, pero no se descarta la posibilidad de que las concentraciones obtenidas hayan sido afectadas por las concentraciones de metales pesados presentes en el agua de riego. Por lo anterior descrito se debe de tener en cuenta la calidad del agua que se emplea para cultivar las distintas hortalizas, ya que esta afectara directamente a la calidad de los alimentos y por lo tanto puede presentar un posible riesgo a la salud.

## 7. Conclusiones

En este trabajo se logró cuantificar mercurio y arsénico en las matrices propuestas (maíz, chile, frijol y jitomate). Con los resultados de concentración final para suelo y los frutos de las matrices se calcularon los resultados de ingesta y finalmente con los factores de RfD y la ingesta se obtuvieron valores de riesgo a cáncer (RAC) encontrando que para todos los frutos y para el suelo de la matriz de frijol se presenta un potencial riesgo a cáncer por consumo de estas partes de las distintas matrices, además se observó valores más altos de RAC en mujeres que en hombres causados por la diferencia en el peso promedio entre hombres y mujeres.

También analizando la ecuación propuesta para determinar la ingesta se puede observar que al aumentar la concentración del contaminante a analizar aumentará de manera proporcional la ingesta. Además, la razón ingesta se encuentra relacionada de manera proporcional con otra variable, el valor de la razón de contacto/ingesta (CR), por lo que al aumentar este valor de la misma manera que con la concentración aumentara la ingesta, lo cual aumenta a su vez el riesgo a cáncer, con esto se corroboraría la primera hipótesis.

Además, se encontró que para ambos casos (mercurio y arsénico) el riesgo a cáncer era mucho mayor para mujeres que para hombres. Si analizamos la fórmula empleada para el cálculo del RAC se observa que la única variable que modifica los resultados expuestos es el peso promedio entre mujeres y hombres encontrando así una relación entre el riesgo que existe por la ingesta de alimentos contaminados por metales y el peso del individuo.

Lo anterior mencionado confirmaría la segunda hipótesis planteada al inicio de este trabajo estableciendo que el valor del RAC para mujeres es mayor que para hombres.

Por lo expuesto en los resultados anteriores se relacionó la concentración de dos tipos de metales en plantas y vegetales con el riesgo a cáncer que la ingesta de este tipo de cultivo puede presentar. Encontrando que existe un riesgo a cáncer al consumir maíz, chile, jitomate y frijol, esto es debido a la concentración de mercurio y arsénico reportada en los resultados, además de los valores de CR encontrados. Los valores de

RAC son cantidades altas lo cual es un indicio de que la concentración de estos metales en las platas analizadas era también alta o que la ingesta diaria de estos es alta.

Otro aspecto a considerar son los límites máximos por ingesta establecidos por la OMS. Si analizamos las razones de ingesta obtenidos tanto para hombre como para mujer en la cuantificación de mercurio y arsénico y los comparamos con la ingesta permitida de 1.6  $\mu\text{g}/\text{kg}$  día (mercurio) y 20-3006  $\mu\text{g}/\text{kg}$  día (arsénico) se observa que para todos los frutos contaminados por mercurio la ingesta en microgramos se encuentra cerca o sobrepasan el límite de 1.6 y para arsénico solamente en el caso del fruto de maíz es que se superan los veinte microgramos.

Si analizamos la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 la cual establece la concentración máxima permitida en suelos para distintos metales tanto para suelos a los que se les da de uso industrial como agrícola/comercial se puede observar que solamente en el caso del suelo de la matriz de maíz para arsénico y de la matriz de jitomate para mercurio es en donde se encuentran valores más bajos que lo que establece la norma para uso agrícola en todos los demás datos obtenidos los valores son superiores o se encuentran muy cerca de la norma.

Esto se puede explicar por una parte por la concentración de mercurio y arsénico presente en el suelo o por los valores de CR los cuales incrementan el contacto con los metales pesados analizados de manera indirecta, ya que a mayor CR existirá una mayor ingesta de maíz, chile, frijol y jitomate, también por la distribución de los metales pesados en las distintas matrices y por lo establecido en el marco teórico en donde los contaminantes que están presentes en el suelo pueden ser encapsulados por los propios compuestos del suelo o por microorganismos que en él habitan, teniendo entonces que las raíces de la planta pueden absorber solo una fracción de los contaminantes o pueden absorber una cantidad mucho mayor (dependiendo de la cantidad de microorganismos y compuestos que puedan encapsular a los contaminantes). De esta manera se puede explicar que algunas de las matrices para el análisis de mercurio y arsénico para ellas exista una concentración mucho mayor en el suelo y que esta sea descendiente para las raíces, tallo, etc.

También dentro de estas matrices se pueden observar otros perfiles en la distribución del mercurio y arsénico. En la matriz de frijol para el análisis de arsénico la



concentración de la hoja presenta un incremento con respecto a la raíz, tallo y fruto. Otro ejemplo son las matrices de maíz y de chile para el análisis de mercurio, en donde la matriz de maíz acumula una mayor concentración de metal en el fruto comparado con el tallo, raíz o la hoja y la matriz de chile acumula la mayor cantidad en la raíz.

En la matriz de jitomate se puede observar que la raíz absorbe la mayor parte de los contaminantes del suelo para que posteriormente desde la parte de la raíz hasta el fruto se tenga una distribución descendiente de los contaminantes, de la misma forma que ocurre en la matriz de frijol en la que se presenta una distribución totalmente decreciente de los contaminantes para el análisis de mercurio.

Para el análisis de arsénico los valores de ingesta superan para el fruto de la matriz de maíz lo establecido por la OMS. Esto se debe a que el valor de CR de maíz es muy alto, es por esta razón que se obtuvieron valores de RAC que representen un riesgo a la salud.

Para la distribución de la concentración de arsénico en maíz, chile, frijol y jitomate se observa en las gráficas que en las muestras de hoja de frijol y de maíz el arsénico tiene una tendencia a acumularse aquí. En el caso de la matriz de jitomate se observa que la raíz de la planta absorbe muy poco el arsénico presente en el suelo.

Esto indica que estas dos (maíz y frijol) plantas tienden a almacenar los contaminantes como el arsénico en las hojas evitando así que lleguen al fruto.

## 8. Apéndice

### 8.1. Diluciones realizadas a los resultados de mercurio y arsénico.

En estas tablas se muestran las diluciones realizadas a las concentraciones de mercurio obtenidas a partir del análisis con el espectro de absorción atómica con generador de hidruros. Para cada sistema se realizaron distintas diluciones con el fin de poder ajustar los valores a la curva de calibración del equipo. Finalmente se obtuvo la concentración de las muestras en ug/g, la cual es la que se emplea en el cálculo de la ingesta.

Tabla 16: Diluciones de los resultados obtenidos de mercurio de las muestras de maíz. (\* En el dato de la concentración final del fruto de maíz se presenta un valor más elevado que incluso la concentración de suelo, es por eso que se debe de observar con detenimiento este dato)

Muestra	Concentración 1/10	Concentración 1/25	Concentración 5/50	ug/g dilución (0.025L/0.5g)
Suelo maíz	107.9		1079.5	53.93
Raíz maíz	30.25		302.5	15.092
Tallo maíz			32.74	1.634
Hoja maíz			36.76	1.837
Maíz		126.5	1265.1	*62.076

Tabla 17: Diluciones de los resultados obtenidos de mercurio las muestras de chile.

Muestra	Concentración 1/10	Concentración 5/50	ug/g dilución (0.025L/0.5g)
Suelo Chile	44.56	445.6	22.28
Raíz Chile	33.04	330.4	31.79
Tallo Chile		8.562	0.5005
Chile		47.39	2.336

Tabla 18: Diluciones de los resultados obtenidos de mercurio de las muestras de frijol.

Muestra	Concentración 1/10	Concentración 1/25	Concentración 5/50	ug/g dilución (0.025L/0.5g)
Suelo Frijol	10.78	269.6	2696	133.9
Raíz Frijol	60.17		601.7	75.67
Tallo Frijol	38.61		386.1	21.0063
Hoja Frijol			37.57	3.777
Frijol			30.93	1.532

Tabla 19: Diluciones de los resultados obtenidos de mercurio de las muestras de jitomate.

Muestra	Concentración 5/50	ug/g dilución (0.025L/0.5g)
Suelo Jitomate	15.03	0.7464
Raíz Jitomate	108.6	5.289
Tallo Jitomate	83.57	4.143
Hoja Jitomate	70.92	3.532
Jitomate	37.69	1.840

De la misma manera que con los resultados de mercurio se realizaron una serie de diluciones a las muestras de arsénico, esto con el fin de ajustarlas a la curva de calibración del espectro de absorción atómica con horno de grafito. Para poder obtener la concentración real de las muestras originales se eliminó las diluciones mencionadas previamente obteniendo un resultado en  $\mu\text{g/g}$ .

Tabla 20: Diluciones de los resultados obtenidos de las muestras de maíz para la determinación de arsénico.

MUESTRA	DILUCIÓN INTERNA	DILUCIÓN EXTERNA	CONC. X DILUCIÓN [ $\mu\text{g/L}$ ]	Aforo [L]	Peso [g]	Conc. [ $\mu\text{g/g}$ ]
Suelo maíz	2	10	213.7	0.025	0.5004	10.67
Hoja maíz	10	1	92.78	0.025	0.5	4.639
Tallo maíz	10	1	76.6	0.025	0.501	3.822
Raíz maíz	10	1	108.7	0.025	0.501	5.424
Maíz	10	1	78.31	0.025	0.509	3.846

Tabla 21: Diluciones de los resultados obtenidos de las muestras de chile para la determinación de arsénico.

MUESTRA	DILUCIÓN INTERNA	DILUCIÓN EXTERNA	CONC. X DILUCIÓN [ $\mu\text{g/L}$ ]	Aforo [L]	Peso [g]	Conc. [ $\mu\text{g/g}$ ]
Suelo chile	4	10	418.6	0.025	0.5	20.93
Raíz chile	10	1	81.79	0.025	0.259	7.894
Tallo chile	10	1	85.75	0.025	0.427	5.020
Chile	10	1	88.69	0.025	0.507	4.373

Tabla 22: Diluciones de los resultados obtenidos de las muestras de frijol para la determinación de arsénico.

MUESTRA	DILUCIÓN INTERNA	DILUCIÓN EXTERNA	CONC. X DILUCIÓN [µg/L]	Aforo [L]	Peso [g]	Conc. [µg/g]
Suelo frijol	2	10	406.9	0.025	0.503	20.22
Raíz frijol	10	1	137.8	0.025	0.198	17.40
Tallo frijol	20	1	290.6	0.025	0.5	14.53
Hoja frijol	20	1	239.5	0.025	0.248	24.14
Frijol	20	1	281.2	0.025	0.504	13.95

Tabla 23: Diluciones de los resultados obtenidos de las muestras de jitomate para la determinación de arsénico.

MUESTRA	DILUCIÓN INTERNA	DILUCIÓN EXTERNA	CONC. X DILUCIÓN [µg/L]	Aforo [L]	Peso [g]	Conc. [µg/g]
Suelo jitomate	10	10	1373.7	0.025	0.503	68.27
Raíz jitomate	10	1	116.9	0.025	0.513	5.698
Hoja jitomate	10	1	95.44	0.025	0.501	4.762
Tallo jitomate	10	1	81.69	0.025	0.504	4.052
Jitomate	10	1	94.11	0.025	0.511	4.604

## 8.2. Razones de ingesta para mercurio y arsénico.

En estas tablas se muestra el cálculo de la razón de ingesta tanto para mercurio como para arsénico. Tanto la formula como el ejemplo de cálculo se muestran en la parte del método de análisis de riesgo a cáncer. Esta razón de ingesta será empleada para el cálculo del RAC. (ver sección de resultados)

Tabla 24: razones de ingesta para la matriz de maíz.

Muestra	Maíz			
	Mercurio		Arsénico	
Sexo	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Ingesta suelo (mg/kg*día)	7.21E-05	7.85E-05	1.42E-05	1.55E-05
Ingesta fruto (mg/kg*día)	4.47E-01	4.86E-01	2.77E-02	3.01E-02

Tabla 25: razones de ingesta para la matriz de chile.

Muestra	Chile			
Metal	Mercurio		Arsénico	
Sexo	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Ingesta suelo (mg/kg*día)	2.98E-05	3.24E-05	2.80E-05	3.05E-05
Ingesta fruto (mg/kg*día)	1.34E-03	1.46E-03	2.51E-03	2.74E-03

Tabla 26: razones de ingesta para la matriz de frijol.

Muestra	Frijol			
Metal	Mercurio		Arsénico	
Sexo	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Ingesta suelo (mg/kg*día)	1.79E-04	1.95E-04	2.70E-05	2.94E-05
Ingesta fruto (mg/kg*día)	6.06E-04	6.60E-04	5.52E-03	6.01E-03

Tabla 27: razones de ingesta para la matriz de jitomate.

Muestra	Jitomate			
Metal	Mercurio		Arsénico	
Sexo	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Ingesta suelo (mg/kg*día)	9.98E-07	1.09E-06	9.13E-05	9.94E-05
Ingesta fruto (mg/kg*día)	1.01E-03	1.10E-03	2.53E-03	2.75E-03

En esta tabla se muestran los valores obtenidos por la SAGARPA de razón de consumo en kg/día, así como la conversión empleada en este trabajo.

Tabla 28: Valores de CR para maíz, chile, frijol y jitomate

	kg/año	g/año	g/día	mg/día
Frijol	10.8	10800	29.589041	29589
Chile	15.7	15700	43.013699	43014
Jitomate	15	15000	41.09589	41096
Maiz	196.4	196400	538.08219	538082

Para la obtención del RAC de los frutos y suelos de las matrices con respecto al análisis de mercurio se empleó el siguiente factor de correlación, con el fin de que el metal que se analiza correspondiera a metil mercurio, cloruro de mercurio y mercurio elemental en su totalidad.

$$\frac{\text{Metil - Mercurio}}{\text{Mercurio}} = \frac{215 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{200 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 1.075 \quad \frac{\text{HgCl}_2}{\text{Mercurio}} = \frac{271 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{200 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 1.355$$

$$\text{RAC} = \frac{\left(0.000072 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} * \text{día}\right) * (1.075)}{0.0001} = 0.775$$

## 9. Bibliografía

ADRIANO, D.C. (1986) Mercury. Trace elements in the territorial environments. 2nd Edition. Springer. New York, EEUU, p.p 411-458

BAYER, A.J.M. (1981) Accumulators and excluders: Strategies in the reponse of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* 3 (1-4): 643-654.

BLOOM, N.S., PREUS, E., KATON, J. Y HILTHER, M. (2003) Selective extraction to asses the biochemically relevant fractionation of inorganic mercury in sediments and soils. *Analítica Chemical Acta* 479 (2): 233-248.

CABRERO, J.I. (2005) Estudio de la dinámica de adsorción y tolerancia al mercurio de plantas de altramuz. Proyecto fin de carrera C.C Ambientales (2004-2005). Tutor técnico:  
R. Millán. Dpto. Medio ambiente. Grupo de conservación y recuperación de suelos.

CONSTANTINO, E., GERATH, M., MIT CHELL, D., SEIGNEUR, C. Y LEVIN L. (1995) Mercury from power plants: a probabilistic approach to the evaluation of potential health risks. *Water, Air and Soil Pollution* 80: 1129-1138.

ESTEBAN, E. (2008) Transferencia suelo-planta de los metales pesados. Dpto. de Química Agrícola. Universidad Autónoma de Madrid. En *Contaminación de suelos, tecnologías para la recuperación. Serie de ponencias.* (Eds. Rocío Millán y Carmen Lobo) CIEMAT.

Norma oficial mexicana nom-127-ssa1-1994, "salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Norma oficial mexicana nom-127-ssa1-1994. Diario oficial de la federación, 16 de diciembre de 1999.

United States Environmental Protection Agency (EPA):

<https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/search/index.cfm?keyword=mercury>

I. López Tejedor; M. J. Sierra; J. Rodríguez; R. Millán. (2010). Estudio del Comportamiento y Distribución del Mercurio Presente en Muestras de Suelo Recogidas en la Ribera del Río Valdeazogues. 2018, de Informes Técnicos Ciemat Sitio web: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/41/133/41133384.pdf>

Xavier Gaona Martínez. (2004). El mercurio como contaminante global Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente . 2018, de Universitat Autònoma de Barcelona Sitio web: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3174/xgm1de1.pdf>

Ing. Héctor Deras Flores. (2010). Guía Técnica: El cultivo de maíz. 2018, de Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura en El Salvador Sitio web: <http://repiica.iica.int/docs/b3469e/b3469e.pdf>

Grecia Carolina García Niño. (2010). Determinación de mercurio por generación de vapor frío y detección vía absorción y fluorescencia atómica . 2018, de Universidad Simón Bolívar Sitio web: <http://159.90.80.55/tesis/000149413.pdf>

Claudio González Pérez . (NA). Espectrofotometría de absorción atómica . 2018, de Universidad de Salamanca Sitio web: [http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/analisis-aplicado-a-la-ingenieria-quimica/contenidos/course\\_files/Tema\\_5.pdf](http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/analisis-aplicado-a-la-ingenieria-quimica/contenidos/course_files/Tema_5.pdf)

Pablo Rivera Machado y Juan Sebastián Valencia Herrera. (2013). validación de la metodología para el análisis de mercurio en agua tratada y cruda, y estandarización del análisis de mercurio en pescados por el método de absorción atómica vapor frío para el laboratorio de análisis de aguas y alimentos de la universidad tecnológica de Pereira. 2018, de universidad tecnológica de PEREIRA Sitio web: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3659/5430858R621.pdf>



Jacqueline Moya; Linda Phillips; Laurie Schuda; et al. (2011). Exposure Factors Handbook . 2018, de U.S. Environmental Protection Agency Sitio web: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/techoverview\\_ehf-complete.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/techoverview_ehf-complete.pdf)

Nazaroff, W. W., & Alvarez-Cohen, L. (2001). Environmental engineering science. New York: Wiley: 570-574.

James R. Mihelcic, Julie B. Zimmerman. (2014). Environmental Engineering: Fundamentals, Sustainability, Design,. U.S.A: wiley: 244

Smedley PL, Kinniburgh DG (2002) A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. Appl Geochem,517–568

Mandal, B.K.; Suzuki, K.T. Arsenic round the world: a review. Talanta 2002, 201-235.

Garcia Salgado Sara, Quijano Nieto M. Angeles (2013). Estudios de especiación de arsénico y acumulación de metales en muestras de interés medioambiental (Tesis doctoral). Universidad politécnica de Madrid.

Gaona, X. 2005. El mercurio como contaminante global: Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente. Tesis para obtener el grado de Doctor, Universidad Autónoma de Barcelona, Departamento de Química, Unidad de Química Analítica

Facultad de medicina de Buenos Aires (2007). Proyecto BANHG, mercurio: cartilla de información Sitio web: <http://www.fmed.uba.ar/depto/toxico1/mercurio.pdf>

(Betty N. Wu, Anthony J. O'Sullivan. (2011). Sex Differences in Energy Metabolism Need to Be Consideredwith Lifestyle Modifications in Humans. 2019, de Journal of nutrition and metabolism)