

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

RESPUESTAS FISIOLÓGICAS DEL MELÓN (*CUCUMIS MELO L.*) A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ARSÉNICO EN LA COMARCA LAGUNERA, MÉXICO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES

Y MEDIO AMBIENTÉ EN ZONAS ÁRIDAS

PRESENTA:

MARIA DEL ROSARIO JACOBO SALCEDO

BERMEJILLO, DURANGO, MÉXICO MAYO 2013



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

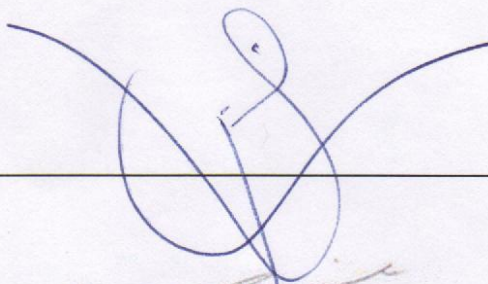


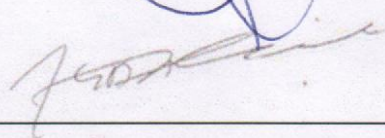
La presente tesis de Maestría titulada **“RESPUESTAS FISIOLÓGICAS DEL MELÓN (*Cucumis melo* L.) A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ARSENICO EN LA COMARCA LAGUNERA, MEXICO”** fue realizada por la Q.F.B. Maria del Rosario Jacobo Salcedo con la dirección del **Dr. Ricardo Trejo Calzada**, ha sido revisada y aprobada por el Comité Asesor como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

COMITÉ ASESOR

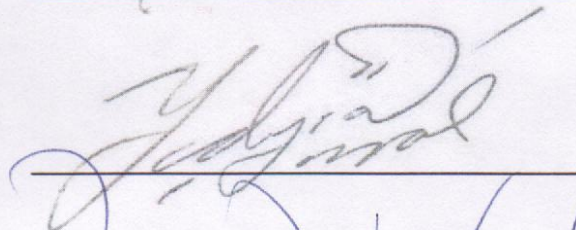
DIRECTOR: PhD. RICARDO TREJO CALZADA





ASESOR: PhD. PAg. CAC ABIMBOLA ABIOLA

ASESOR: PhD. ALBA YADIRA CORRAL AVITIA



ASESOR: PhD. RICARDO DAVID VALDEZ CEPEDA



Dedicatoria

*Este trabajo al igual que mi maestría se la debo a **Dios** que su guía y amor me permitió salir adelante y no desistir en esos momentos difíciles del camino.*

A mis padres:

Señores míos, jamás haré suficiente para agradecerles todo lo que han hecho por mí, por su apoyo y su gran amor. Saben que esto es uno de mis sueños y que en el camino para obtenerlo hubo momentos difíciles para todos, solo quiero decirles que en mi lucha ustedes son mi motivación y mi aliento para salir adelante. Sr. José Rosario Jacobo Hernández y Sra. Julia Salcedo Campos, en mi corazón no existe más que gratitud hacia ustedes, sé que hay ciclos en la vida pero no importa cuántos pasen yo siempre seré su hija ñoña que los ama y le pide infinitamente a Dios por ustedes.

Mis Hermanos:

Julio, Anahí y Norma ya todos unos jóvenes luchadores de la vida, los quiero mucho y sepan que su apoyo en los buenos momentos fue vital para mí y le pido a Dios que les ilumine el camino y les haga ver que se puede ser muy feliz.

*A **Luis Ángel González Espíndola**, qué decirle señor si hemos compartido el camino las victorias y las caídas. Las cosas son lo que son verdad amor, y pues qué es lo que sigue... pues lo que sigue. Te AMO gracias por coincidir.*

*A mis amigas, señoritas **María, Lupita, Mali y Laura** gracias por su apoyo y ayuda por escucharme y no dejarme caer. GRACIAS!!!!*

Agradecimientos

*A mi Director de Tesis **Dr. Ricardo Trejo Calzada**; doctor además del profundo respeto y admiración, le agradezco su apoyo incondicional.*

***Dra. Alba Yadira Corral**; doctora mis más profundos agradecimientos por su apoyo y la confianza que depositó en mí al hospedarme en su hogar y permitirme ser parte de su grupo de trabajo.*

***Dr. Abimbola Abiola**; I really want to tell you thanks for all your attentions and for let me know the amazing things that Canada owns and for gave me the opportunity of working with your people.*

A todos y cada uno de mis maestros que en conjunto constituyeron una valiosa parte de mi formación académica.

*A **Margarita**; señorita su apoyo y su amistad una parte vital de este posgrado. Gracias!*

RESPUESTAS FISIOLÓGICAS DEL MELÓN (*CUCUMIS MELO* L.) A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ARSENICO EN LA COMARCA LAGUNERA, MEXICO.

¹ Maria del Rosario Jacobo Salcedo

²Ricardo Trejo Calzada

RESUMEN

El arsenicismo es un problema ampliamente extendido en México incluyendo a cerca del 40% del territorio nacional y el 25% de la población. En varios estados se reportan zonas críticas, por sus concentraciones de As en suelo y agua, así como su posible acumulación en plantas de consumo humano. Sin embargo, poca atención se ha puesto en la presencia de As en el agua de uso agrícola y su posible acumulación en el suelo y potencialmente en plantas de melón. En este estudio se exploró las concentraciones de As en suelo, planta de melón y agua con el objetivo de conocer la distribución de este metal, además la evaluación de indicadores de crecimiento aunado a la cuantificación de peroxidasas y catalasas indicadores del estrés oxidativo de la planta. Se obtuvieron muestras de la comunidad de Congregación, San Pedro, Tlahualilo, Ceballos y Raymundo. La cuantificación de As se realizó mediante ICP. El 100% de las muestras de suelo presentaron concentraciones por encima de los valores de la norma. Ceballos y Congregación son las localidades con mayores concentraciones de As tanto en suelo, agua y planta (raíz, tallo y hojas). Se observó un alto índice de correlación de Pearson (0.95) entre As en el agua y suelo ($P \leq 0.05$) Las enzimas se incrementan conforme aumenta la disponibilidad de As en el medio. Las plantas que poseen una concentración de 20 µg/L tuvieron mayor crecimiento que el control.

Palabras Clave: Arsenicismo, *Cucumis melo*, suelo, agua, enzimas e indicadores de crecimiento.

PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF MELON (*CUCUMIS MELO* L.) TO DIFFERENT ARSENIC CONCENTRATIONS IN THE COMARCA LAGUNERA, MEXICO.

¹ Maria del Rosario Jacobo Salcedo

²Ricardo Trejo Calzada

ABSTRACT

Arsenicism is a hard problem in a huge part of Mexico, in the 40% of Mexican land and in the 25% of its people. In some states, it has been reported as a critical zone due to the arsenic concentration in water and soil; also, its possible accumulation in plants used for human consumption. However, little attention has been established in As in water for agriculture use and its possible accumulation in the soil and potentially in plants of melon. In this investigation, it was explored the concentration of As in soil, melon plants and water with the objective of knowing the distribution of the metal; besides, the evaluation of indicators of growing joined with the quantification of catalase and peroxidase which indicate oxidative stress in plants. The samples were collected from the communities of Congregacion, San Pedro, Tlahulilo, Ceballos y Raymundo. The As quantification was done using ICP. The 100% of the samples of soil had concentrations over the regulations. Ceballos and Congregacion were the communities with higher concentrations of As in soil, water and plant (leaves, stem and root). It was observed a high Pearson correlation index (0.95) between As in water and soil ($P \leq 0.05$) The enzymes were incremented at the same way as As availability. Plants that had a concentration of 20 µg/L had a better growing than the control treatment.

Key words: Arsenicism, *Cucumis melo*, soil, water, enzymes and growing indicators

¹Tesista

²Director de tesis

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	v
Indice de Cuadros	iv
Indice de Figuras	v
I. Introducción	1
II. Objetivo General	5
2.1 Objetivos Específicos	5
III. Hipótesis	6
IV. Revisión de literatura	7
4.1 Desarrollo sustentable y contaminación	7
4.2 Arsénico	9
4.2.1 Generalidades	9
4.2.2 Disponibilidad del Arsénico en el medio ambiente	9
4.2.3 Formas químicas del Arsénico	10
4.2.4 Distribución de Arsénico en el suelo	11
4.2.5 Química del suelo	12
4.2.6 El arsénico en las plantas	13
4.2.7 Fitotoxicidad	13
4.2.8 Traslocación	15
4.2.9 Mecanismo de resistencia a metales pesados	16
4.2.10 Rutas de Oxidación	17
4.2.11 Toxicidad en plantas por Metales pesados	19
4.2.12 Efectos en la salud bajo la exposición a As	20
4.2.13 Situación del arsenicismo en el Mundo	21
4.2.14 Situación del arsenicismo en México	24

4.2.15	Arsenicismo en la Comarca Lagunera	26
4.3	Comarca Lagunera	27
4.4	Melón	28
4.4.1	Origen	28
4.4.2	Clasificación científica	28
4.4.3	Taxonomía y morfología	28
4.4.4	Condiciones de Cultivo	30
4.4.5	Variedades de Melón	30
4.4.6	Producción de melón a nivel Mundial	31
4.4.7	Producción de melón en México	32
4.5	Normatividades importantes en cuanto a metales pesados	32
V.	Materiales y Métodos	34
5.1	Selección de las localidades	34
5.2	Diseño estadístico	35
5.3	Tipo de muestras	35
5.4	Preparación de muestras	35
5.5	Digestión por parrilla para cuantificación de As en Suelo	36
5.6	Determinación de arsénico en agua de riego	37
5.7	Determinación de arsénico en fruto, semillas, corteza, hojas, tallo, flor y raíz mediante digestión por vía seca	38
5.8	Cuantificación	38
5.9	Evaluación in vitro de absorción de arsénico en plantas de Melón (<i>Cucumis melo</i>)	40
5.10	Evaluación de actividad fotosintética	41
5.11	Cuantificación de actividad de peroxidasas	41
5.11.1	Preparación del Extracto Enzimático	41
5.11.2	Determinación de la actividad de peroxidasa (PO)	41
5.12	Determinación de la actividad de catalasa (CA)	42
5.13	Área Foliar	42
5.14	Peso seco	43

VI.	Resultados y Discusión	44
6.1.1	Arsénico en Suelo	46
6.1.2	Arsénico en Agua	47
6.2	Concentración de As en los diferentes órganos de la planta de Melón (<i>Cucumis melo</i>). 50	
6.2.1	Arsénico en vegetales	50
6.3	Índice de Bioacumulación	59
6.4	Índice de Traslocación	59
6.5	Actividad de Peroxidasas	62
6.6	Actividad de Catalasas	63
6.7	Actividad Fotosintética, Conductancia estomática e Índice de Clorofila	64
6.8	Indicadores de Crecimiento	65
6.9	Peso seco	66
VII.	Conclusiones	67
VIII.	Bibliografía	68

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Nombre y formula química de los compuestos derivados del arsénico.	11
Cuadro 2. Normas y regulaciones	33
Cuadro 3. Ubicación de localidades evaluadas.....	34
Cuadro 4. Fuente de agua de muestreo.....	35
Cuadro 5. Condiciones de programa de espectro de absorción atómica.....	39
Cuadro 6. Concentraciones de As en agua y suelo letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD , $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.....	44
Cuadro 7. Valores de medias, desviación estándar y varianza de las concentraciones de arsénico (mg kg^{-1}) en agua, suelo y órganos de melón.	49
Cuadro 8. Concentraciones de as en los diferentes órganos de <i>Cucumis melo</i> así como las letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.....	50
Cuadro 9. Índice de bioacumulación es la planta (realizando la suma de todos los órganos evaluados) contrastada con el suelo.	59
Cuadro 10. Índice de traslocación.	60
Cuadro 11. Correlación de Pearson. Correlaciones entre concentraciones de as y las partes de la planta. **. La correlación es significativa al nivel 0,01. *. La correlación es significativa al nivel 0,05.....	61
Cuadro 12. Actividad Fotosintética, Conductancia estomática e Índice de Clorofila	65
Cuadro 13. Indicadores de Crecimiento	65
Cuadro 14. Peso Seco.....	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Características químicas del As, y su ubicación en la tabla periódica. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 2. Esquema general del ciclo biogeoquímico del As en la geosfera: flujos y principales reservorios. Modificado de Matschullat, 2000.....	10
Figura 3 . Formación de especies reactivas de oxígeno (Pierre, 2009).....	18
Figura 4. Situación del arsenicismo a nivel mundial	23
Figura 5 Estados afectados por Metales Pesados.....	26
Figura 6. Localidades muestreadas en la Comarca Lagunera.....	34
Figura 7 .Curva de calibración.	40
Figura 8. Concentraciones de as en suelo en contraste con la nom-004-semarnat-2002. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.	45
Figura 9. Concentraciones de as en agua en contraste con la NOM-001-ecol. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 10. Concentraciones de As en Hojas de <i>Cucumis melo</i> contraste con la norma CODEX-STAN 193-1995. Las barras se definieron Por Media $\pm$ Error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD a $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.....	52
Figura 11. Concentraciones de as en tallo de <i>Cucumis melo</i> contraste con la norma codex-stan 193-1995. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (dms a $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.	53
Figura 12. Concentraciones de As en Raíz de <i>Cucumis melo</i> contraste con la norma CODEX-STAN 193-1995. Las barras se definieron Por Media $\pm$ Error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (DMS a $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.	54
Figura 13. Concentraciones de as en fruto de <i>Cucumis melo</i> contraste con la norma codex-stan 193-1995. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD a $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.	55
Figura 14. Concentraciones de as en corteza de <i>Cucumis melo</i> contraste con la norma codex-stan 193-1995. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.	56
Figura 15. Concentraciones de as en flores de <i>Cucumis melo</i> contraste con la norma codex-stan 193-1995. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.	57

Figura 16. Concentraciones de as en semillas de <i>Cucumis melo</i> contraste con la norma codex- stan 193-1995. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD a $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.	58
Figura 17. Actividad de las peroxidasas.	63
Figura 18. Actividad de catalasas	64

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo sustentable fue definido como: “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer las capacidades que tienen las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” (ONU, 2011).

La importancia de los metales pesados en el contexto de políticas químicas y del medio ambiente a nivel internacional ha ido en incremento durante los últimos años. Los retos se enfocan en el adecuado manejo de los metales pesados, como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb) y cadmio (Cd) los cuales representan un riesgo importante a los seres vivos.

El arsénico se encuentra distribuido en cerca de $5 \times 10^{-4}\%$ de la corteza terrestre, bajo condiciones reductoras, están presentes iones complejos de sulfuros y arsénico, y el arsenito sería probablemente la forma predominante así como el As elemental y la arsina (Narh, 1977).

Un síntoma del arsénico soluble en suelos es el pobre crecimiento en los cultivo de alfalfa y cebada (Lepp, 1981). Woolson (1972) encontró correlaciones significativas entre la reducción del crecimiento y el arsénico extraíble por la planta. El arseniato es más rápidamente adsorbido y translocado, debido a su menor toxicidad para las raíces. Bajo condiciones no letales de este compuesto, se pueden observar concentraciones similares tanto en hojas como en raíces (Carbonell *et al.*, 1995).

Los metales pesados no pueden ser degradados cuando se cambia el estado de oxidación como ocurre con los compuestos orgánicos tóxicos. Existen solo tres mecanismos a través de los cuales un sistema puede conferir resistencia a metales pesados: disminución de la acumulación de un determinado ión mediante su transporte activo fuera de la célula; segregación de los cationes por moléculas que contienen grupos tioles y la reducción de algunos iones metálicos pesados a un estado de oxidación menos tóxico. Sin embargo, algunos de estos mecanismos no pueden funcionar como mecanismos de detoxificación únicos en una célula.

La Organización Mundial de la Salud (WHO), el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de América han determinado que el As inorgánico es carcinógeno en seres humanos. Aunado que al ingerir niveles altos de As orgánico puede causar la muerte; sin embargo, niveles de As orgánico más bajos produce náusea y vómito, reducción de la producción de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal, daño de los vasos sanguíneos y una sensación de hormigueo en las manos y los pies (ATSDR, 2007).

El arsenicismo constituye un problema de salud en diversas partes del mundo: Córdoba, Buenos Aires, Argentina (Pérez *et al.*, 2007), Grecia (Katsoyiannis *et al.*, 2008), Bangladesh (Rahman *et al.*, 2008; Harvey *et al.*, 2006), en la Florida EUA (Whitmore *et al.*, 2008), en Canadá (Wang y Mulligan, 2006), en Asia como China, Mongolia, Nepal, Camboya, Myanmar, Afganistán, Korea y

Pakistan (Mukherjee *et al.*, 2006). Así como estos países, muchos otros están expresando su preocupación y sus esfuerzos para resarcir y evitar mayores daños ecológicos y de salud a la población mundial.

En México se presentan problemas de arsenicismo en diferentes entidades: en Guadalupe, Zacatecas (Santos *et al.*, 2006), Los Altos de Jalisco (Hurtado *et al.*, 2006), en Chihuahua (Rubio *et al.*, 2010; Gutiérrez *et al.*, 2009), en Zimapán, Hidalgo (Pérez, 2004), en Tlacolula Oaxaca (Caballero *et al.*, 2010), en Monterrey, Nuevo León (Benin *et al.*, 1999). Estudios previos realizados en la Comarca Lagunera por Rosas *et al.* (1999), Comisión Nacional del Agua y otros institutos e investigadores señalan a la Región Lagunera como una zona de riesgo por metales pesados.

Estudios previos realizados en la Comarca Lagunera por Rosas *et al.*, (1999), Comisión Nacional del Agua y otros institutos e investigadores señalan a la Región Lagunera como una zona de riesgo por metales pesados.

La producción de melón a nivel mundial es de aproximadamente 26 millones de toneladas anuales. México se ubica en el octavo lugar mundial con una participación de 2.2% (FAO, 2011). La superficie cosechada en México, en el periodo de 1995-2005, fue de 28,960 hectáreas. El estado de Coahuila produce el 13%. Le siguen Guerrero, Sonora, Durango, Michoacán, Colima y Chihuahua que en conjunto participan con el 72% de la superficie total cultivada de melón en México (ASERCA).

Para el 2009, Coahuila se convirtió en el primer productor de esta fruta, ya que obtuvo una producción de 121,403.30 toneladas y Durango con 51,400.00. La Región Lagunera destaca como la zona melonera más importante del país con una superficie anual promedio de más de 5,300 hectáreas y una producción de 115,000 toneladas (SAGARPA, 2008).

Con el desarrollo de este trabajo de investigación buscamos contribuir a descartar riesgos por el consumo de melón cultivado en zonas contaminadas por arsénico, así como identificar la utilidad de algunos cultivos en la estabilización o fitorremediación de suelos contaminados y contribuir a develar los mecanismos involucrados en la tolerancia a altas concentraciones de As del melón en la Comarca Lagunera.

II. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la relación entre las concentraciones de As en el suelo, la acumulación del metal pesado en diferentes órganos de la planta de melón y sus respuestas fisiológicas.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Cuantificar la concentración de As en los diferentes órganos (raíz, tallo, hojas, flores, fruto, corteza y semillas) de plantas de melón cultivados o crecidas en sustrato con diferentes niveles de contaminación de As.
- II. Cuantificar el As presente en el agua de riego tanto de pozo como de río empleada en algunos sistemas de producción agrícola de la Comarca Lagunera.
- III. Determinar la concentración de As en suelo de diferentes áreas agrícolas de la Comarca Lagunera.
- IV. Cuantificar enzimas asociadas al estrés oxidativo (peroxidasas y catalasas) así como la actividad fotosintéticamente activa y clorofila del melón en las diferentes concentraciones de As.

III. HIPÓTESIS

- i. La concentración de As en los órganos de las plantas de melón tiene una relación positiva con la concentración de As en suelo y agua empleados en su cultivo.
- ii. La mayor concentración de As en la planta de melón ocurre en la raíz.
- iii. La activación de enzimas de estrés oxidativo aumenta conforme se incrementa la concentración de As.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 DESARROLLO SUSTENTABLE Y CONTAMINACIÓN

El desarrollo sustentable fue definido por la Comisión del Medio Ambiente y Desarrollo de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2011) como: “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer las capacidades que tienen las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” sin embargo, desde 1972 en la convención de Estocolmo se empezó a constituir la llamada “Carta de la Tierra” que culminó en 1994 en la Conferencia de Rio de Janeiro, donde la ONU se compromete a atender la protección de los bosques, diversidad biológica, calentamiento global; es decir, el equilibrio entre medio ambiente y desarrollo (ONU, 2011).

En la Carta de la Tierra se definió al medio ambiente como un conjunto de elementos físicos, químicos, biológicos, sociales y culturales que en un lugar y un tiempo determinado afectan y condicionan la vida del ser humano. Aunado a las diferentes problemáticas que pueden dañar la calidad de vida de la misma humanidad.

A nivel mundial las problemáticas son diversas y las resoluciones a las mismas son intensas pero muchas de las veces insuficientes; sin embargo, el primer paso está dado al diagnosticar las situaciones a las que enfrenta la humanidad. Entre las más apremiantes se tienen los diferentes tipos de contaminación tanto

del agua, suelo y alimentos que son los que de manera directa afectan la vida a un corto y largo plazo.

Se considera un contaminante a aquello que produce una alteración nociva del estado natural de un medio como consecuencia de la introducción de un agente totalmente ajeno a ese.

La importancia de los metales pesados en el contexto de políticas químicas y del medio ambiente a nivel internacional ha ido en incremento durante los últimos años. Los retos se enfocan en el manejo de los metales pesados, como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb) y cadmio (Cd), los cuales representan un riesgo importante para los seres vivos. Institutos internacionales y procesos regionales han desarrollado actividades en pro del manejo apropiado de residuos así como diversos métodos de biorremediación.

Entre los elementos que generan un mayor impacto a la salud está el arsénico, el cual es un agente contaminante químico. La exposición a niveles anormalmente elevados de arsénico ocurre principalmente en el trabajo, cerca de sitios de desechos, o en áreas con niveles naturalmente grandes. La exposición a altos niveles de As inorgánico puede causar la muerte. La exposición prolongada a niveles menores puede causar la despigmentación de la piel y aparición de callos o verrugas que posteriormente se ven traducidos a cáncer (ATSDR, 2003).

El arsénico se ha encontrado en 1014 de los 1598 sitios de la Lista de Prioridades Nacionales con Contaminantes Peligrosos Fuera de Control

identificados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2012), de los Estados Unidos de América.

4.2 ARSÉNICO

4.2.1 GENERALIDADES

El arsénico es un elemento perteneciente al grupo V-A de la tabla periódica, con el número atómico 33 y peso atómico de 74.92 g trabaja con las valencias de +3, -3 y +5, una densidad de 5.72, un punto de ebullición de 613°C y un punto de fusión de 817°C.

Por su posición en dicho grupo, predominan las características de no metal aunque muestra propiedades intermedias entre los metales y los no metales. Por su electronegatividad y energía de ionización permite la formación más fácil de aniones más fácilmente. Además, presenta un comportamiento similar al del fósforo, hecho que conlleva múltiples implicaciones, tanto a nivel edáfico como sobre la toxicidad del arsénico para las plantas (Carbonell *et al.*, 1995).

4.2.2 DISPONIBILIDAD DEL ARSÉNICO EN EL MEDIO AMBIENTE

El arsénico se encuentra distribuido en cerca de $5 \times 10^{-4}\%$ de la corteza terrestre. Las mayores concentraciones se dan en forma de arseniuros de cobre, plomo, plata y oro, o bien como impurezas en sulfuros; sin embargo, los compuestos más comunes son arsenopirita (FeAsS), rejalgar (As_4S_4) y oropimente (As_2S_3) (OMS, 2011). Forma parte de más de 245 minerales en forma de arseniatos

(60%), sulfuros y sulfosales (20%) y otras formas como arseniuros, arsenitos, óxidos y silicatos (20%) (Adriano *et al.*, 2004).

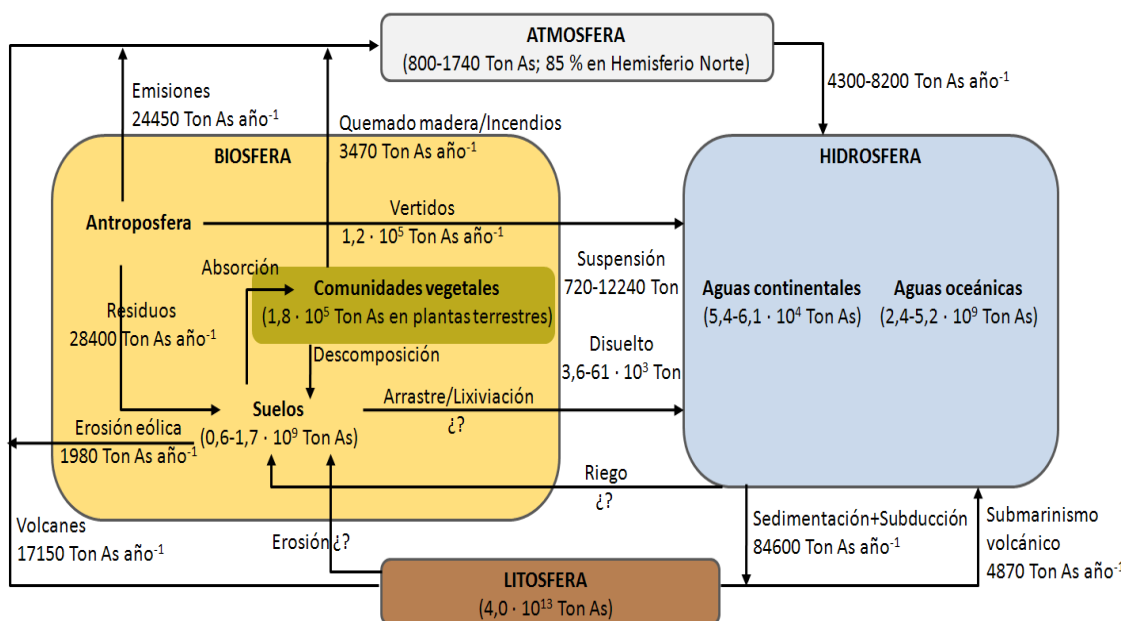


Figura 1. Esquema general del ciclo biogeoquímico del As en la geosfera: flujos y principales reservorios. Modificado de Matschullat, 2000.

4.2.3 FORMAS QUÍMICAS DEL ARSÉNICO

Las formas químicas diversas que se puede presentar el arsénico son las que se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Nombre y formula química de los compuestos derivados del arsénico.

Nombre (Sinónimo)	Fórmula
Arsénico Inorgánico, As (III)	
óxido de arsénico (III), trióxido de arsénico	As_2O_3 ó As_4O_6
ácido ortoarsenioso, ácido arsenioso	H_3AsO_3
ácido metaarsenioso	HAsO_2
(orto)arsenitos, sales del ác. Ortoarsenioso	H_2AsO_3^- , HAsO_3 , AsO_3
cloruro de arsénico (III), tricloruro de arsénico	AsCl_3
sulfuro de arsénico (III), trisulfuro de arsénico	As_2S_2
Arsénico inorgánico, As (V)	
óxido de arsénico (V), pentóxido de arsénico	As_2O_5
ácido ortoarsénico, ácido arsénico	H_3AsO_4
ácido metaarsénico	HAsO_3
(Orto)arseniatos, sales del ác. Arsénico	H_2AsO_3^- , HAsO_3 , 2^- , AsO_3
Arsénico orgánico	
ácido metilarsínico, ácido metanoarsónico	$\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2$
ácido dimetilarsónico, ácido cacodílico	$(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})$
óxido de trimetilarsina	$(\text{CH}_3)_3\text{AsO}$
Metilarsina	CH_3AsH_2
Dimetilarsina	$(\text{CH}_3)_2\text{AsH}$
Trimetilarsina	$(\text{CH}_3)_3\text{As}$
ác. p-aminobenceno-arsónico	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{AsO}(\text{OH})_2$
ác. p-nitrofenilarsónico	$\text{O}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{AsO}(\text{OH})_2$
Arsenobetaina	$(\text{CH}_3)_3\text{As}+\text{CH}_2\text{COOH}$
Arsenocolina	$(\text{CH}_3)_3\text{As}+\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
Dialquilcloroarsina	R_2AsCl
Alquildicloroarsina	RASCl_2

Tanto la disponibilidad que existe de arsénico para la planta depende de la del compuesto que este metal forme con otros en el medio ya sea inorgánico u orgánico.

4.2.4 DISTRIBUCIÓN DE ARSÉNICO EN EL SUELO

Las características físicas y químicas del suelo son importantes para el control de su capacidad adsorptiva afectando así la disponibilidad de arsénico para las plantas.

En condiciones reductoras están presentes iones complejos de sulfuros y arsénico, y el arsenito es probablemente la forma predominante así como el As elemental y la arsina. Sin embargo, el arseniato es el estado de oxidación predominante o más estable en medios oxigenados, con H_2AsO_4^- predominando en condiciones ácidas y el $(\text{HAsO}_4)^{2-}$ predominando en condiciones alcalinas (Carbonell *et al.*, 1995).

El ácido metanoarsónico y los metanoarsoniatos difieren del arseniato por tener un grupo metilo, en sustitución del grupo hidroxilo, enlazado al átomo de arsénico. Las proporciones relativas de las formas iónicas y moleculares de los compuestos orgánicos de arsénico se determinan mediante el pH de la disolución. En gran cantidad de suelos agrícolas (pH de 5 a 7) predomina el ión univalente de los metanoarsoniatos, pero tanto el ión cacodílico como el ácido pueden estar presentes (Carbonell *et al.*, 1995).

4.2.5 QUÍMICA DEL SUELO

La persistencia del arsénico está controlada por la capacidad de absorción del suelo y por las pérdidas que se puedan producir tanto por lavado o lixiviación como por volatilización. Probablemente, un porcentaje grande del arsénico añadido se puede perder en forma de gas (Carbonell *et al.*, 1995).

La capacidad de absorción de un suelo está afectada por su textura, contenido de sesquióxidos y la presencia de otros elementos que puedan interferir en el proceso de absorción. Las fracciones arena y limo muestran una capacidad de

adsorción bastante reducida debido a la área superficial y a la predominancia de cuarzo, mientras que la arcilla es el principal adsorbente (Carbonell *et al.*, 1995).

4.2.6 EL ARSÉNICO EN LAS PLANTAS

Los compuestos de As han sido usados en agricultura como pesticidas, insecticidas, herbicidas o defoliantes durante muchos años. Los arsenicales orgánicos han reemplazado a los inorgánicos como herbicidas selectivos o generales. La acumulación de arsénico en las plantas puede ser afectada por muchos factores, incluyendo las especies de plantas el tipo de compuestos utilizados, los métodos de aplicación, las condiciones del suelo y la aplicación de fertilizantes. Es raro que la acumulación de arsénico en las plantas alcance niveles perjudiciales para los seres vivos porque invariablemente el crecimiento es reducido antes de que el contenido alcance niveles tóxicos (Woolson *et al.*, 1973).

4.2.7 FITOTOXICIDAD

El arsenito es más fitotóxico que el arseniato y ambos son más tóxicos que el metanoarsoniato monosódico (MSMA) y el ácido cacodílico (CA). Si los arsenicales son aplicados foliarmente, entonces el CA puede ser el más fitotóxico (Sachs y Michaels, 1971). Un síntoma del As soluble en suelo es el crecimiento pobre en cultivos de alfalfa y cebada es posible atribuírsele al arsénico soluble de suelos (Lepp, 1981). Woolson *et al.*, (1972) encontraron

correlaciones significativas entre la reducción del crecimiento y el As extraíble con bicarbonato y una mezcla de ácidos.

Los compuestos orgánicos de As son aplicados en proporciones considerablemente menores que los inorgánicos, resultando menos fitotóxicos para los cultivos. Los herbicidas, en cuya composición interviene el ácido metanoarsónico monosódico (MSMA) o el ácido cacodílico (CA), son aplicados, a ciertos cultivos, más de tres veces en una misma estación, en proporciones que no exceden los 4.5 Kg ha⁻¹ de MSMA a los 5.6 Kg ha⁻¹ de CA (Carbonell *et al.*, 1995).

Cuando el arseniato y el arsenito son suministrados a plantas sanas, ambas fases de la toma son aparentemente de 3 a 4 veces superiores para arseniato que para arsenito. Parece ser que la toma de arsenito es también un proceso metabólico, pero la vía de entrada a la planta no se ha establecido (Carbonell *et al.*, 1995).

La velocidad del proceso de adsorción presenta el siguiente orden, de mayor a menor: arseniato, arsenito y compuestos orgánicos, en plantas de soya (Wauchope, 1983). Una posible solución que se sugiere es la detoxificación bioquímica del elemento en el interior de las plantas, según la cual el arseniato dentro de las células sería metilado y convertido en un derivado trimetilado de la ribosa (Meharg y Macnair, 1991).

4.2.8 TRASLOCACIÓN

Una vez que el arsénico ya ha sido absorbido por la planta, los compuestos de dicho elemento (particularmente como arsénico pentavalente) fluyen a través de la planta en pocas horas (Wauchope, 1983), moviéndose tanto simplástica como apoplásticamente (transporte extracelular).

Los pasos a seguir por los citados compuestos cuando son absorbidos por la raíz (si se absorben por vía foliar, se deberá acudir al paso adecuado)(Wauchope, 1983):

Raíz—Xilema---Hojas---Floema, hojas—Floema---Raíces, parte aérea, xilema

El transporte de arsenito desde las raíces está limitado por su gran toxicidad para las membranas radiculares (Wauchope, 1983). El arseniato es más rápidamente adsorbido y translocado, debido a su menor toxicidad para las raíces. De tal forma que si se trabaja con cantidades no letales de éste último compuesto, se pueden observar concentraciones similares tanto en hojas como en raíces (Carbonell *et al.*, 1995).

En suelo, un nivel de arsénico extraíble de 5 mg Kg^{-1} es toxico para especies sensibles, mientras que uno de 50 mg Kg^{-1} en plantas menos sensibles puede reducir el crecimiento más del 50%. Las concentraciones de arsénico en planta

que limitan las cosechas son de 1 mg Kg⁻¹ y de 4.4 o superiores en algodón. Concentraciones de arsénico en planta correspondientes a un 50% de reducción de crecimiento son de 0.7 mg Kg⁻¹ en frutos de tomate, 10 mg Kg⁻¹ en hojas de espinaca y 76 mg Kg⁻¹ en la raíz del rábano (Carbonell *et al.*, 1995).

4.2.9 MECANISMO DE RESISTENCIA A METALES PESADOS

Los metales pesados no pueden ser degradados cuando se cambia el estado de oxidación como ocurre con los compuestos orgánicos tóxicos. Existen solo tres mecanismos a través de los cuales un sistema puede conferir resistencia a metales pesados son conocidos:

- (i) disminución de la acumulación de un determinado ión mediante su transporte activo fuera de la célula;
- (ii) segregación de los cationes por moléculas que contienen grupos tioles;
- (iii) reducción de algunos iones metálicos pesados a un estado de oxidación menos tóxico. Sin embargo, algunos de estos mecanismos no pueden funcionar como mecanismos de detoxificación únicos en una célula.

Las rutas de oxidación (ROX) activas mediante las cuales el metabolismo de los metales pesados en donde se lleva a cabo por el transporte o por una combinación de mecanismos (Inzé y Montagu, 2002).

4.2.10 RUTAS DE OXIDACIÓN

Dos mecanismos de descarboxilación se conocen: Una ruta menor y la ruta sin descarboxilación. El producto final de estas rutas es el ácido oxindol-3-acético (OxIAA), un compuesto que se produce de forma natural en el endospermo y los tejidos de los brotes (Inzé y Montagu, 2002).

El reservorio principal de oxígeno es el producido durante la fotosíntesis. Así se libera H_2O y en la respiración el O_2 es el último aceptor de electrones aunado a que las más altas concentraciones de O_2 son las atmosféricas. El dióxido puede inhibir o inactivar algunas enzimas y es altamente competitivo con la fijación de CO_2 fotosintética por la ribulosa 1,5 di fosfato carboxilasa/oxidasa (RuBisCO). Sin embargo, los efectos tóxicos del oxígeno son ejercidos por las especies reactivas de este elemento. Para que el dioxígeno se transforme en reactivo es necesaria una activación física o química. Las especies reactivas de oxígeno son el superóxido (O_2^-), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el radical hidroxilo ($OH^\cdot$). La toxicidad a nivel vegetal se ve reflejada en la disminución de la vida media de los organelos celulares (Inzé y Montagu, 2002).

El superóxido, es la primera reducción y oxidación del oxígeno en el suelo. Este es capaz de producir algunas otras formas reactivas de oxígeno. El peróxido de hidrógeno no es un radical libre, pero participa como oxidante y reductor en muchas reacciones celulares. A diferencia del superóxido, el H_2O_2 es fácilmente

permeable a través de la membrana y compartimentos acuáticos y este compuesto puede inactivar enzimas sensibles en bajas concentraciones. Los radicales hidroxilo son la especie oxidante más fuerte en los sistemas biológicos. Este reacciona de forma inespecífica con cualquier molécula biológica (Pierre, 2009).

Las diferentes especies reactivas producen, en diferente medida daños como:

- i. Inhibición de enzimas sensibles
- ii. Degradación de clorofila
- iii. Peroxidación de lípidos
- iv. Ataques indiscriminados de radicales libres a moléculas orgánicas, incluyendo ADN.

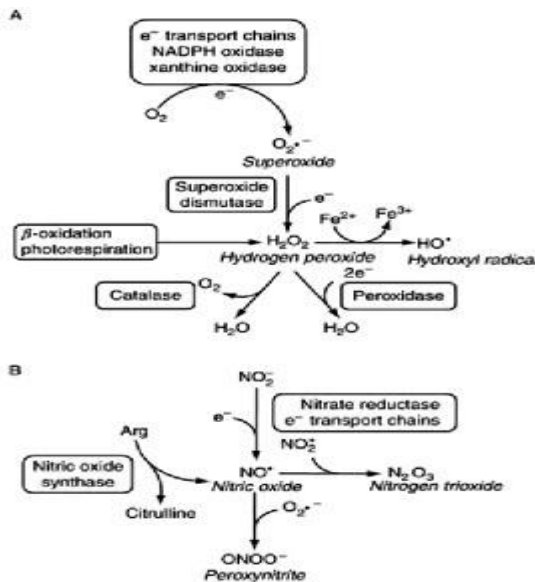


Figura 2 . Formación de especies reactivas de oxígeno (Pierre, 2009).

4.2.11 TOXICIDAD EN PLANTAS POR METALES PESADOS

La acumulación de metales fitotóxicos en el medioambiente son resultado de actividades industriales y las prácticas agrícolas. Los elementos Zn, Cu, Fe, As, y Cd son contaminantes que se han incrementado recientemente, produciendo diferente grado de daño en las plantas:

- i. Inhibición directa del crecimiento en las plantas y las rutas biosintéticas.
- ii. Producción radicular (Foy *et al.*, 1978).

La exposición de las plantas a niveles grandes de iones de cobre produjo peroxidación de lípidos y la despigmentación o clorosis (Sandmann y Gonzales, 1989). Trabajos recientes demuestran la asociación entre la toxicidad por metales, el estrés oxidativo y la codificación de genes en respuesta al contaminante por similares factores de transcripción (Davies *et al.*, 1987).

Las concentraciones grandes de metales pesados se ven reflejadas en un metabolismo más rápido y el incremento de la entrada de metales pesados dentro de la célula. Si el metabolismo se ve inhibido, la toxicidad para las plantas es sumamente relevante, produciendo un estrés que en muchas de las ocasiones es difícilmente reversible. Llega a inhibir las actividades de DNasa y

la RNasa (Duan y Wang, 1992) por lo cual se interrumpe la síntesis de DNA y la afección a la división celular es inminente.

La cascada de reacciones a nivel de las mitocondrias disminuye o desaparece en algunos casos así como la composición de las membranas de los tilacoides se degradan cuando la exposición es prolongada en el estrés por metales pesados.

Así mismo, una serie de efectos sobre, características fisiológicas y bioquímicas se presentan; por ejemplo, sobre el contenido de clorofila y la fotosíntesis, la actividad enzimática. En especial los efectos sobre el malondialdeído (MDA) el cual es un indicador de la peroxidación de lípidos, en las superóxido dismutasa (SOD), peroxidasa (POD) y las catalasas (CAT); esta serie de enzimas son importantes para las plantas en el proceso de adaptación al estrés mediante sistemas enzimáticos (Perl *et al.*, 2002; Foyer *et al.*, 1994).

4.2.12 EFECTOS SOBRE LA SALUD MEDIANTE LA EXPOSICIÓN A ARSÉNICO

El arsénico ha sido delimitado por organismos internacionales como un elemento altamente tóxico por su capacidad de asociación y su fácil absorción tanto por personas, como por animales y plantas.

Respirar niveles grandes de As inorgánico puede causar dolor de garganta o irritar los pulmones. Aunque la exposición constante a As aumenta el riesgo de

padecer cáncer de pulmón, piel, vejiga, hígado, riñón y próstata. La WHO, el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) y la EPA han determinado que el As inorgánico es carcinógeno en seres humanos. La ingestión de niveles grandes de As orgánico puede causar la muerte; sin embargo, niveles menores de As orgánico produce náusea y vómito, reducción de la producción de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal, daño de los vasos sanguíneos y una sensación de hormigueo en las manos y los pies (ATSDR, 2003).

Los efectos en seres humanos asociados a un consumo crónica de agua con grandes concentraciones de As inorgánico pueden ser múltiples y se agrupan en las denominaciones de arsenicosos o hidroarsenicismo crónico endémico regional. Incluye cánceres internos y externos, dermatitis, afectación del sistema nervioso central y periférico, hipertensión, enfermedades vasculares periféricas, enfermedades cardiovasculares, enfermedades respiratorias y diabetes mellitus (Yoshida *et al.*, 2004; BEST, 2001).

4.2.13 SITUACIÓN DEL ARSENICISMO EN EL MUNDO

El arsenicismo constituye un problema de salud en diversas partes del mundo. En Córdoba y Buenos Aires, Argentina se han registrado valores mayores a $10 \mu\text{g L}^{-1}$ en las evaluaciones de capa freática (Pérez *et al.*, 2007). En la ciudad de Malgara, Aksios, Grecia se estimaron concentraciones de arsénico de $20 \mu\text{g}$

L⁻¹ en aguas subterráneas; por ello, sistemas de filtración biológica fueron establecidos para disminuir dichas concentraciones (Katsoyiannis *et al.*, 2008).

En Bangladesh se reportan problemas severos de arsenicismo. Por ello este metal se ha medido de manera permanente en productos de consumo ya que las concentraciones de As en suelo de hasta 60 mg Kg⁻¹ han llevado a suponer una posible inserción a la cadena trófica (Rahman *et al.*, 2008) (Harvey *et al.*, 2006).

En la Florida EUA, el contenido de As en los sedimentos del lago “Jackson Lake” fue estimado y se encontraron concentraciones de hasta 148 mg Kg⁻¹ con una media de 47.3 mg Kg⁻¹, ello representando un riesgo de toxicidad para la fauna del lago (Whitmore *et al.*, 2008).

En Canadá, se han desarrollado investigaciones que revelan elevadas concentraciones de As que están en el rango de 4-150 mg Kg⁻¹, por ello, se trabaja con diferentes técnicas de fito- y bio- extracción (Wang y Mulligan, 2006).

Ciudades de Asia como China, Mongolia, Nepal, Camboya, Myanmar, Afganistán, Korea y Pakistan, desde el periodo 2000-2005 han mostrado un incremento considerable en la concentración de este metal en aguas subterráneas (Mukherjee *et al.*, 2006).



- | | | |
|---|-------------------------------|---------------------|
| 1. Poland | 14. Fairbanks, Asaska | 29. United Kingdom |
| 2. Brazil | 15. Millard County, Utah, USA | 30. Germany |
| 3. New Zealand | 16. Fallon, Nevada, USA | 31. Romania |
| 4. Spain | 17. Inner Mongolia, China | 32. Bulgaria |
| 5. Hungary | 18. Xinjiang Uighur, China | 33. Greece |
| 6. Lane County, Western Oregon, USA | 19. Banglades | 34. The Philippines |
| 7. Monte Quemodo, Cordoba, North Region Lagunera, Argentina | 20. India | 35. Australia |
| 8. Region Lagunera, North Mexico | 21. Viet Nam | 36. Myanmar |
| 9. Taiwan | 22. Afghanistan | 37. Iran |
| 10. Antofagasta, Chile | 23. Pakistan | 38. Japan |
| 11. Lassen county, California, USA | 24. Egypt | 39. Lao PDR |
| 12. Sri Lanka | 25. Ghana | 40. Nepal |
| 13. Nova Scotia. Canada | 26. Cambodia | 41. Switzerland |
| | 27. Sweden | 42. Thailand |
| | 28. Finland | |

Figura 3. Países y regiones con arsenicismo en el mundo.

Así como estos países, muchos otros están expresando su preocupación y sus esfuerzos para resarcir y evitar mayores daños ecológicos y de salud en la población.

4.2.14 SITUACIÓN DEL ARSENICISMO EN MÉXICO

En México se presentan problemas de arsenicismo en diferentes entidades. Varios estudios han encontrado niveles excesivos de este metal pesado particularmente en el centro y norte del país (Figura 5).

En Guadalupe, Zacatecas se identificaron diferentes concentraciones de As en suelo que varían entre los 3 y 183 mg Kg⁻¹, coincidiendo con los más altos valores las localidades de La Zacatecana y Osiris las cuales están fuertemente afectadas mostrando como fuente contaminante las instalaciones de viejas industrias mineras que por muchos años trabajaron en la región (Santos *et al.*, 2006).

En la región de Los Altos de Jalisco, se han encontrado concentraciones de As en agua de 15 a 263 µg L⁻¹, las regiones más expuestas a estos altos valores establecen una estimación de la exposición diaria en bebés (10 Kg) de hasta 19.7 µg/Kg/d, en niños (20 Kg) 13.1 µg/Kg/d, y en adultos (70 Kg) se tuvieron un 6.9 µg/Kg/d. El valor permisible es 2.14 µg/Kg/d (Hurtado y Gardea, 2006).

En Chihuahua se evaluó la concentración de diferentes metales pesados, incluyendo el As en el Río Conchos, con el propósito de identificar su bioacumulación de este en los pescados que se emplean para consumo humano. Es necesario mantener un monitoreo constante de estos contaminantes y que es vital identificar posibles métodos de bioremediación (Rubio *et al.*, 2010; Gutiérrez *et al.*, 2009).

En Zimapán, Hidalgo se valoraron diferentes metales que pueden tener importancia ambiental en agua potable de la región encontrando entre otros datos importantes valores de As entre 40 y 480 $\mu\text{g L}^{-1}$. En este caso se visualizó una fuerte problemática pues en el año 2000 la concentración de As rebasaba los 30 $\mu\text{g L}^{-1}$ que era el límite permisible en aquellos años; ahora es de 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Pérez, 2004).

Tlacolula Oaxaca, en una localidad sometida a contaminación por metales pesados, la concentración de arsénico se incrementó durante 8 meses. Los resultados evidenciaron que las concentraciones sobrepasaron los límites establecidos durante todo el tiempo de evaluación (Caballero *et al.*, 2010).

En áreas aledañas a Monterrey la refinera metalúrgica que actualmente se encuentra inactiva pero se trabajó fuertemente con la refinación de Pb, se encontró una media de 41 $\mu\text{g g}^{-1}$ con un rango de 17 a 108 $\mu\text{g g}^{-1}$ de As; tal situación, ha afectado desde ese entonces a la actualidad, la vida de las personas que las habitan (Benin *et al.*, 1999).



Figura 4. Los estados marcados en rojo presentan reportes de altos niveles de contaminación por As.

Estos son algunos ejemplos de estudios realizados por investigadores de diversas partes de México y del Mundo, que evidencia la seria problemática que enfrenta el país; sin embargo, aún es necesario registrar evidencias y establecer soluciones en una región que se encuentra en la mira de muchos lugares del mundo por la severidad de su problemática; la Comarca Lagunera.

4.2.15 ARSENICISMO EN LA COMARCA LAGUNERA

Estudios previos realizados en la Comarca Lagunera por Rosas *et al.*, (1999), señalan concentraciones de hasta $740 \mu\text{g L}^{-1}$ en la comunidad de Francisco I. Madero, Coahuila de $590 \mu\text{g L}^{-1}$ en Tlahualilo, Durango y $490 \mu\text{g L}^{-1}$ en San Pedro Coahuila en evaluaciones de agua. Aunado a un rango de 11 a $30 \mu\text{g g}^{-1}$ en suelo de granjas de Tlahualilo y Francisco I. Madero. Debido a estas concentraciones se presenta una concentración de As en leche que va de 1.04 a 8.59 ng g^{-1} .

En un estudio realizado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2006), mediante en el programa de red de monitoreo, en 2006 realizado en diferentes comunidades de la Comarca Lagunera muestra que solo el 18.75% de las comunidades evaluadas cumplen con los valores de 0.020 mg L^{-1} mientras que el resto muestra concentraciones de hasta 0.223 mg L^{-1} .

4.3 COMARCA LAGUNERA

La Comarca Lagunera, ubicada en el norte de México, está conformada por parte de los Estados de Coahuila y Durango. La Comarca Lagunera se localiza a 24° 22' de latitud norte y 102° 22' de longitud oeste, a una altura de 1,120 metros sobre el nivel del mar. Geográficamente la región lagunera está formada por una enorme planicie semidesértica de clima caluroso y con un alto grado de aridez. El clima es árido con lluvias deficientes en todas las estaciones. La temperatura promedio fluctúa entre los 28 y 40 °C, pero puede alcanzar hasta 48°C (2008) en verano y -13°C (2011) en invierno. La región se encuentra localizada dentro de la zona subtropical de alta presión. Esta posición geográfica y situación altitudinal intervienen en el comportamiento climático de la zona.

La Comarca Lagunera, está integrada por 16 municipios, 11 del Estado de Durango (Gómez Palacio, Lerdo, Tlahualilo, Mapimí, San Pedro del Gallo, San Luis del Cordero, Rodeo, Nazas, Cuencamé, General Simón Bolívar y San Juan de Guadalupe) y 5 del Estado de Coahuila (Torreón, Matamoros, San Pedro de las Colonias, Francisco I. Madero y Viesca).

4.4 MELÓN

4.4.1 ORIGEN

El melón (*Cucumis melo* L.) pertenece a la familia de las Cucurbitáceas. El género *Cucumis* comprende 32 especies, algunas de ellas cultivadas y el resto corresponden a especies silvestres africanas. Dentro de este género, hay 30 especies. El centro de todas las especies del género *Cucumis* se sitúa en África; el número cromosómico básico de *C. sativus* es de 12, *C. hystrix* Chakravarty tiene una distribución desde China a Tailandia e India (Pitrat *et al.*, 2000).

4.4.2 CLASIFICACIÓN CIENTÍFICA

- ✓ Reino: Plantae
- ✓ Subreino: Tracheobionta
- ✓ División: Magnoliophyta
- ✓ Clase: Magnoliopsida
- ✓ Subclase: Dilleniidae
- ✓ Orden: Cucurbitales
- ✓ Familia: Cucurbitaceae
- ✓ Subfamilia: Cucurbitoideae
- ✓ Tribu: Benincaseae
- ✓ Subtribu: Benincasinae
- ✓ Género: *Cucumis*
- ✓ Especie: *C. melo*

Nombre binomial: *Cucumis melo* L., 1753

4.4.3 TAXONOMÍA Y MORFOLOGÍA

Nombre científico: ***Cucumis melo* L.**

Planta: anual herbácea, de porte rastrero o trepador.

Sistema radicular: abundante, muy ramificado y de rápido desarrollo.

Tallo principal: está recubierto de formaciones pilosas, y presentan nudos en los que se desarrollan hojas, zarcillos y flores, brotando nuevos tallos de las axilas de las hojas.

Hoja: de limbo orbicular aovado, reniforme o pentagonal, dividido en 3-7 lóbulos con los márgenes dentados. Las hojas también son vellosas por el envés.

Flores: las flores son solitarias, de color amarillo y pueden ser masculinas, femeninas o hermafroditas. Las masculinas suelen aparecer en primer lugar sobre los entrenudos más bajos, mientras que las femeninas y hermafroditas aparecen más tarde en las ramificaciones de segunda y tercera generación, aunque siempre sobre el número de flores masculinas, femeninas y hermafroditas así como sobre el momento de su aparición. La polinización es entomófila.

Fruto: su forma es variable (esférica, elíptica, aovada) la corteza de color verde, amarillo, anaranjado, blanco, etc., puede ser lisa, reticulada o estriada. La pulpa puede ser blanca, amarilla, cremosa, anaranjada, asalmonada o verdosa. La placenta contiene las semillas y puede ser seca, gelatinosa o acuosa, en función de su consistencia. Resulta importante que sea pequeña para que no reste pulpa al fruto y que las semillas estén bien situadas en la misma para que no se muevan durante el transporte.

4.4.4 CONDICIONES DE CULTIVO

El melón prospera en cualquier tipo de suelo, siendo óptimos los franco-arenosos, con buen drenaje y contenido de materia orgánica. Se le clasifica como ligeramente tolerante a suelos ácidos por desarrollarse adecuadamente en pH de 6 a 6.8.

Los suelos deben tener buen drenaje, pues los encharcamientos provocan pérdida de frutos. Para un buen desarrollo y rendimiento del cultivo, el pH debe encontrarse entre 6 y 7, aunque tolera suelos ligeramente calcáreos. La temperatura del suelo óptima para la germinación se establece en 32 °C, lográndose con una mínima de 15.5 °C y una máxima de 39 °C (Sánchez-Rojas *et al*, 1999). El agua constituye entre el 85 % y 90% del peso fresco de la planta. El melón cantaloupe es muy sensitivo a estrés de humedad, especialmente durante la etapa de madurez a cosecha. La falta de humedad afecta a la producción y calidad de la fruta, independientemente que se promueva un desbalance nutricional generando un secamiento prematuro de la planta, lo que no se puede revertir aun cuando se le aplique posteriormente más agua (Sánchez-Rojas *et al.*, 1999).

4.4.5 VARIEDADES DE MELÓN

Varios tipos, con múltiples variedades dentro de cada tipo se distinguen; difieren en su aspecto, sus propiedades y su modo de cultivo. Los tipos más cultivados son los de melón charentais, cantalupo, cantalupo italiano, western shipper,

eartern shipper, amarillo, piel de sapo, honey dew, tendral, ananas, galia, crenshaw y earl japonés.

4.4.6 PRODUCCIÓN DE MELÓN A NIVEL MUNDIAL

La producción de melón a nivel mundial es de aproximadamente 26 millones de toneladas anuales teniendo a China como el principal país productor al participar con el 51% de la producción total. Para el año 2004, los principales países productores de melón fueron: China con 14,338 miles de toneladas; seguido por Turquía, 1,700; República Islámica de Irán, 1,230; Estados Unidos de América, 1,150.40; España, 1,192.40; Rumania 765.80; Marruecos 665; India 654; Italia 580.27; Egipto 563.02 y finalmente México con 510. México se ubica en el octavo lugar mundial con una participación de 2.2% (FAO, 2011).

Para el 2008, la producción mundial del melón alcanzó los 28 millones de toneladas (FAO, 2011). La producción mundial se mantuvo casi estable con relación a los resultados obtenidos en el 2007, con una variación del 1.7%. Los principales productores de melón son China, Turquía, Irán, España y Estados Unidos de América. De la región Centroamérica el principal productor de melón es Guatemala y se ubica en la posición número 11 a nivel mundial, seguido por Costa Rica en la posición número 13 y Honduras en el número 17 (FAO, 2011).

4.4.7 PRODUCCIÓN DE MELÓN EN MÉXICO

La superficie cosechada en México, en el periodo de 1995-2005, presentó un comportamiento con tendencia a la baja, ya que al inicio del periodo se cosecharon 28,960 ha y para el año 2005 disminuyó a 22,086 ha. El estado con mayor superficie cosechada es Coahuila y su participación es de 13% de la superficie cosechada total. Le siguen Guerrero, Sonora, Durango, Michoacán, Colima y Chihuahua pues en conjunto participan con el 72% de la superficie total cultivada de melón en México (ASERCA).

Para el 2009, la producción de melón aumentó, Coahuila se convirtió en el primer productor de esta fruta, ya que obtuvo una producción de 121,403 ton, seguido por Michoacán con 110,924 ton; Guerrero con 82,803 ton; Sonora con 53,749 ton; Durango con 51,400 ton y finalmente Colima con 39,815 ton.

La región Lagunera destaca como la zona melonera más importante del país con una superficie anual promedio de más de 5,300 hectáreas y una producción de 115,000 toneladas (SAGARPA 2008).

4.5 NORMATIVIDADES IMPORTANTES EN CUANTO A METALES PESADOS

La concentración máxima permitida de As en aguas de consumo humano por la agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (EPA) era de $50 \mu\text{g L}^{-1}$, mientras que a partir del 2001 organismos internacionales como la misma EPA y WHO adoptaron un nuevo estándar referente de $10 \mu\text{g L}^{-1}$

(Melamed, 2005). Las concentraciones de As en aguas dulces son muy variables de 1 a 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ y de 100 a más de 50,000 $\mu\text{g L}^{-1}$ en áreas con importantes influencias de mineralización y actividad minera. Considerando estas como altamente contaminadas y con necesidades de bioremediación.

Cuadro 2. Normas y regulaciones.

Norma	Enfoque de la Norma	Concentración de As Permitida
NOM-001-ECOL	0.2-0.4 mg/L	Agua de río para riego agrícola
NOM-001-ECOL	0.4 mg/Kg	Suelo uso en riego Agrícola
NOM-127-SSA1-1194	0.025	Agua de Consumo Humano
CODEX-STAN 193-1995	0.5 mg/Kg	Calidad Alimentaria
NOM-004-SEMARNAT-2002	41 mg/Kg	Suelo/ Biosólidos

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 SELECCIÓN DE LAS LOCALIDADES

La presente investigación se realizó en cinco localidades de la Comarca Lagunera tres en el estado de Durango, Ceballos, Raymundo y Tlahualilo y dos en el estado de Coahuila, Congregación de Hidalgo y San Pedro de las Colonias. Estas comunidades se consideran como un depósito natural de arsénico, aunado a ello poseen una producción agrícola abundante en la que destaca el melón. De esta manera es posible establecer la dinámica del arsénico en suelo-agua-plantas en estas localidades.



Figura 5. Localidades muestreadas en la Comarca Lagunera.

Cuadro 3. Ubicación de localidades evaluadas

Localidad	Ubicación de los sitios Muestreados
Ceballos	26°32'29.01"N 104°12'03.75" O
Tlahualilo	26°05'38.84"N 103°26'08.69" O
Raymundo	25°30'53.40"N 103°33'37.51" O
Congregación Hidalgo	25°29'11.38"N 103°10'00.83" O
San Pedro	25°45'25.83"N 102°59'33.55" O

5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos se analizaron mediante el uso del paquete estadístico SAS empleando un modelo estadístico de bloques completamente al azar en donde se tuvieron como variable se consideraron a las localidades muestreadas así como los diferentes órganos de la planta de melón aunado a suelo y agua de las respectivas localidades.

5.3 TIPO DE MUESTRAS

105 muestras de plantas de melón fueron colectadas. En ellas la concentración de arsénico en cada uno de los órganos que la constituyen fue estimada; raíz, tallos, hojas, flores, fruto (pericarpio y pulpa) y semillas. De la misma manera se tomaron 5 muestras compuestas de suelo una por localidad y 5 muestras de agua de riego (pozo y río).

Cuadro 4. Fuente de agua de muestreo.

Localidad	Origen de la Muestra
Ceballos	Agua de Pozo
Tlahualilo	Agua de Río
Raymundo	Agua de Río
Congregación Hidalgo	Agua de Pozo
San Pedro	Agua de Río

5.4 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Se desarrolló el muestreo de suelo con base en la Norma NMX-AA-132-SCFI-2006, Muestreo de Suelos para la identificación y la cuantificación de metales y

metaloides, y manejo de muestras. Se empleó el muestreo mediante tomas de perfil de suelo (muestreo vertical) de 30 cm de profundidad tomando 15 muestras de una superficie de aproximadamente 5 hectáreas tomando en zig-zag y haciendo una muestra compuesta para su evaluación total de la zona.

Así mismo las muestras de agua de riego, pueden ser de pozo y de canal, considerando la NOM-001-ECOL-1996. Dicha norma define los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. 6 muestras simples con un intervalo entre toma de 1 hora entre muestras fueron consideradas.

5.5 DIGESTIÓN POR PARRILLA PARA CUANTIFICACIÓN DE AS EN SUELO

El método de digestión utilizado en esta investigación se basa en las especificaciones de la NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental, lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Para cada muestra se consideraron 0.5 g y se realizó por triplicado en vaso de precipitados Pyrex y se añadieron 10 mL de HNO_3 concentrado. Los vasos de precipitados se colocaron dentro de una campana de extracción, se cubrieron con vidrios de reloj y se calentaron lentamente en una placa de calentamiento, con regulador de temperatura, hasta que hubo reflujo de vapores. Durante este proceso se monitoreo la temperatura de las muestras, procurando mantenerla a 80 °C y cuidando no alcanzar la temperatura de ebullición. Cada muestra se calentó

casi hasta secarse completamente; luego se adicionaron 5 mL de HNO_3 concentrado y se calentó a reflujo hasta lograr la digestión completa, indicada cuando la solución adquieran una apariencia cristalina y los vapores emitidos fueron blancos (se adicionó la cantidad de ácido necesario para obtener estas condiciones).

Posteriormente, la temperatura se mantuvo y se evaporó hasta obtener un volumen aproximado de 2 mL, se enfrió y enjuagó el vidrio de reloj con agua tridestilada. Luego 10 mL de HCl 1:1 y 15 mL de agua tridestilada; se añadieron; se calentó nuevamente durante 15 min para re disolver los precipitados que se hubiesen formado. Las paredes de los vasos y los vidrios de reloj con agua tridestilada fueron enfriaron y enjuagaron. El contenido se vació a un matraz volumétrico Pyrex de 50 mL; luego se pasó por un papel filtro Whatman No. 4 para remover el material insoluble y se aforó al volumen correspondiente. La muestra se conservó en envases de polipropileno debidamente rotulado. El procedimiento y las condiciones de digestión fueron las mismas tanto para las muestras, blancos, controles y muestras fortificadas (50 ppb).

5.6 DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA DE RIEGO

La NOM-117-SSA1-1994 establece el método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. Debido a la naturaleza incolora e inodora de las muestras se procedió al

análisis directamente por espectrometría de absorción atómica, sin necesidad de digestión solo con acidificación.

5.7 DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO EN FRUTO, SEMILLAS, CORTEZA, HOJAS, TALLO, FLOR Y RAÍZ MEDIANTE DIGESTIÓN POR VÍA SECA

El proceso de cuantificación se desarrolló con base en la Norma NOM-117-SSA-1-1994. Luego 1 g de muestra previamente seca y molida se pesó, se le añadieron 10 mL de ácido nítrico concentrado y se inició la digestión de las muestras se llevó a sequedad en parrilla de calentamiento hasta cenizas, se colocaron en mufla y se incrementó de 500 a 550 °C durante toda la noche o como mínimo 6 horas. Se apagó y se dejó enfriar la mufla. Las paredes del crisol se lavaron con 2 mL de ácido nítrico al 50%; luego se colocaron en placa de calentamiento a 120°C para remover el exceso de ácido. Las cenizas se redisolviéron completamente en 5 mL de ácido clorhídrico 1 N; los crisoles se enjuagaron con dos alícuotas de 5 mL de ácido clorhídrico 1 N. La muestra se filtró con papel Whatman No. 2, antes de la determinación.

5.8 CUANTIFICACIÓN

La cuantificación de Arsénico tanto en suelo, agua y planta se realizó usando espectroforómetro de absorción atómica equipado con nebulizador de flujo cruzado con horno de grafito, *FAAS Perkin Elmer AAnalyst 200*, en el

Laboratorio de Ciencias Ambientales del Instituto de Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Un FAAS Perkin Elmer AAnalyst 200, equipado con nebulizador de flujo cruzado, esfera de impacto de teflón, spoiler separador de nebulizado, quemador con cabezal de 10 cm y detector fotomultiplicador fue usado el software de manejo utilizado fue Winlab 32 Perkin Elmer versión 3.2. El capilar del nebulizador se colocó en el contenedor de la muestra para ser aspirada y se programó el software del equipo para que registrara los resultados en µg/L como unidad de concentración. Las condiciones de operación utilizadas para el análisis de las muestras para longitud de onda para arsénico de 197.7 nm se describen a continuación:

Cuadro 5. Condiciones de programa de espectro de absorción atómica.

Temp °C	Ramp time	Hold Time	Internal Flow
110	1	30	250
130	15	30	250
1300	10	20	250
2300	0	5	5
2450	1	3	250

Las curvas de calibración fueron obtenidas utilizando estándares certificados de arsénico preparados a partir de una solución concentrada de 1000 mg de metal/L marca Perkin Elmer Pure.

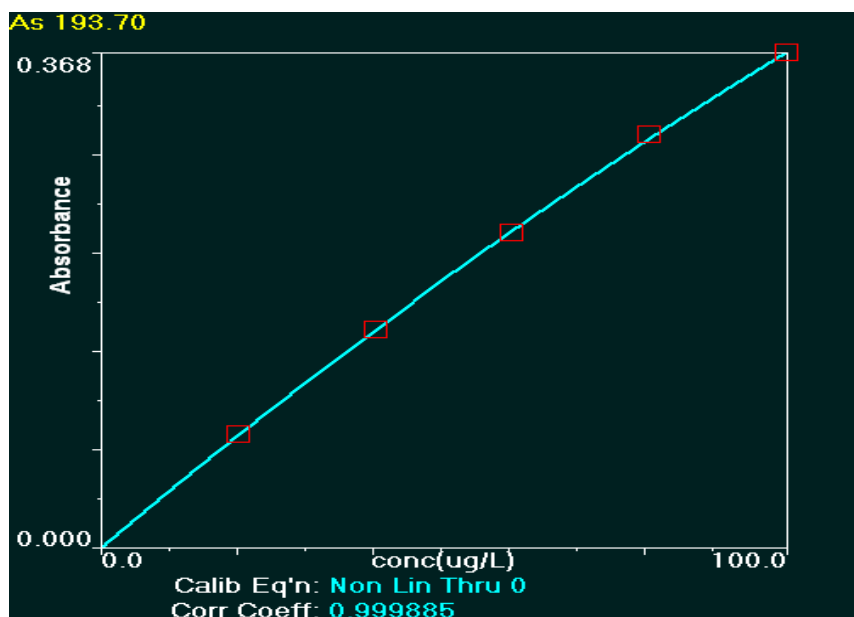


Figura 6 .Curva de calibración.

5.9 ABSORCIÓN DE ARSÉNICO EN PLANTAS DE MELÓN

Un experimento con los siguientes niveles de 0, 20, 40 y 60 mg L⁻¹ de As en agua fue establecido. Un sistema semi-hidropónico fue empleado al usar arena estéril como medio de soporte inerte; en donde las semillas de melón híbrido de SYNGENTA, ROGERS, germinaron. Para la nutrición de las plantas se empleó la solución nutritiva de Hoagland. Posterior a la fase de germinación, el agua de riego se aplicó al considerar diferentes concentraciones de arsénico (0,20, 40 y 60 mg L⁻¹), durante un periodo de 4 semanas.

A las 4 semanas, las muestras de hojas, tallos y raíz fueron colectadas. Estas se colocaron en cámara de secado para realizar la posterior cuantificación de

metales pesados en cada uno de estos órganos, siguiendo la metodología descrita anteriormente.

5.10 EVALUACIÓN DE ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA

A los 20, 25 y 30 días, la tasa fotosintética y conductancia estomática se cuantificaron empleando el Analizador infrarrojo de gas (IRGA por sus siglas en inglés), modelo LICOR 6400. Las condiciones de medición de fotosíntesis y conductancia estomática fueron las siguientes: flujo 500, concentración de CO₂ de 400, radiación fotosintéticamente activa 97, así mismo se determinó la concentración de clorofila se estimó con el medidor de clorofila.

5.11 CUANTIFICACIÓN DE ACTIVIDAD DE PEROXIDASAS

5.11.1 PREPARACIÓN DEL EXTRACTO ENZIMÁTICO

La extracción enzimática por planta y cada tratamiento se preparó al emplear 100 mL de agua destilada fría (– 4 °C) y 1 g de planta, se molió en mortero, luego se centrifugó durante 15 minutos a 1500 rpm., el sobrenadante fue conservado en refrigeración 5 °C hasta su uso.

5.11.2 DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE PEROXIDASA (PO)

Método Cuantitativo (Silva *et al.*, 1984)

En matraz Erlenmeyer de 50 mL se adicionaron 20 mL de tampón fosfato 0,2M, pH 6,0 y 2 mL de extracto enzimático estabilizando a 25 °C. Posteriormente, se adicionó 1 mL de guayacol al 0,5% y 1 mL de H₂O₂ al 0,08%, se adicionaron se homogenizó rápidamente y se realizaron 11 lecturas, la primera al tiempo 0 y una por minuto, a 470 nm utilizando como blanco la mezcla reactiva sin peróxido de hidrógeno. Una unidad de la enzima PO, se definió como la cantidad de extracto enzimático que acusó un aumento en la absorbancia de 0,001 U/min.

5.12 DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE CATALASA (CA)

La determinación de la actividad de catalasa se fundamenta en la descomposición de peróxido de hidrógeno, mediante la cuantificación del cambio de absorbancia por cada 30 s. En una celda de cuarzo se colocaron 250 µL de peróxido de hidrogeno 10 mM , se le adicionó 5 µL de extracto enzimático y 45 µL de buffer de fosfato 50 mM pH 7.0. Después, 5 lecturas a 240 nm cada 30 s fueron realizadas (Aebi, 1984).

5.13 ÁREA FOLIAR

El área de las hojas de cada planta se delimitó. Después, el programa ImageJ se empleó para obtener el área total de la figura. El programa es un manipulador de imágenes de acceso libre en la web en el siguiente link: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.

5.14 PESO SECO

El peso se determinó para cada parte de la planta: hojas, tallo y raíz. Una vez cortadas dichos órganos se colocaron en estufa de secado durante 12 horas a 60 °C y se realizó nuevamente la determinación del peso, obteniendo así la biomasa asociada a cada tratamiento.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El agua empleada en el riego de las unidades de producción muestreadas en las comunidades de Raymundo, San Pedro y Tlahualilo tiene como origen el Río Nazas, mientras que en Ceballos y Congregación es agua del subsuelo. Sin embargo, en ambos casos las concentraciones de As sobrepasan los límites de las normas (la Mexicana en agua de uso agrícola es 0.4 mg L^{-1} así como la de la OMS es 0.10 mg L^{-1} y es para agua de consumo humano) independientemente del origen de la muestra (Cuadro 6).

Cuadro 6. Concentraciones de As en agua y suelo letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD , $\alpha = 0.05$) entre las localidades.

Localidades	Concentración de As en Agua (mg L^{-1})	Concentración de As en Suelo(mg Kg^{-1})
Raymundo	1.091475 ^b	39.96832 ^b
San Pedro	1.661394 ^b	33.76198 ^b
Ceballos	29.64353 ^a	62.07124 ^{ab}
Congregación	35.797685 ^a	72.88358 ^a
Tlahualilo	1.484896 ^b	34.88604 ^b

La prueba de medias sugiere dos grupos diferentes en cuanto a la concentración de As en agua, los grupos están determinados por la fuente de agua; es decir, el grupo ^a son las localidades con agua de riego de pozo y corresponden a las concentraciones de As mayores con un rango de 29 a 35 mg L^{-1} mientras el grupo ^b se integra por las localidades donde el agua proviene del río y tienen un rango de 1 a 6 mg L^{-1} (Cuadro 6). La mayor concentración de As se encontró en muestras de agua de la localidad de

Congregación Hidalgo con 35.7 mg Kg^{-1} y fue estadísticamente similar a la concentración de As en el agua de la localidad de Ceballos (Cuadro 6).

En suelo la prueba de medias (HSD) identifica tres grupos que refleja la acumulación de este metal en el suelo mediante el riego en parcelas. El grupo ^b está determinado por localidades con sistema de riego combinado; es decir, en el ciclo primavera – verano se riega por medio de agua de río mientras en el ciclo otoño-invierno se acude a agua de pozo. Los grupos ^a y ^{ab} son los que presentan mayores concentraciones de As. Las concentraciones mayores se observan en la comunidad de Congregación con 72.88 mg Kg^{-1} los menores valores menores (33.76 mg Kg^{-1}) fueron encontrados en San Pedro (Figura 8).

Concetración de As en Suelo



Figura 7. Concentraciones de As en suelo en contraste con la nom-004-semarnat-2002. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes en las barras indican diferencia significativa (HSD $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.

6.1.1 ARSÉNICO EN SUELO

A nivel mundial se han realizado estudios para evaluar el impacto del arsénico en suelo ejemplo de ello es la investigación realizada por Pérez *et al.*, (2007) en suelo Argentino con valores de 2.1-8.2 mg Kg⁻¹, Imamul *et al.* (2006) en suelo de Bangladesh con 3.2-27.5 mg Kg⁻¹ y Whitmore *et al.*, (2008) en Florida E.U.A. encontró 148-435 µg Kg⁻¹ de As en los sedimentos del lago.

En México los índices de contaminación en suelo por As en diferentes estados han sido estimados. González (2005) determinó valores de As de 10.81 ppm en el Rio de Mololoa, Nayarit; Sarabia *et al.*, (2011) cuantificaron 0.302-1.243 mg Kg⁻¹ de As en el estado de San Luis Potosí, y Santos *et al.*, (2006) obtuvieron valores entre los 3.30 y 182.41 mg Kg⁻¹ de As en áreas de cultivo del estado de Zacatecas siendo estas regiones agrícolas y mineras.

En la Región Lagunera, Rosas *et al.* (1999) determinaron concentraciones de 11-30 µg g⁻¹ de As en suelo y Valdez (1999) determinó valores desde 1.3 a 273 ppm de As en los márgenes de PEÑALES.

En contraste, en este estudio, las concentraciones se encuentran por debajo de las encontradas son menores a las reportadas para el estado de Zacatecas, pero tan alarmantes como las de Bangladesh, la Florida, y en algunos estados del mismo México. El valor máximo encontrado fue de 72.88 mg Kg⁻¹.

Las comunidades de Raymundo, Tlahualilo y San Pedro poseen una menor acumulación de As probablemente porque durante una sesión del año se emplea agua de río la cual posee menor concentración de As que el agua subterránea.

La Norma “NOM-004-SEMARNAT-2002” indica una concentración permisible de hasta 41 mg Kg⁻¹ en suelo de uso agrícola. En la Figura 8 se visualiza las comunidades de Ceballos y Congregación de Hidalgo que sobre pasan los valores permisibles con 58,234 y 51,824 mg Kg⁻¹ respectivamente.

6.1.2 ARSÉNICO EN AGUA

A nivel mundial diversos países han reportado severas situaciones con relación con las concentraciones de arsénico en suelo, agua y alimentos. En Argentina, Pérez *et al.*, (2007) determinaron que la concentración de arsénico en agua es de entre 61.5 y 4550 µg L⁻¹ en Bangladesh Imamul *et al.*, (2006) determinaron concentraciones de 0.136 a 0.55 mg L⁻¹, en Grecia Katsoyiannis *et al.*, (2008) estimaron 20 µg L⁻¹ y en la India Rahman (2005) midieron desde 10 hasta 30 µg L⁻¹.

En agua corriente proveniente de ríos o lagos que es generalmente empleadas para la producción agrícola se tienen algunos datos como los siguientes: Whitmore *et al.* (2008), en agua de lago se obtuvieron valores de 17 a 115.4 µg L⁻¹ y en China Jia *et al.*, (2010) reportaron concentraciones de agua de río entre 11.57 y 11.75 mg Kg⁻¹.

En México, el hidroarsenicismo es un problema que se extiende a diferentes regiones del país. En Guadalajara, Jalisco se obtuvieron concentraciones medias de 14.7-101.9 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Hurtado *et al.*, 2006); en Rio Conchos, en Chihuahua fue posible cuantificar un máximo de 0.11 mgL^{-1} (Rubio *et al.*, 2010), en Hidalgo se obtuvieron concentraciones de As desde 40 a 480 μgL^{-1} (Pérez, 2004) y en Oaxaca los resultados arrojaron valores de 0.043 a 0.192 mg L^{-1} (Caballero *et al.*, 2010).



Figura 8. Concentraciones de As en agua en contraste con la NOM-001-ecol. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.

En La Comarca Lagunera se han realizado diversos estudios que indican valores grandes de As en agua; como el realizado por Leal *et al.* quienes reportan concentraciones oscilantes entre 0.025 y 0.034 mg L^{-1} , Ramírez-Vargas (2008) consignan valores de entre 95 y 258 $\mu\text{g L}^{-1}$ y Rosas *et al.* (1999)

al evaluar agua de las comunidades de Francisco I. Madero reportan $740 \mu\text{g g}^{-1}$, Tlahualilo con $590 \mu\text{g g}^{-1}$ y San Pedro con $490 \mu\text{g g}^{-1}$.

De la misma manera que estudios realizados con anterioridad en estas comunidades se muestra una concentración superior a las permitidas por las normas tanto de consumo como de uso agrícola donde los valores llegaron hasta los 35.79 mg L^{-1} . Por ello que el nivel de alarma aumenta enormemente ya que en estas pequeñas comunidades generalmente se emplea la misma agua para riego agrícola y para consumo sin darle ningún tipo de tratamiento adicional.

Cuadro 7. Valores de medias, desviación estándar y varianza de las concentraciones de arsénico (mg Kg^{-1}) en agua, suelo y órganos de melón.

<i>Variable</i>	<i>Media</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Varianza</i>
Agua	13,936	12,287	1,091	35,798	298,834
Suelo	48,714	17,705	33,762	72,884	313,462
Hojas	0,828	0,530	0,414	1,715	0,208
Tallo	0,787	1,142	0,028	2,617	1,305
Raíz	4,581	3,969	0,580	11,244	15,750
Fruto	0,203	0,357	0,023	0,841	0,128
Corteza	0,040	0,047	0,017	0,124	0,002
Flores	0,818	1,781	0,020	4,003	3,170
Semilla	0,391	0,835	0,012	1,885	0,698

Los estimadores estadísticos básicos de las variables involucradas se aprecian en el Cuadro 7. Los dato sugieren que fue posible identificar arsénico en los órganos de *Cucumis melo*. En otros estudios la concentración de arsénico en tejidos de melón fue indetectable (Curiel, 2009). Así como también se aprecia

que la concentración máxima de As ocurrió en la raíz y la mínima en la corteza del fruto o pericarpio.

6.2 CONCENTRACIÓN DE AS EN LOS DIFERENTES ÓRGANOS DE LA PLANTA DE MELÓN

La seguridad alimentaria de todos los productos de consumo es vital. Por ello es importante definir su calidad para consumo; ello incluye un análisis fisicoquímico, organoléptico, microbiológico y actualmente de metales pesados (CODEX STAN 193-1995).

Cuadro 8. Concentraciones de As en los diferentes órganos de *Cucumis melo* en diferentes localidades de la Comarca Lagunera. Las letras diferentes entre columnas indican diferencia significativa (HSD $\alpha = 0.05$).

Localidades	Órganos de la Planta						
	Hojas	Tallo	Raíz	Fruto	Corteza	Flor	Semilla
Raymundo	0,768 ^{ab}	0,047 ^c	3,450 ^b	0,047 ^b	0,124 ^a	0,0266 ^b	0,018 ^b
San Pedro	0,817 ^{ab}	0,027 ^c	3,540 ^b	0,036 ^b	0,016 ^b	0,020 ^b	0,011 ^b
Ceballos	0,425 ^b	2,617 ^a	11,243 ^a	0,840 ^a	0,019 ^b	0,030 ^a	1,885 ^a
Congregación	1,714 ^a	0,033 ^c	6,580 ^b	0,022 ^b	0,020 ^b	0,021 ^b	0,022 ^b
Tlahualilo	0,414 ^b	1,208 ^b	4,087 ^b	0,065 ^b	0,022 ^b	0,019 ^b	0,018 ^b

6.2.1 ARSÉNICO EN VEGETALES

Durante los últimos años se ha presentado el arsenicismo como una problemática severa en donde las diversas fuentes de contaminación se tienen que evaluar incluyendo los alimentos, como frutas y vegetales que han sido regadas o cultivadas en un ambiente contaminado. Es por ello que diversos

investigadores han evaluado este aspecto al igual que en la presente investigación.

En estudios realizados, a nivel mundial, han presentado un nivel variable de transferencia de As a los alimentos como los siguientes: en la leche valores entre 0.45 a 9.13 ng L⁻¹, en alfalfa concentraciones de 0.07 a 1.5 µg g⁻¹ (Pérez *et al.*, 2007) y el papa valores entre 0.028 a 0.059 mg Kg⁻¹, en maíz entre 0.012-0.064 mg Kg⁻¹ (Carrión, 2009).

En México se ha cuantificado As en cultivos de acelga (0.37 mgKg⁻¹), higo (1.11 mgKg⁻¹), nopal (0.14 mgKg⁻¹), alfalfa (0.08 mgKg⁻¹), lechuga, calabacita, pepino, apio, chile, perejil, cilantro y coliflor (0.002 mg Kg⁻¹) por Sarabia *et al.* (2011). Sin embargo, en jitomate, zanahoria, lechuga, maíz, frijol (Caballero *et al.*, 2010), cebolla, melón y chile las concentraciones de As fueron menores a las de los límites de detección (Curiel, 2009). En cuanto a transferencia de arsénico se observó una acumulación del metal en alfalfa de 0.9-1.6 µg g⁻¹ y en leche cruda de 0.9- 27.4 ng g⁻¹ (Rosas *et al.*, 1999).

La problemática del arsenicismo ha llevado a evaluar el grado de transferencia del metal a los diversos órganos de la planta y visualizar la parte que consumimos los seres humanos. En este trabajo de investigación se determinaron valores de entre 0.022 y 0.840 mg Kg⁻¹ en la pulpa del melón (Cuadro 8), lo cual indica que en efecto las concentraciones grandes de arsénico en suelo y en agua permiten el transporte hacia el fruto.

Las concentraciones de As en hojas muestran estadísticamente 3 grupos que en la Figura 10 es posible distinguir con claridad; que las comunidades de Raymundo, San Pedro y Congregación superan los valores de la norma CODEX-STAN 193-1995, la cual sugiere una concentración de 0.5 mg Kg^{-1} referida a un vegetal para consumo humano. Sin embargo, es importante señalar que las partes constitutivas del melón con excepción del fruto (pulpa) no son comestibles, pero se emplea dicho valor a modo de comparativo en un contexto de bioseguridad.

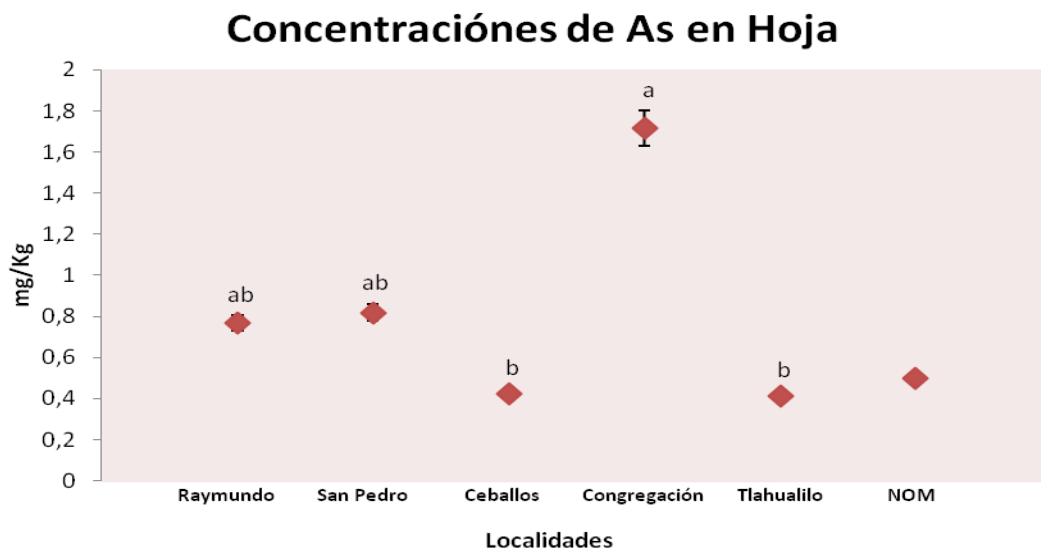


Figura 9. Concentraciones de As en Hojas de *Cucumis melo* contraste con la norma CODEX-STAN 193-1995. Las barras se definieron Por Media $\pm$ Error estándar; letras diferentes en las barras indican diferencia significativa (HSD a $\alpha = 0.05$) entre las diferentes localidades.

Las concentraciones de As en tallo muestran 3 grupos; la concentración mayor del metal se encuentra en la comunidad de Ceballos con 2.617 mg Kg^{-1} , la cual

sobrepasa la norma de seguridad alimentaria, ello cual sugiere una transporte del metal a lo largo de la planta como lo muestra la Figura 11.



Figura 10. Concentraciones de As en tallo de *Cucumis melo* en diferentes localidades de la Comarca Lagunera y contraste con la norma Codex-Stan 193-1995. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes en las barras indican diferencia significativa (HSD, $\alpha = 0.05$).

En la cuantificación de arsénico en raíz es posible observar dos grupos. La localidad de Ceballos presenta la concentración mayor con 11.243 mg/Kg. La raíz es entonces el órgano con mayor bioacumulación del metal. En la Figura 12 se puede observar que las raíces de plantas en todas las localidades tuvieron concentraciones de As superiores a las establecidas en la norma.



Figura 11. Concentraciones de As en Raíz de *Cucumis melo* en diferentes localidades de la Comarca Lagunera en contraste con la norma CODEX-STAN 193-1995. Las barras se definieron Por Media $\pm$ Error estándar; letras diferentes en las barras indican diferencia significativa (HSD, $\alpha = 0.05$).

En fruto es posible observar una concentración de 0.841 mg Kg^{-1} en la localidad de Ceballos, la cual sobrepasa lo establecido por la norma que es de 0.5 mg Kg^{-1} . Esto define una situación de alerta por la evidencia de transporte del metal a través de los diferentes órganos de la planta. En el resto de las localidades (Raymundo, San Pedro, Congregación y Tlahualilo) la concentración de As en los frutos de melón fue menor a la Norma pero estadísticamente no difieren (Figura 13).

Concentración de As en Fruto

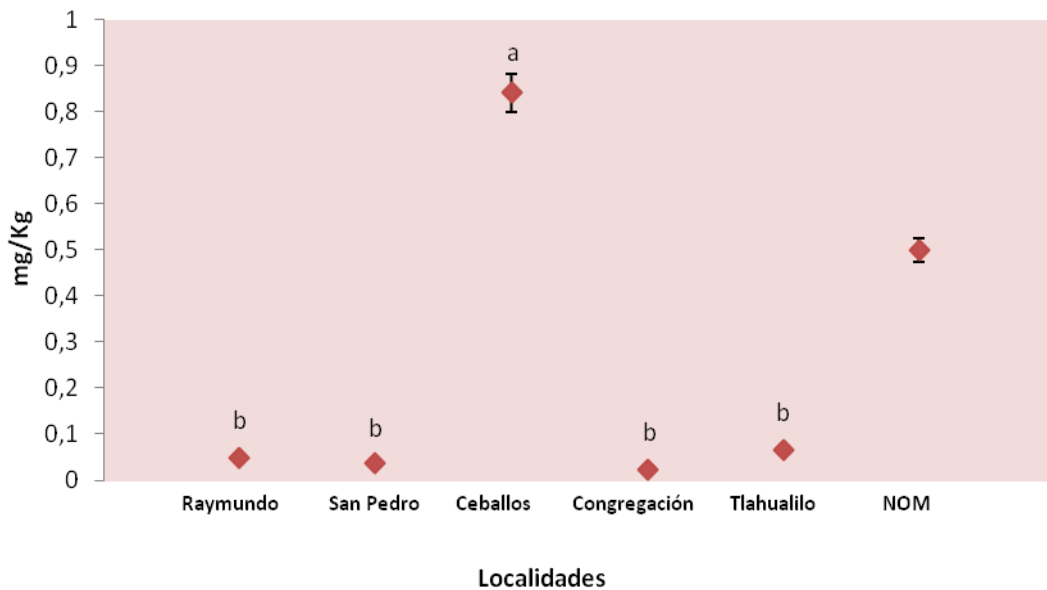


Figura 12. Concentraciones de As en fruto de *Cucumis melo* en diferentes localidades de la Comarca Lagunera en contraste con la norma Codex-Stan 193-1995. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes en las barras indican diferencia significativa (HSD a $\alpha = 0.05$).

En el pericarpio del melón o corteza, las concentraciones de arsénico fueron menores a la norma y los límites de seguridad de consumo. Las concentraciones de As fluctuaron en un rango de 0.016 a 0.124 mg Kg⁻¹ en las localidades evaluadas (Figura 14).

Concentración de As en Corteza

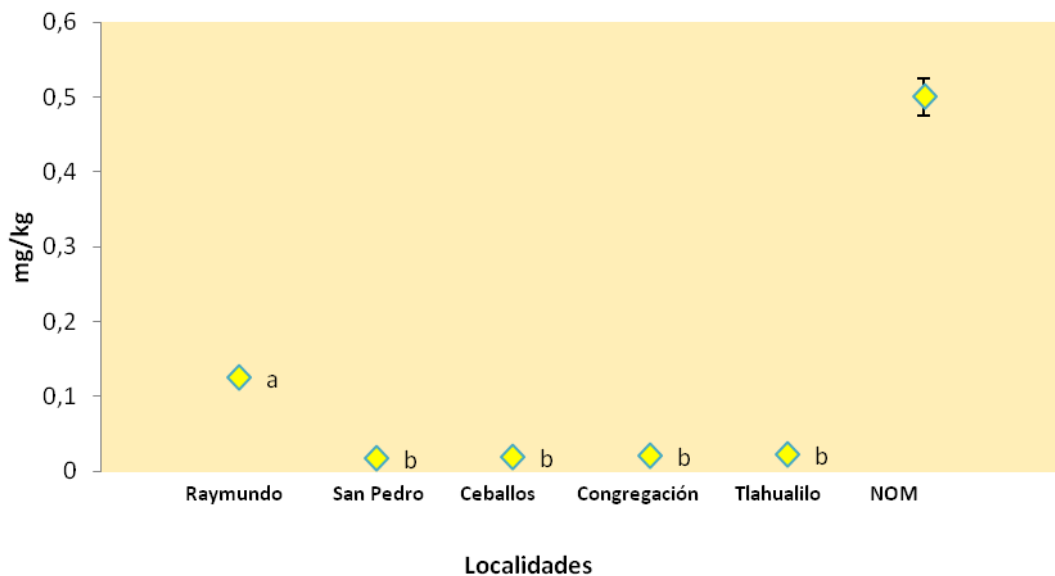


Figura 13. Concentraciones de As en cáscara o pericarpio del fruto de *Cucumis melo* de cinco localidades de la Comarca Lagunera en contraste con la norma codex-stan 193-1995. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes en las barras indican diferencias significativas (HSD $\alpha = 0.05$).

La concentración de As en las flores de melón (0.030 mgKg^{-1}) en la localidad de Ceballos fue estadísticamente mayor que la encontrada en las otras localidades. Sin embargo, en todos los casos las concentraciones de arsénico en las flores de la planta de melón se encuentran por debajo de la norma y se encuentran en el rango de $0,019$ a $0,030 \text{ mg Kg}^{-1}$ (Figura 15).

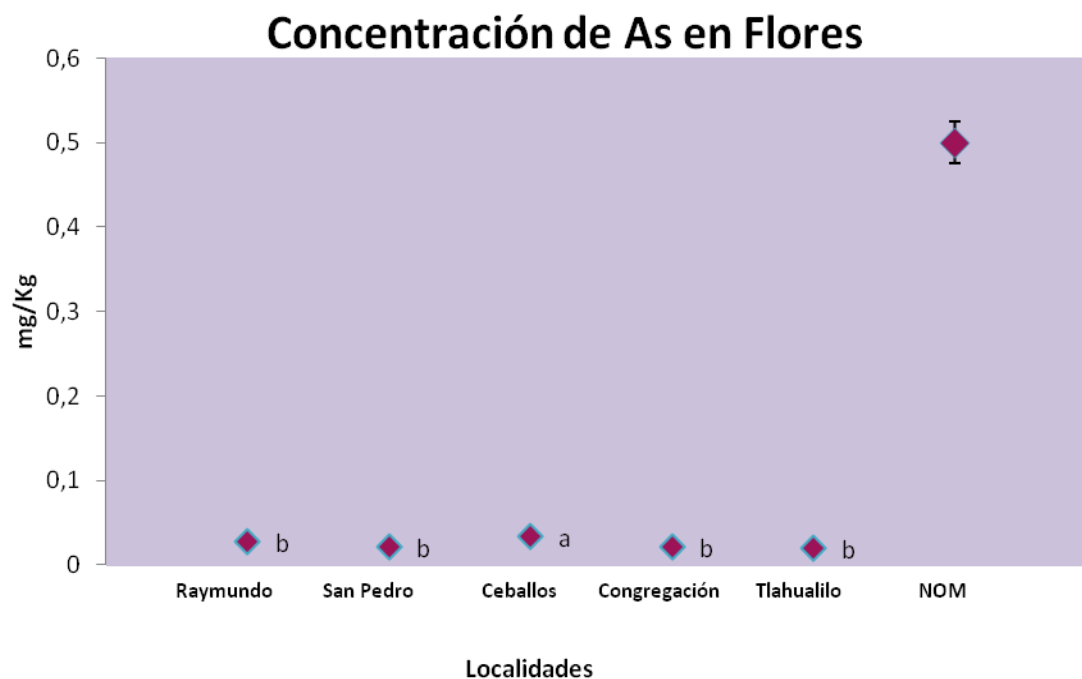


Figura 14. Concentraciones de As en flores de *Cucumis melo* en cinco localidades de la Comarca lagunera en contraste con la norma Codex-stan 193-1995. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes en las barras indican diferencias significativas (HSD $\alpha = 0.05$) entre localidades.

Las concentraciones de arsénico en semilla coinciden de igual manera que en fruto en la comunidad de Ceballos la cual muestra una variación significativa entre los valores de las diferentes comunidades. En donde cuantificó 1.88 mg Kg^{-1} siendo esta la mayor concentración en la población de Ceballos en comparación con las otras comunidades. En este caso la concentración de As en las semillas de frutos colectados en la localidad de Ceballos fue superior a la establecida por la Norma (Figura 16).

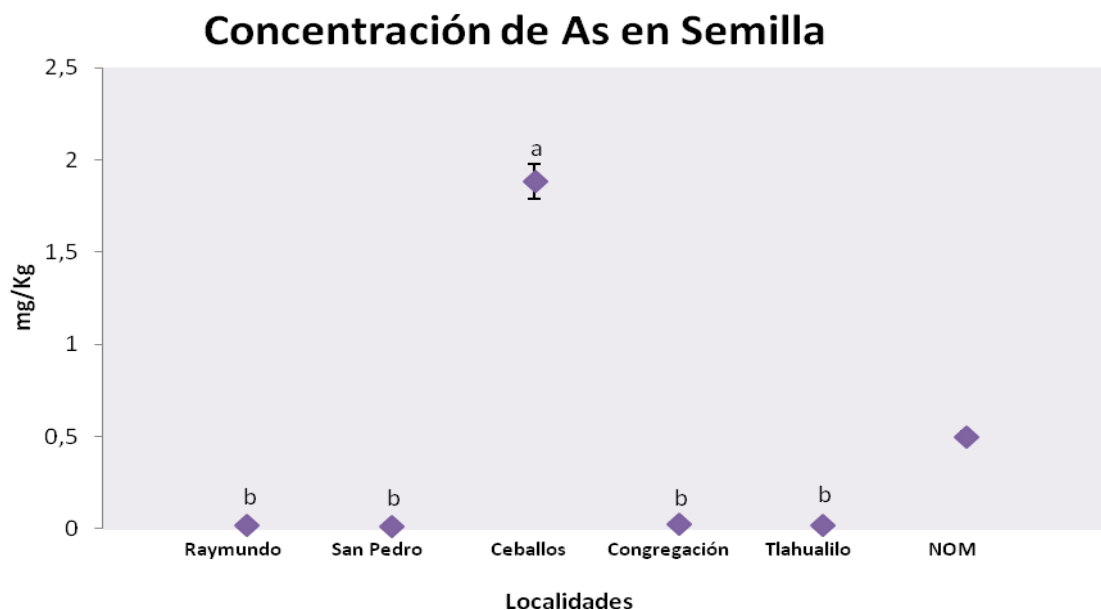


Figura 15. Concentraciones de As en semillas de *Cucumis melo* en cinco localidades de la comarca lagunera en contraste con la norma Codex-stan 193-1995. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes en las barras indican diferencias significativas (HSD a $\alpha = 0.05$) entre localidades.

Tanto las concentraciones de As en cada uno de los órganos de la planta, como las concentraciones en suelo y en agua muestran una tendencia similar en cuanto a la distribución del arsénico y las comunidades con los niveles de contaminación más severos.

6.3 ÍNDICE DE BIOACUMULACIÓN

El índice de bioacumulación se calculó a partir de la formula siguiente:

$$IB = \frac{\text{Concentración de As en Planta}}{\text{Concentración de As en Suelo}}$$

Las comunidades de Tlahualilo, San Pedro y Raymundo poseen los IB menores, ya que considerando la concentración del metal absorben un gran porcentaje menor al que tienen disponible. Esto permite visualizar que la planta tiene diversos mecanismos de control de la cantidad del metal que ingresa a la misma, moderando así la toxicidad y el estrés producido en ella. Sin embargo, el IB de la comunidad de Ceballos, muestra que se puede absorber mas arsénico si es está disponible en el suelo y en el agua. Es posible visualizar en el Cuadro 9 que al incrementar la concentración de As en agua y en suelo, la planta incrementará la absorción del mismo con las posibles consecuencias en la cadena trófica particularmente para la población humana.

Cuadro 9. Índice de bioacumulación en la planta (realizando la suma de todos los órganos evaluados) contrastada con el suelo.

Índice de Bioacumulación			
Localidad	[Planta]	[Suelo]	IB
Raymundo	4.48	39.96832	0.11
San Pedro	4.47	33.76198	0.13
Ceballos	21.03	62.07124	0.34
Congregación	8.41	72.88358	0.12
Tlahualilo	5.84	34.88604	0.17

6.4 ÍNDICE DE TRASLOCACIÓN

El índice de traslocación se calculó de acuerdo a Abichequer y Bohnen (1998), empleando la siguiente ecuación:

$$TI\% = \frac{\text{Acumulación en la parte aérea (hojas y tallo)}}{\text{Acumulación neta (planta)}} \times 100$$

Es posible visualizar que la concentración de As en la planta de melón, en la comunidad de Ceballos, es mayor que al resto; sin embargo, el Índice de Translocación a hojas y tallos es relativamente menor que el resto; esto puede deberse a que la mayor acumulación de este metal en la planta no se encuentra en hojas y tallos sino en la raíz y otras porciones de la planta como lo indican los datos del Cuadro 10. Este puede ser un mecanismo que permite mantener bajas concentraciones pequeñas de As en la parte aérea a pesar de que las concentraciones en el suelo se incrementen, por lo que sería interesante estudiarlo con mayor detalle.

Cuadro 10. Índice de traslocación.

Indíces de Traslocación			
Localidad	[Hojas y Tallo]	[Planta]	TR%
Raymundo	0,815605	4,48	18,193444
San Pedro	0,854315	4,47	19,1066399
Ceballos	3,042285	21,03	14,4634134
Congregación	1,747536	8,41	20,7693004
Tlahualilo	1,622978	5,84	27,812462

Cuadro 11. Matriz de Correlación de Pearson. Correlaciones entre concentraciones de As y las partes de la planta. **. La correlación es significativa al nivel 0,01. *. La correlación es significativa al nivel 0,05.

	Agua	Suelo	Raíz	Tallo	Hojas	Flores	Corteza	Fruto	Semillas
Agua <i>P(r=0)</i>	1,000 <i>0.000***</i>	0,985 <i>0,0021**</i>	0,795 <i>0,1083 ns</i>	0,327 <i>0,5911 ns</i>	0,521 <i>0,3679 ns</i>	0,507 <i>0,3826 ns</i>	-0,412 <i>0,4907 ns</i>	0,479 <i>0,4139 ns</i>	0,511 <i>0,3791 ns</i>
Suelo <i>P(r=0)</i>		1,000 <i>0.000***</i>	0,724 <i>0,1670 ns</i>	0,225 <i>0,7157 ns</i>	0,597 <i>0,2868 ns</i>	0,421 <i>0,4795 ns</i>	-0,271 <i>0,6592 ns</i>	0,329 <i>0,5136 ns</i>	0,425 <i>0,4755 ns</i>
Raíz <i>P(r=0)</i>			1,000 <i>0.000***</i>	0,800 <i>0,1036 ns</i>	-0,090 <i>0,8857 ns</i>	0,923 <i>0,0255*</i>	-0,393 <i>0,5127 ns</i>	0,911 <i>0,0311*</i>	0,924 <i>0,0247*</i>
Tallo <i>P(r=0)</i>				1,000 <i>0.000***</i>	-0,631 <i>0,2534 ns</i>	0,895 <i>0,0400*</i>	-0,352 <i>0,5607 ns</i>	0,911 <i>0,0315*</i>	0,896 <i>0,0397*</i>
Hojas <i>P(r=0)</i>					1,000 <i>0.000***</i>	-0,421 <i>0,4755 ns</i>	-0,066 <i>0,9163 ns</i>	-0,460 <i>0,4349 ns</i>	-0,422 <i>0,4783 ns</i>
Flores <i>P(r=0)</i>						1,000 <i>0.000***</i>	-0,253 <i>0,6808 ns</i>	0,999 <i>0,000***</i>	0,999 <i>0,000***</i>
Corteza <i>P(r=0)</i>							1,000 <i>0.000***</i>	-0,246 <i>0,6894 ns</i>	-0,254 <i>0,6797 ns</i>
Fruto <i>P(r=0)</i>								1,000 <i>0.000***</i>	0,999 <i>0,000***</i>
Semillas <i>P(r=0)</i>									1,000 <i>0.000***</i>

No existe una correlación significativa entre los valores de As en suelo y agua con los diferentes órganos de la planta; sin embargo, se sugiere un muestreo más exhaustivo en donde un mayor número de muestras permitirá disminuir la varianza y así pueda ser más clara y estadísticamente significativa la correlación entre estos elementos.

6.5 ACTIVIDAD DE PEROXIDASAS

En la Figura 17 es posible observar un aumento sustancial entre la cantidad de peroxidasas presentes en el extracto de las plantas sometidas a una concentración de arsenito de sodio de $60 \mu\text{g L}^{-1}$, en comparación con las del control que son las menores concentraciones obtenidas. Las peroxidasas son enzimas que se encargan de los procesos de detoxificación del organismo transformando el H_2O_2 en H_2O y O_2 , por ello, es importante identificar una posible asociación entre la actividad de las enzimas y la concentración de arsénico presente en estas plantas; se sabe que la planta aumenta sus mecanismos de detoxificación para la eliminación de los radicales libres de oxígeno (ROX) generados.

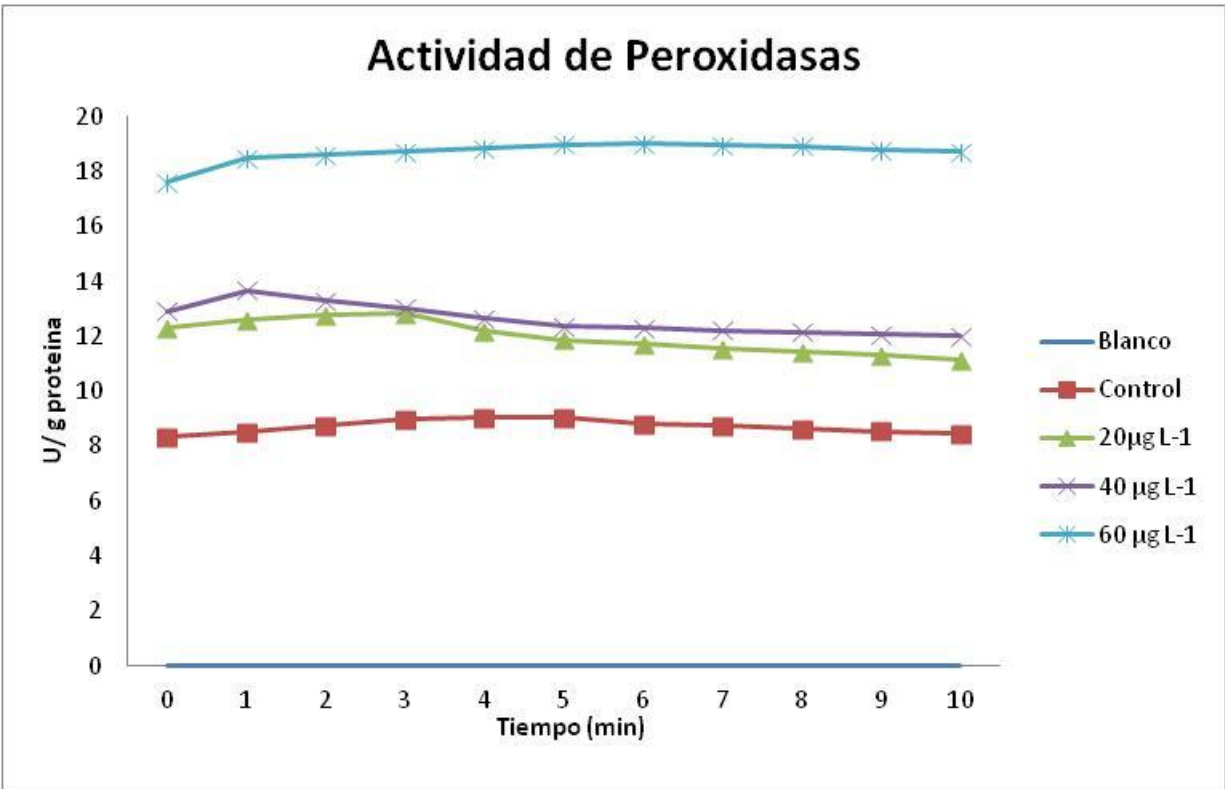


Figura 16. Actividad de peroxidasas en hojas de melón sometido a diferentes concentraciones de As.

6.6 ACTIVIDAD DE CATALASAS

Un comportamiento similar al de las peroxidasas presenta las catalasas en donde la mayor concentración de enzima la tuvo el tratamiento que contiene 60 µg L⁻¹ el aumento significativo entre los tratamientos se asocia a la reacción que presenta la planta ante el estrés causado por el arsénico.

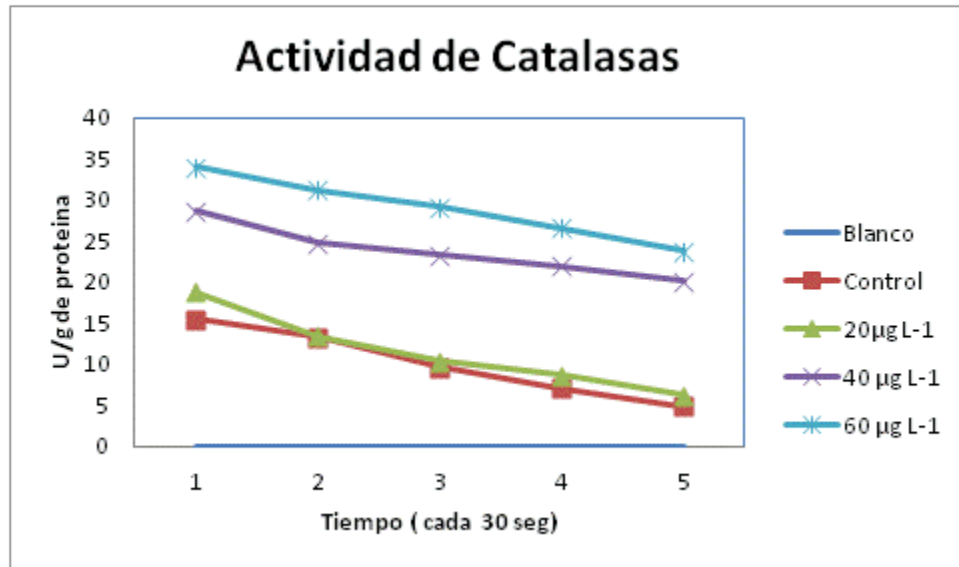


Figura 17. Actividad de catalasas en hojas de melón en diferentes concentraciones de As.

6.7 ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA, CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA E ÍNDICE DE CLOROFILA

El análisis estadístico de los datos muestra interesantes, ya que existe una diferencia significativa entre los tratamientos (Cuadro 12). El tratamiento de 20 µg L⁻¹ el que muestra una significativamente mayor tasa fotosintética (87.74 µmolCO₂ m⁻² s⁻¹) significativamente mayor, al igual que un valor aumentado de conductancia estomática. En el punto donde se difiere es que el control presentó un mayor índice de clorofila que los tratamientos, siendo similar estadísticamente el control y el tratamiento de 20 µg L⁻¹.

Cuadro 12. Actividad Fotosintética, Conductancia estomática e Índice de Clorofila

	FOTOSINTESIS	CONDUCTANCIA	CLOROFILA
Control	73.31 b	75.33 b	179.33 a
20 mg/ L	87.74 a	89.07 a	179.04 a
40 µg/ L	60.97 c	57.80 c	168.67 b
60 µg/ L	42.88 d	43.82 d	161.15 c

6.8 INDICADORES DE CRECIMIENTO

Es posible visualizar que la concentración de arsénico limita el crecimiento de las plantas de acuerdo a los diferentes índices de crecimiento mostrados en el Cuadro 13. El tratamiento de 20 µg L⁻¹ presenta un crecimiento mayor en comparación con el control. Ello no suele ser lo esperado o predecible de acuerdo a Lepp (1981), quien establece que los crecimientos pobres en el cultivo de alfalfa y cebada se deben al arsénico soluble en los suelos.

Cuadro 13. Indicadores de Crecimiento

	As en Planta (mg/ Kg)	Área (cm ²)	Raíz (cm)	Numero de hojas	Longitud (cm)	Peso Total (g)
Control	0.0001d	70.28 b	9.3 b	6.0 ab	26.7 b	0.7563 ab
20 mg/ L	1.871c	85.76a	11.3 a	6.3 a	31.3 a	1.007 a
40 mg/ L	5.923 b	65.73 c	9.8 ab	5.0 ab	24.3 c	0.64 ab
60 mg/ L	14.700 a	41.46 d	6.7 c	4.7 b	18.0 d	0.544 b

Woolson (1975a) concluyó que diciendo que niveles bajos de fósforo adicionados a un suelo contaminado con arsénico, este sería desplazaría del suelo hacia la planta y por lo tanto aumentarían el grado de toxicidad así mismo mayores aplicaciones de fósforo competirían con el arsénico en la superficie de la raíz y disminuirían la toxicidad. Wells y Richardson (1985) observaron que el fosfato era un inhibidor competitivo en la toma de arseniato.

6.9 PESO SECO

La variación observable en el Cuadro 14 se relaciona con la cantidad de biomasa que existe en cada tratamiento. La concentración de $20 \mu\text{g L}^{-1}$ es asocia a mayores cantidades de materia seca en cada uno de los órganos de la planta y corresponde a una biomasa total de 1.008 g.

Cuadro 14. Peso Seco

	Peso-hojas (g)	Peso-tallo (g)	Peso-raíz (g)	Sumatoria (g)
Control	0.622	0.231	0.137	0.990 b
20 $\mu\text{g/ L}$	0.538	0.256	0.213	1.008 a
40 $\mu\text{g/ L}$	0.443	0.200	0.063	0.707c
60 $\mu\text{g/ L}$	0.375	0.105	0.065	0.545 d

VII. CONCLUSIONES

1. *Cucumis melo* absorbe arsénico en sus diferentes órganos y los acumula de forma descendiente desde la raíz hasta las flores.
2. La mayor concentración encontrada en raíz fue de 11.24 mg Kg^{-1} , en plantas de melón en la comunidad de Ceballos, mientras que en fruto el valor mayor fue de 0.840 mg Kg^{-1} en la misma comunidad.
3. La variación en la cantidad de arsénico, en suelo y en agua, depende del origen del agua con la que se irrigan las diferentes hortalizas, si estas son de agua de río o de agua subterránea.
4. Los índices de crecimientos mayores los presentó el tratamiento de $20 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$, tanto en área foliar, tamaño, peso seco, longitud de raíz y número de hojas.
5. Concentraciones grandes de arsénico limitan el crecimiento de plantas de melón, puesto que las mayores concentraciones provocaron una disminución significativa del crecimiento, tasa fotosintética, índice de clorofila y peso seco.
6. Las cantidades de las enzimas catalasa y peroxidasas aumentaron proporcionalmente a la concentración de As.

VIII. LITERATURA CITADA

1. Abichequer, A.D. y Bohnen, H. 1998. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. R. Bras. Ci. Solo, 22:21-26.
2. Adriano, D.C., Wenzel, W.W., Vangronsveld, J., Bolan, N.S. 2004. Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. Geoderma 122: 121-142.
3. Aebi H. 1984. Catalase in vitro. Methods Enzymol.105 (1): 121-126.
4. ASERCA (Apoyos Y Servicios A La Comercialización Agropecuaria) Consultado 31/09/2012. Apoyo y Servicios a la Comercialización Agropecuaria. <http://www.aserca.gob.mx>
5. ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 2003. División de Toxicología . Arsenic. CAS#: 7440-38-2. www.atsdr.cdc.gov/
6. ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 2007. Public Health Statement. Arsenic. CAS#: 7440-38-2. www.atsdr.cdc.gov/
7. Benin A.L., Sargent J.D., Dalton M. y Roda S. 1999. High Concentration of heavy metals in Neighborhoods Near Ore Smelters in North Mexico. Environment Health Perspectives Vol. 107,4 107:279-284.
8. BEST (Board on Environmental Studies and Toxicology) 2001. Arsenic in drinking water: 2001 update. National Academy Press, Washington D.C., 225pp <http://www.nap.edu/books/030976293/html> (consulta:20/06/2012)
9. Caballero G. P.U., Carrillo- Rodríguez J.C., Gómez- Ugalde R.M., Jerez-Salas M.P. 2010. Presencia de Arsénico en pozos y en cultivo en Oaxaca, México. Agronomía Mesoamericana 21(1):177-184 ISSN: 1021-7444
10. Carbonell B.A.A., Burló C.F.M., Mataix-B.J.J. 1995. Arsénico en el sistema suelo-planta (Significado ambiental) Universidad de Alicante Ed. Espagracic I.S.B.N. 84-7908-192-9

11. Carrión S.X.M. 2009. Análisis de la concentración de arsénico en tres alimentos Papa (*Solanum tuberosum*), Maíz (*Zea mays*) y leche cruda Producidas en las zonas afectadas por el volcán Tungurahua (Guano Penipe). Tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
12. Comisión Nacional del Agua Programa de red de monitoreo, dirección de agua potable, infraestructura urbana, Torreón Coahuila. 2006.
13. Curiel M.N.F. 2009. Identificación y cuantificación de compuestos tóxicos inorgánicos en cebolla, chile, melón, suelos de cultivo y agua de riego de la Comarca Lagunera. Tesis Licenciatura. Universidad Juárez Del Estado De Durango.
14. Davies K.J.A., Lin S.W. y Pacific R.E. 1987. Protein damage and degradation by oxygen radicals. IV. Degradation of denatured protein. J. Biol. Chem. 262, 9914-9920.
15. Duan C, y Wang H. 1992. Effects of heavy metals on the content of nuclear acids and nuclear enzymatic activities in the root tips of bean (*Vicia faba*). Environment Science 13 (5) 31-35
16. EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). 2012. (U.S. EP). Artículo 300 del título 40 código de reglamentos federales (FRL-7796-6)
17. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura). 2011. Consulta de bases de datos de producción mundial y comercio internacional de Melón <http://www.fao.org/corp/statistics/es/>
18. Foy C.D., Chaney R.L., y White M.C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. Annu. Rev. Plant Physiology. 29: 511-566
19. Foyer C.H., Lelandais M., Kunnert K.J. 1994. Photooxidative stress in plants. Physiologia Plantarum. 92: 696-717.
20. González T. L. 2005. Metales pesados y sus especies químicas en sedimentos del Río Mololoa, Nayarit: determinación previa y posterior a una obra de dragado. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nayarit. Tepic, Nayarit, México.

21. Gutiérrez M., Alarcón H.M.T., Camacho L.M. 2009. Geographical distribution of arsenic in sediments within the Rio Conchos Basin, Mexico. *Environ Geol* 57:929-935 DOI 10.1007/s00254-008-1371-4
22. Harvey C.F., Ashfaq K.N., Yu W., Badruzzaman A.B.M., Ashraf A.M., Oates P.M., Michael H.A., Neumann R.B., Beckie R., Islam S. and Ferroze A.M. 2006 Groundwater dynamics and arsenic contamination in Bangladesh. *Chemical Geology* Vol.228, ISSUES 1-3 112-136
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.11.025>
23. Hurtado J.R. y Gardea T.J.L. 2006. Arsenic in drinking water in the Los Altos de Jalisco region of Mexico. *Rev Panam Salud Pública*.20(4):236–47.
24. Imamul H.S.M., Joardar J.C., Parvin S., Correll R., and Naidu R. 2006. Arsenic Contamination in food chain Transfer of arsenic into Food Materials through Groundwater Irrigation. *J. Health Popul. Nutr.* 24(3): 305-316 ISSN 1606-0997.
25. Inzé D., Montagu M.V. 2002. *Oxidative Stress in Plants*. Taylor and Francis. London and New York. ISBN 0-415-27214-9
26. Jia L., Wang W., Li Y., and Yang L. 2010. Heavy Metals in Soil and Crops of an Intensively Farmed Area: A case Study in Yucheng City, Shandong Province, China. *Environmental Research and Public Health*. 7: 395-412. ISSN 1660-4601
27. Katsoyiannis I.A., Zikoudi A., Hug S.J. 2008. Arsenic removal from groundwaters containing iron, ammonium manganese and phosphate: A case study from a treatment unit in northern Greece. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Department of Water Resources and Drinking Water. *Desalination* 224, 330-339
28. Khan S.I., Mottashir A.A.K., Yunus M., Rahman M., Kumar H.S., Vahter M., and Wahed M.A. 2010. Arsenic and Cadmium in Food-chain in Bangladesh- An Exploratory Study. *J. Health Popul Nutr.* 28(6): 578-584 ISSN 1606-0997.
29. Leal-Ascencio M.T. y Gelover Santiago S. (ND) Evaluación de Acuíferos de la Mesa del Norte. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Informe en línea.

www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/congresos/.../CAO-35.pdf

30. LEPP, N.W. 1981. Effect of heavy metals pollution on plants. Effects of trace metal on plant function. Applied Science Publishers. London and New Jersey. Vol. 1.
31. Matschullat, J., 2000. Arsenic in the geosphere – a review. Science of the Total Environment 249: 297-312.
32. Meharg, A.A. y Macnair, M.R. 1991. "Uptake, accumulation and translocation of arsenate tolerant and non tolerant *Holcus lanatus* L.". New Phytol. 117: 225-231.
33. Mukherjee A., Kumar S.M., Amir H.M., Ahamed S., Das B., Nayak B., Lodh D., Mahmudur R.M., and Chakraborti D. 2006. Global Perspective with Emphasis on the Asia Scenario. J Health Popul. Nutr. 24(2):142-163 ISSN 1606-0997
34. Narh H. 1977. Medical and Biologic Effects of Environmental Pollutants Arsenic. 5a ed. Angola. Ximar. pp 34-54.
35. Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2011. Revisado (22-10-2011) www.unep.org/spanish/
36. Organización Mundial de la Salud (OMS). 2011. Revisado (03-10-2011) <http://www.who.int/es/>
37. Pérez- Moreno Fidel. 2004. Dinámica del arsénico en aguas subterráneas de pozos y sedimentos del Distribuidos General de Agua Potable de Zimapán Hidalgo. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
38. Pérez-Carrera, A.,Fernandez-Cirelli, A. 2007. Problemática del arsénico en la llanura sudeste de la provincia de Córdoba. Biotransferencia a leche bovina. 9(1): 123-135 ISSN: 1514-6634/ 1668-3498
39. Perl Treves, R. Perl, A. 2002. Oxidative stress: an introduction. In Oxidative stress in plants. Inzé D., Van Montagu, M. Taylor, Francis (eds.) London UK. pp. 1-32.
40. Pierre Jacquot Jean.2009. Oxidative Stress and Redox. Regulation in plants. Vol. 52. Academic Press ISBN 0123786223, 9780123786227.

41. Pitrat M, Hanelt P y Hammer K. 2000. Some comments on intraspecific classification of cultivars of melon Cucurbitaceae. *Acta Horticulturae* 510:29-36.
42. Rahman M.A., Hasegawa H., Rahman M.M., Miah M.A.M. 2008. Arsenic Accumulation in Rice (*Oryza sativa* L.) Human Exposure through Food Chain. *Ecotoxicology and Environment Safety*. Vol. 69 (2), 317-324 ISSN: 0147-6513 doi: 10.1016/j.ecoenv.2007.01.005
43. Rahman M.M., Kumar S.M., Ahamed S., Kumar C.U., Amir H.M., Das B. Lodh, D., Chandra S.K., Pati S., Kaies I., Kishore B.A., and Chakraborti D. 2005. The magnitude of arsenic contamination in groundwater and its health effects to the inhabitants of the Jalangi-one of the 85 arsenic affected blocks in West Bengal, India. *Science of the total Environment* 338: 189-200. doi:10.1016/j.scitotenv
44. Ramírez- Vargas R. 2008 *Arsénico en el agua subterránea de la comarca Lagunera*. Buenaval. Universidad Iberoamericana de Torreón. *Revista de Investigación Social*. Ed.7
45. Rosas I., Belmont R., Armienta A. y Baez A.1999. Arsenic Concentration in water, soil, milk and forage in Comarca Laguna, Mexico. *Water, Air and Soil Pollution*. 112: 133-149.
46. Rubio-Arias H., Quintana C., Jiménez-Castro J., Quintana R., Gutiérrez M. 2010. Contamination of the Conchos River in Mexico: Does It Pose a Health Risk to Local Residents? *International Journal of Environmental Research and Public Health* 7: 2071-2084. ISSN 1660-4601
47. Sachs, R.M. y Michaels, J.L. 1971. "Comparative phytotoxicity among four arsenical herbicides". *Weed Science* 19: 558-564.
48. Santos-Santos E., Yarto- Ramirez M., Gavilan Garcia I., Castro Díaz J., Gavilán García A., Rosiles R., Suárez S., López Villegas T. 2006. Analysis of Arsenic, Lead and Mercury in Farming Areas with Mining Contaminated Soils at Zacatecas, Mexico. *Journal of the Mexican Chemical Society* 20:(002) pp57-63.
49. Sarabia- Meléndez I.F., Cisneros Almazán R., Aceves de Alba J., Durán García H.M., Castro Larrogoitia J. 2011. *Calidad del Agua de Riego en suelos Agrícolas*

- y Cultivos del Valle de San Luis Potosí, México. Rev. Int. Contaminación Ambiental 27(2) 103-113
50. Secretaría de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación (SAGARPA) SAGARPA-Laguna. 2008. Delegación Federal en la Comarca Lagunera. Anuarios Estadísticos 1980-2007.
 51. Silva, E. Nogueira, J. N. 1984. Estudio da Actividades de Poli fenol oxidase y de Per oxidasas en algunas frutas e hortalizas. O SOLO, PIRACICABA, SO, 76 (1) : 43-51, JAN/JUN
 52. Standman E.R. 1993. Oxidation of free amino acids and amino acid residues in proteins by radiolysis and by metal-catalyzed reactions. Annu. Rev. Biochem., 62, 792-821.
 53. Valdés- Perezgasga F. 1999. La Contaminación por Metales Pesados en Torreón Coahuila, México. Texas Center for Policy Studies. CILADHAC.
 54. Wang S. and Mulligan C.N. 2006. Occurrence of arsenic contamination in Canada: source, behavior and distribution. J. Environmental Monitoring and Pollutants. The Science of the Total Environment 366(2-3):701-721 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.09.005
 55. Wauchope, R.D. 1983. Uptake, translocation and phytotoxicity of arsenic in plants. pp 348-374. In: Arsenic: Industrial, Biomedical, Environmental Perspectives (Lederer y Fensterheim (ed.)). Arsenic Symposium, Gaithersburg, Maryland. Van Nostrand Reinhold Company. New York, N.Y.
 56. Whitmore T.J., Riedinger-Whitmoe M.A., Smoak J.M., Kolosa K.V., Goddard E.A., and Binder R. 2008. Arsenic contamination of lake sediments in Florida: evidence of herbicide mobility from watershed soils. J. Paleolimnol 40:869-884. DOI 10.1007/s10933-008-9204-8
 57. Whitmore T.J., Riedinger-Whitmore M.A., Smoak J.M. 2008. Arsenic contamination of lake sediments in Florida: evidence of herbicide mobility from watershed soils. J. Paleomnol 40: 869-884. DOI 10.1007/s 10933-008-9204-8

58. Woolson, E.A. 1972. Effects of fertilizer materials and combinations on the phytotoxicity, availability and content of arsenic in corn. J. Sci. Fd. Agric. 23: 1477-81.
59. Woolson, E.A.; Axley, J.H. y Kearney, P.C. 1973. The chemistry and phytotoxicity of arsenic in soils. II. Effects of time and phosphorus. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37: 254-9.
60. World Health Organization. 1981. Arsenic. Environmental Health Criteria 18, Geneva. Finland.
61. Yoshida T., Yamauchi H., Sun G.F., 2004. Chronic health effects in people exposed to arsenic via the drinking water: dose- response relationships in review. Toxicol. Appl. Pharmacol., 193(3), 243-252.