

**Efecto de la Contaminación por Arsénico en  
Cebada (*Hordeum vulgare*) en el Municipio de  
Irapuato Gto.**

**Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, A.C.  
– CIATEC**

Departamento de Ingeniería Ambiental

Tesis sustentada por **Saldaña Robles Adriana, Ing.**  
para obtener el grado de **Maestro en Ingeniería Ambiental**

**Comité Tutorial**

**Tutor Académico Dr. Ricardo Guerra Sánchez  
Tutor en Planta Dr. Rubén Salcedo Hernández  
Tutor en Planta M.C. Ricardo González Barbosa**

**León, Gto. Agosto 2010**



La presencia de arsénico (As) en el agua de consumo humano es un problema que se presenta en los acuíferos de prácticamente todo el norte y centro de México; en estas regiones se han detectado concentraciones superiores a lo señalado por la NOM 127 SSA1 2000, lo que altera su calidad natural, pudiendo ser consecuencia directa o indirecta de la actividad humana o por razones naturales. La calidad del agua, no varía solo por la geografía sino incluso por las diferentes temporadas. Para conocer estas variaciones resulta necesario determinar las concentraciones normales así como los valores de fondo de los principales constituyentes del agua (Rodríguez-Castillo R. 2005). En particular el acuífero Irapuato - Valle de Santiago tiene problemas de arsenismo ya que sus pozos se encuentran de moderadamente a muy contaminados (25 a más  $500 \mu\text{g L}^{-1}$  de As). Estos pozos están siendo utilizados en diferentes actividades, una de las actividades más importantes es para riego agrícola, actividad que potencialmente es una amenaza para los suelos y los cultivos. Es importante estudiar cuánto arsénico es absorbido por los cultivos y cuánto de éste llega a la parte comestible.

En este trabajo se buscó determinar la concentración de As en raíz, tallo, hoja y fruto de *Hordeum vulgare* (cebada) durante 3 etapas de crecimiento del cultivo. Esta hortaliza fue cultivada tanto en campo como en invernadero. Se determinó la concentración de As en el suelo de las parcelas utilizadas, así como concentración de As en el agua de riego y en planta.

Se encontró que a mayor concentración de As en el agua de riego, el suelo de la parcela acumuló una mayor concentración de As, así mismo la planta presentó una mayor concentración de dicho metal en todas sus estructuras. Sin embargo dentro de sus estructuras, la distribución de la concentración de As se presentó de la siguiente manera; [As] raíz > [As] hoja-tallo > [As] espiga, en donde la raíz concentró hasta  $21\ 940 \mu\text{g L}^{-1}$ , mientras que la espiga presentó una concentración de As de  $978 \mu\text{g L}^{-1}$ . Estos resultados se obtuvieron para la parcela que está

utilizando agua de riego con una concentración de As de  $200\mu g L^{-1}$ , y el suelo presentó una concentración de As de  $3597.5 \mu g L^{-1}$ .

Por otro lado en el sistema controlado de invernadero el análisis de varianza mostró que tanto el tiempo como la concentración de As y P influyen sobre la absorción de As por la planta con un nivel de confianza del 95%.

Palabras Clave: Arsénico, Agua, Suelo, Trigo, Distribución, Toxicidad en Planta y Mecanismos de Transporte

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	3
I. INTRODUCCIÓN.....	12
II. ANTECEDENTES.....	14
2.1. Historia del Arsénico .....	14
2.2. Química del Arsénico .....	15
2.2.1. Arsénico en el medio ambiente.....	16
2.3. Toxicología.....	18
2.3.1. Arsénico en las cadenas Tróficas.....	20
2.4. Arsénico en Agua.....	21
2.5. Arsénico en Suelo .....	23
2.5. Arsénico en Planta .....	27
2.5.1. Transporte de Arsénico en Planta .....	28
III. ESTADO DEL ARTE.....	30
3. 1. Estado del Arte en Suelo-Planta .....	30
3.1.1. Remoción de As en Suelo .....	31
3.2. Estado del Arte en Agua-Planta .....	33
3.2.1. Remediación en Agua .....	34
3.3. Estado del Arte en Planta.....	35
IV. OBJETIVO GENERAL.....	37
4.1. Objetivos Específicos .....	37
V. MATERIALES Y METÓDOS .....	38
5.1. Estudio de la Concentración de As en Agua, Suelo y Planta en Campo. 41	
5.1.1. Selección y Descripción del Área de estudio.....	41
5.1.2. Descripción del Medio Físico .....	41

5.1.2.1. Localización.....	41
5.1.2.2. Geología.....	42
5.1.2.3. Suelos.....	44
5.1.2.4. Climas.....	45
5.1.3. Distribución de la Concentración de As en Agua.....	45
5.1.3.1. Muestreo de Agua.....	45
5.1.3.2. Determinación de Arsénico en Agua.....	47
5.1.4. Distribución de la Concentración de As en Suelo.....	47
5.1.4.1. Selección y Muestreo de Parcelas.....	47
5.1.4.2. Determinación de Arsénico en Suelo.....	49
5.1.5. Distribución de la Concentración de As en Planta.....	50
5.1.5.1. Muestreo de Planta.....	51
5.1.5.2. Determinación de As en Planta.....	51
5.2. Estudio de la Concentración de As en Suelo y Planta en Invernadero ...	38
5.2.1. Concentraciones de As y P en Agua.....	38
5.2.1.1. Tratamientos.....	38
5.2.2. Suelo.....	39
5.2.2.1. Muestreo y Determinación de As en suelo.....	39
5.2.3. Planta.....	40
5.2.3.1. Muestreo de Plantas.....	40
5.2.3.2. Determinación de Arsénico en Planta.....	41
VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADO.....	53
6.1. Resultados de la Distribución de As en Campo.....	62
6.1.1. Resultados de la Distribución de As en Agua.....	64
6.1.2. Resultados de la Distribución de As en Suelo.....	73

6.1.3. Resultados de la Distribución de As en Planta .....	73
6.2. Resultado de la distribución de As en Invernadero	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.2.1. Resultados de la Distribución de As en Suelo .....	53
6.2.2. Resultados de la Distribución de As en Planta .....	56
VII. CONCLUSIONES.....	77
7.1. Campo.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
7.2. Invernadero .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
VIII. REFERENCIAS.....	82
IX. Anexo 1 .....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ciclo del Arsénico en el medio ambiente [Albert, 2004].	17
Figura 2.2. Perfiles de As en algunos suelos de cultivos vegetales recolectados en Sonargaon (Ashraf Ali M. <i>et al.</i> 2003).	24
Figura 5.1. Localización del área de estudio.	42
Figura 5.2. Mapa geológico de la zona de estudio.	42
Figura 5.3. Mapa de suelos de la zona de estudio.	44
Figura 5.4. Mapa de clima de la zona de estudio.	45
Figura 5.5. Zona acotada para muestreo de agua.	46
Figura 5.6. Parcelas seleccionadas para muestreo de suelo y planta.	48
Figura 5.7. Esquema de distribución en tresbolillo de las muestras simples a tomar para la formación de la muestra compleja.	49
Figura 5.8. Parcela 1 después de la siembra.	50
Figura 5.9. Cebada a los 2.5 meses de fue sembrada.	51
Figura 5.10. a) Espiga de cebada, b) Tallo-Hoja de Cebada.	52
Figura 5.11. Tratamientos.	39
Figura 5.12. Tratamientos a los 30 días.	40
Figura 6.1. Mapa de distribución de pozos de agua seleccionados para el muestreo.	62
Figura 6.2. Mapa de concentración de As en agua de pozo en el primer muestreo (Julio 2009).	64
Figura 6.3. Mapa de concentración de As en el agua de pozo en el segundo muestreo (Diciembre 2009).	65
Figura 6.4. Mapa de concentración de As en el agua de pozo en el tercer muestreo (Mayo 2010).	66
Figura 6.5. Mapa de distribución de pH en el agua de pozo en el primer muestreo (Julio 2009).	67
Figura 6.6. Mapa de distribución de pH en el agua de pozo en el segundo muestreo (Diciembre 2009).	68
Figura 6.7. Mapa de distribución de pH en el agua de pozo en el tercer muestreo (Mayo 2010).	69



Figura 6.8. Mapa de distribución de temperatura en el agua de pozo.....	70
en el primer muestreo (Julio 2009).....	70
Figura 6.9. Mapa de distribución de temperatura en el agua de pozo.....	71
en el segundo muestreo (Diciembre 2009).....	71
Figura 6.10. Mapa de distribución de temperatura en el agua de pozo.....	72
en el tercer muestreo (Mayo 2010). ....	72
Figura 6.11. Concentración de As en tallo-hoja y espiga en la Parcela 1 y 2, en los diferentes muestreos.....	74
Figura 6.12. Concentración de As en raíz de la cebada en la Parcela 1 y 2, en los diferentes muestreos.....	76
Figura 6.13. Diagrama del balance de materia con respecto a la concentración de As en el sistema de invernadero. ....	53
Figura 6.14. Gráfico de Interacción arsénico (As) y fosforo (P).....	59
Figura 6.15. Interacción fosforo (P) tiempo. ....	60
Figura 6.16. Grafica de interacción arsénico (As) tiempo.....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Principales minerales que contienen As.....	16
Tabla 2.2. Uso comercial de compuestos de arsénico.....	17
Tabla 2.3. Constantes de equilibrio para reacciones de diversos compuestos de As en agua a 1 bar de presión.....	23
Tabla 2.4. Contenido de As en los primeros 20 cm del suelo en diferentes países.....	25
Tabla 2.5. Coeficiente de transferencia de As total y disponible para cultivos seleccionados.....	29
Tabla 3.1. Concentraciones de As en diferentes cultivos (peso seco).....	33
Tabla 5.1. Tratamientos utilizados para la preparación de las soluciones de riego.....	50
Tabla 6.1. Descripción de los pozos muestreados.....	54
Tabla 6.2. Concentraciones de As y P para cada tratamiento.....	72
Tabla 6.3. Resumen de entradas y salidas al sistema de invernadero.....	73
Tabla 6.4. Análisis de Varianza para la planta de Cebada.....	75

## ABREVIACIONES Y SIMBOLOS

As	Arsénico
ATP	Adenosin tri-fosfato
AsS	Sulfuro de arsénico
$H_3AsO_3$	Ácido Arsenioso
$H_2AsO_3^{1-}$	
$HAsO_3^{2-}$	
$AsO_3^{3-}$	Arsenito
$H_3AsO_4$	Ácido Arsenico
$H_2AsO_4^{1-}$	
$HAsO_4^{2-}$	
$AsO_4^{3-}$	Arseniato
$PO_4^{3-}$	Anión Fosfato
$AsO_2^{1-}$	Arsenito
ppm	Partes por millón
Eh	Potencial de oxidación
pH	Potencial de hidrogeno
WHO	Organización Mundial de la Salud
$As_2O_3$	Arsenolita
TC	Coeficiente de Transferencia
mV	miliVolts
MMA	Ácido MonometilArsonico
DMA	Ácido DimetilArinico
MA	MetilArseniato
TMAO	Óxido de TriMetilArsina

## I. INTRODUCCIÓN

La presencia de las altas concentraciones de As en aguas subterráneas de diversos estados de México y el mundo, ha motivado a los investigadores a desarrollar técnicas de detección de As debido a la toxicidad que presenta para seres vivos.

La contaminación por arsénico es cada vez más preocupante, tanto a nivel mundial, nacional y, en particular, en nuestro estado. Cuando el agua se usa en grandes cantidades como es el caso en el riego agrícola, cualquier procedimiento para la remoción de As se vuelve muy costoso. Por esta razón, el problema de As en agua con usos agrícolas se ha convertido en un serio problema de contaminación ambiental.

Existen diversos trabajos de cuantificación de As en varios cultivos en condiciones de campo y laboratorio. Sin embargo no se ha encontrado información acerca de la absorción y acumulación de As en cebada, siendo este uno de los cultivos económicamente más importante del bajío.

La absorción y acumulación de As en cultivos que se producen en las condiciones antes mencionadas pueden constituir un riesgo para la salud humana cuando éstos se consumen.

Por otro lado el uso de aguas de riego para la producción de cultivos, que en parte son destinados para la alimentación del ganado, puede también ser un riesgo para la salud de los animales que los ingieren y posteriormente pueden también ser un riesgo para la salud humana siguiendo la cadena trófica, debido a la acumulación potencial del As.

En particular en éste trabajo se buscó cuantificar la concentración de As en varios órganos de plantas de cebada regada con aguas de moderadas ( $50 \mu\text{g L}^{-1}$ ) a altas ( $210 \mu\text{g L}^{-1}$ ) concentraciones de As, que sobrepasan el límite máximo permitido

por la NOM-127-SSA1-2000 para consumo humano que es de  $25 \mu\text{g L}^{-1}$ . Del mismo modo se buscó determinar la influencia del P y el tiempo de recolección sobre el fenómeno de sorción del As en la planta de cebada. Esto con la finalidad de emitir una recomendación sobre el tipo de cultivo a sembrar en la región de estudio

## II. ANTECEDENTES

En nuestro sistema solar, el As ha sido detectado en las atmósferas de Júpiter y Saturno y algunas trazas en meteoritos y rocas de la luna. Sobre la tierra el elemento se encuentra altamente concentrado desde el núcleo hasta la corteza terrestre. Un apropiado entendimiento de las propiedades y comportamiento del As en el medio ambiente son críticos en la predicción de riesgos en el medio ambiente y para la salud humana.

El agua potable está comprometida por contaminación de As en aguas superficiales en muchos países del mundo, entre ellos Bangladesh, el oeste de India, Taiwan, Mongolia, Vietnam, Argentina, Chile, México, Ghana y los Estados Unidos (Ayotte J.D. *et al.* 1998; Azcue J.M. and Nriagu 1994; Chen S. L. *et al.* 1994; Das D. *et al.* 1995; Focazio 2000; Nickson R. T. *et al.* 2000; Schreiber M. E. *et al.* 2000; Smedley P. L. *et al.* 2002).

La contaminación de As está ampliamente distribuida en México, desde el norte hasta el centro del país, algunos de los estados que presentan concentraciones por arriba de la norma NOM-127-SSA1-1994 (modificada en el 2000), son Coahuila, Durango, Sonora, Hidalgo, San Luis Potosí y Guanajuato. En 2004 se reportó que existe As natural en el distrito minero de Guanajuato (Cano A. I. *et al.* 2004).

### 2.1. Historia del Arsénico

Los compuestos de arsénico han sido utilizados desde tiempo remotos como venenos o medicinas, por ejemplo Hipócrates en el año 400 a. C. ya utilizaba el sulfuro de Arsénico (AsS) como una pasta relajante en úlceras cutáneas. Por otro lado muchos otros compuestos de As tales como el arsénico blanco (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se

usaban como potentes venenos debido a su alta toxicidad y difícil detección (Albert 2004).

A lo largo del tiempo los compuestos de As han sido usados ampliamente en una gran variedad de pigmentos, medicinas, pesticidas, herbicidas, agentes químicos, tratamiento de maderas y algunos otros compuestos ricos en arsenolita los cuales son venenos tradicionales. En el siglo XX se han desarrollado nuevos usos para el As como son algunos suplementos alimenticios para el ganado, medicinas para el tratamiento de la leucemia y semiconductores entre otros, con todo esto se ha introducido más As al medio ambiente.

## 2.2. Química del Arsénico

El As es un metaloide con una masa atómica de 74.92 y un número atómico de 33, los estados de valencia más comunes del As son -3, 0, +3 y +5.

El As disuelto en aguas naturales normalmente se encuentra como As(III) y As(V), los cuales usualmente forma enlaces con el oxígeno para formar arsenito y arsenato, respectivamente. El As(III) en su mayoría existe en aguas subterráneas con bajas concentraciones de oxígeno (reducción), dependiendo del pH el As(III) principalmente se encuentra como  $H_3AsO_3$ ,  $H_2AsO_3^{1-}$ ,  $HAsO_3^{2-}$  y/o  $AsO_3^{3-}$ . El As(V) es más común en aguas subterráneas bien oxigenadas y en aguas superficiales y típicamente se encuentra como  $H_3AsO_4$ ,  $H_2AsO_4^{1-}$ ,  $HAsO_4^{2-}$  y/o  $AsO_4^{3-}$ .

La oxidación del As se refiere a un incremento en su estado de valencia debido a reacciones químicas que causan que el As pierda electrones de valencia. Durante el proceso de oxidación la especie química oxidante recibe el electrón del As y es reducido (Price R.E. and Pichler 2005). La reducción del As se refiere a un decremento en el estado de valencia causado por reacciones químicas en donde el As gana electrones de valencia, durante este proceso, los reactantes son oxidados dado que donan electrones al As. En general el As(V) se convierte más rápido a As (III) en ambientes reducidos que el As(III) a As(V) en ambientes

oxidados (Stollenwerk K. G. 2003). Los oxi-hidroxidos de fierro, aluminio y manganeso frecuentemente se encuentran en la naturaleza como sorbentes de otros materiales sólidos en la naturaleza, a menudo estos juegan un rol importante en la adsorción de As en el agua (Stollenwerk K. G. 2003).

### 2.2.1. Arsénico en el medio ambiente

El As puede encontrarse naturalmente en el suelo y sus minerales, por lo tanto pueden pasar al aire y al agua. El As está presente en una concentración media de 1.8 ppm en la corteza terrestre (Henke 2009). El As elemental ocasionalmente es encontrado en canales hidrotermales, pero más comúnmente es encontrado principalmente en minerales. Los principales minerales que contienen As están Listados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Principales minerales que contienen As (Mason B. and Berry 1978).

Mineral	Formula Química	Características	Geología
<b>Arsénico</b>	$As$	Color gris, metálico.	Es encontrado en canales hidrotermales y/o rocas cristalinas.
<b>Oropimente</b>	$As_2S_3$	Color amarillo, amarillo café o nacarado, forma prismática.	Encontrado en aguas hidrotermales de baja temperatura.
<b>Rejalgar</b>	$AsS$	Color de rojo a naranja, forma prismática	Encontrado en roca de limo y en terrenos con arcilla volcánica.
<b>Arsenopirita</b>	$FeAsS$	Plata-blanco, forma primatica con secciones romboédricas.	Formado de moderadas a altas temperaturas, es asociado con Au, Sn, Ni entre otros.
<b>Escorodita</b>	$FeAsO_4 \cdot 2H_2O$	Color de verde amarillo a verde café. Muy granular.	Se encuentra principalmente en depósitos hidrotermales.



El ciclo del As en el medio ambiente se muestra en la Figura 2.1. La concentración de As en los alimentos varía entre 20 y 140  $\mu\text{g}$  de As  $\text{kg}^{-1}$ . La Figura 2.1 nos muestra la movilización de As en el medio ambiente.

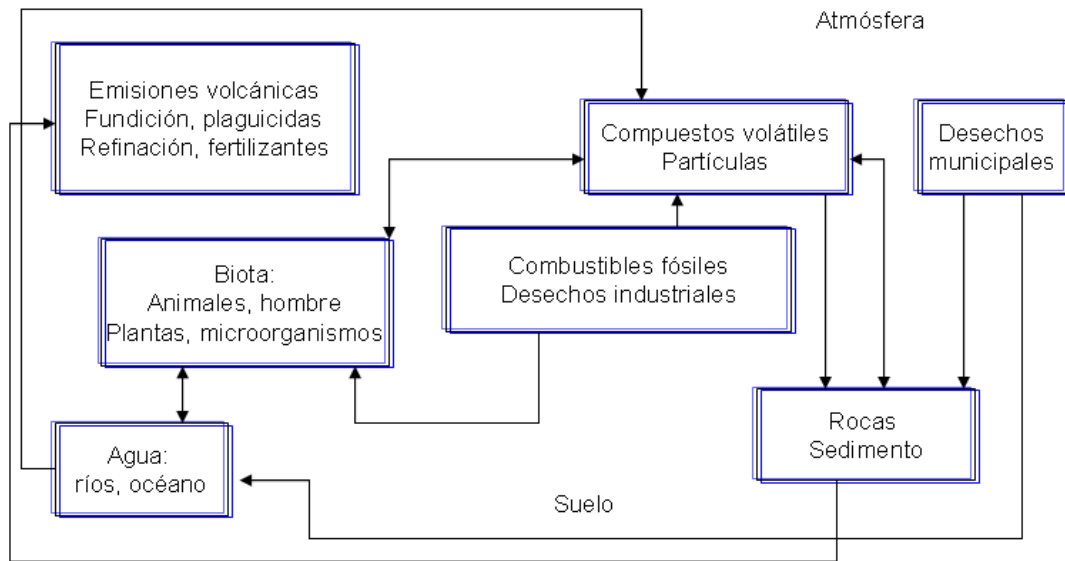


Figura 2.1. Ciclo del Arsénico en el medio ambiente [Albert, 2004].

El hombre ha movilizado el ciclo de éste elemento, algunas de las principales actividades que han provocado esta movilización son; el uso de combustibles fósiles en plantas termoeléctricas, la extracción de agua de pozos a grandes profundidades, el uso de agroquímicos, etc., permitiendo que tanto el ambiente como él mismo, se hallen expuestos al arsénico.

La Tabla 2.2 muestra el uso de algunos compuestos con As y el porcentaje total en que éstos son usados, por ejemplo los pesticidas componen el 65 % del total de los productos utilizados con As.

Tabla 2.2. Uso comercial de compuestos de arsénico (Sarkar B. 2002).

Uso	Porcentaje
<b>Pesticidas</b>	65
<b>Conservadores de Madera</b>	18
<b>Cristales</b>	10
<b>Aleaciones y electrónica</b>	3
<b>Miscelánea</b>	4

Actualmente la demanda de productos y materiales con contenido de As está disminuyendo debido a la creciente preocupación que existe de los componentes peligrosos para el hombre y el medio ambiente (Magalhães M. and Clara 2002).

El exceso de As presente en el agua, actualmente es un problema que impacta muchas regiones del mundo, tales como Bangladesh, España, Nicaragua, Perú, Argentina, México y Chile entre otros, dado que afecta la cadena trófica.

### 2.3. Toxicología

En la mayoría de los casos y para propósitos toxicológicos, los estados de oxidación más importantes del As son el As (III) y As (V), la importancia toxicológica de estos dos estados de oxidación es que el As (III) es más tóxico que el As (V) tanto en sus formas orgánicas como inorgánicas (Henke 2009). Tanto el ser humano como los animales tienen 3 formas de exposición al As, respiratoria, gastrointestinal y vía cutánea.

El As en el aire existe en forma de materias particulada por lo que la absorción vía respiratoria del As depende de dos procesos, el primero que es la deposición de las partículas sobre las vías respiratorias y sobre la superficie del pulmón, el segundo proceso de la absorción de As se realiza en el área en que éste fue depositado. La cantidad de As inhalado dependerá tanto del As adherido a las partículas totales suspendidas así como del tamaño de las partículas inhaladas, por otro lado la absorción también dependerá en gran medida de la solubilidad de la forma química del As (Henke 2009), esto afecta directamente la salud humana.

El As puede ser absorbido por el tracto gastrointestinal después de la ingesta de comida, agua y/o medicinas con contenido de As, la biodisponibilidad de la ingesta con contenido de As depende de la concentración de As, la forma del As así como de la matriz en la cual fue ingerido, es decir comida, agua, medicina, etc. La

exposición a As por largos términos en agua de bebida implica una variedad de problemas concernientes a la salud tales como diferentes tipos de cáncer, problemas cardiovasculares y efectos neurológicos (National-Research-Council 1999).

La absorción de As vía dérmica es muy baja generalmente, y la principal forma de contacto con el As es mediante el agua o suelo con altas concentraciones de As.

Una vez en el sistema circulatorio, el As es rápidamente eliminado de la sangre y distribuido en los órganos del cuerpo, esto es muy común en animales de laboratorio (Kenyon 2005a; Kenyon E.M. *et al.* 2005b). Los efectos de la exposición al As se clasifican en 2 tipos, los de exposición aguda y los de exposición crónica.

El envenenamiento agudo por As ocurre principalmente de forma no intencional, en 2006 la Asociación Americana de Centros de Control de Venenos reportó 338 casos de envenenamientos por pesticidas (21 casos intencionales) (Bronstein A.C. *et al.* 2006).

La dosis letal de As inorgánico ingerido es de  $1 - 3 \text{ mg kg}^{-1}$  (M.J. Ellenhorn 1997). Por otro lado el As tiende a acumularse en el organismo por exposición crónica y cuando éste llega a ciertas concentraciones ocasiona alteraciones, tales como lesiones cutáneas, alteraciones en el sistema cardiovascular, efectos neurológicos, entre algunas otras alteraciones (Albert 2004).

Las personas que han ingerido durante periodos prolongados, altas concentraciones de As, sufren de hiperqueratosis palmo plantar. La cual se manifiesta en el cambio de pigmentación de la piel y callosidad en las palmas de manos y pies.

A menudo se encuentra que el As (III) es mas tóxico que el As (V), mientras que esto es correcto para envenenamientos agudos, existe una diferencia para envenenamientos crónicos ó exposición al As a través del agua y la comida. La toxicidad del As(V) es debido a que el arsenato tiene una forma muy similar al

fosfato (Hughes 2002), y el arsenato sustituye al fosfato en las reacciones con la glucosa y el gluconato interfiriendo con el intercambio de iones de glóbulos rojos en el sistema, quizá el efecto más importante sea que sustituye al fosfato en el trifosfato adenosin (ATP), el cual es fundamental en la liberación y almacenamiento de energía en los músculos. Por otro lado el As (III) reacciona con moléculas que contienen grupos tiol o sulfi-hidrogeno tales como las enzimas o coenzimas por lo que afecta una amplia variedad de procesos bioquímicos, tales como la alteración de la despolarización del miocardio provocando arritmias (Hughes 2002).

### 2.3.1. Arsénico en las cadenas Tróficas

Las consecuencias de la exposición a As para la salud humana son potencialmente graves, las cuales pueden extenderse de un malestar general a la muerte, considerando los efectos crónicos antes mencionados producidos por la exposición a As de fuentes naturales y antropogénicas.

La contaminación por As es preocupante dado que este metaloide es bioacumulable y pasa a través de la cadena trófica, entendiéndose por esto el proceso de transferencia de energía alimenticia a través de una serie de organismos, en el que cada uno se alimenta del precedente y es alimento del siguiente.

Un ejemplo de ello es la agricultura, donde los cultivos pueden extraer directamente el As del suelo, ser irrigados con agua rica en As, aplicar fertilizantes y/o pesticidas con contenidos de As; lo anterior es un claro ejemplo de la bioacumulación de As en la base fundamental de las cadenas tróficas, las plantas, por la cual se introduce a la cadena alimenticia.

## 2.4. Arsénico en Agua

La contaminación del agua potable por As es el problema más serio y generalizado que amenaza la salud humana y el medio ambiente. La Organización Mundial de la Salud (WHO) recomienda como límite máximo permisible  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  de As en el agua de bebida, en respuesta a estas recomendaciones Estados Unidos de América, Canadá, Australia, Unión Europea, Japón, han bajado sus límites máximos permisibles en la concentración de As en agua potable.

La distribución de As puede ser uniforme en aguas superficiales de acuíferos horizontales y homogéneos, sin embargo muchos acuíferos son heterogéneos y consisten en camas de roca fracturada con concentraciones de As localizadas o en distribuciones irregulares de capas de arcilla impermeable en arenas permeables con una distribución de As heterogénea. Estas heterogeneidades hacen difícil el modelaje y predicción de la distribución de As.

La adsorción es el mecanismo predominante que controla el transporte de As en muchos sistemas de agua. Los hidróxidos de hierro, aluminio, magnesio y arcillas minerales son comúnmente asociados con acuíferos sólidos, lo que muestra que son adsorbentes importantes de As. La cantidad de As adsorbido se ve influenciado por la química de la fase acuosa, incluyendo especiación de As, la presencia y concentración de diferentes iones de competición para As y pH.

La mayoría de las aguas en México tienen valores de pH en un rango de 6 a 9. Teóricamente  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y  $\text{HAS}_2\text{O}_4^{2-}$  podrían dominar bajo condiciones de oxidación, sin embargo, la oxidación del As(III) a menudo es lenta y la especie persiste bajo condiciones de oxigenación. Por otro lado una mayor sorción de As(V) que de  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  podría contribuir a extender el radio de disolución del As(III)/As(V) en aguas superficiales (Boyle D.R. *et al.* 1998).

En aguas superficiales la proporción As(III)/As(V) tiende a variar dependiendo de las condiciones en las que se encuentre, un ejemplo de ello es el efecto que tiene sobre el As la presencia natural de materia orgánica, ya que puede afectar la

biodisponibilidad del As en el agua, puesto que obstaculiza el equilibrio de absorción del As(III) (Redman 2002).

En sistemas hidrológicos con condiciones de pH neutrales, el As(III) inorgánico es una molécula no cargada  $H_3AsO_3$ , lo que hace que la movilidad mejore ya que no se adsorbe con suficiente fuerza a la superficie de los minerales.

Por otro lado y en contraste con lo anterior los aniones de As(V) se adsorben fuertemente a minerales bajo condiciones de pH neutras (Smedley P.L. *et al.* 2005), es decir que bajo condiciones moderadas de reducción, el arsenito trivalente es estable e incrementa la absorción con el incremento de pH, por otro lado en condiciones de oxidación el arsenato es estable y la absorción disminuye con el incremento del pH. La presencia de fosfatos, sulfatos, carbonatos, silicas y otros aniones tiende a mostrar un decremento en la absorción de As.

Otra de las características importantes del As en el agua, son las reacciones que ocurren. Cada constante de solubilidad describe la disociación de un sólido en agua y calcula la actividad o concentración de los productos en una solución saturada. La constante de solubilidad o cualquier otra constante de equilibrio de una reacción puede ser derivada a partir de la energía libre de Gibbs de la reacción.

La Tabla 2.3 muestra algunos de los compuestos de As más comunes que interactúan con el agua, así como sus reacciones relevantes y sus constantes de equilibrio.

Tabla 2.3. Constantes de equilibrio para reacciones de diversos compuestos de As en agua a 1 bar de presión (Henke 2009).

Compuesto de As	Reacción relevante	Temp. (°C)	pH de equilibrio	Constante de equilibrio (pK)
$Ag_3AsO_4$	$Ag_3AsO_4 \rightleftharpoons 3 Ag^+ + AsO_4^{3-}$	$25 \pm 1$	4.92	23.4
$Ag_3AsO_4$	$Ag_3AsO_4 \rightleftharpoons 3 Ag^+ + AsO_4^{3-}$	25	--	22.0
$As_2O_3$ (arsenolita cúbica)	$As_2O_3 + 3H_2O(liquido) \rightleftharpoons 2 H_3AsO_3^0$	25	--	1.38
$As_2S_3$ (amorfo)	$0.5 As_2S_3 + 0.5H_2S^0 + H_2O \rightleftharpoons AsS(OH)(SH)^- + H^+$	25	--	46.3
$BaHAsO_4$	$BaHAsO_4 \rightleftharpoons Ba^{2+} + HAsO_4^{2-}$	20	7.0	3.92
$H_3AsO_4^0$	$H_3AsO_4^0 + H_2(gas) \rightleftharpoons H_3AsO_3^0 + H_2O$	25	--	-19.35
$PbHAsO_4$	$PbHAsO_4 \rightleftharpoons Pb^{2+} + HAsO_4^{2-}$	$25 \pm 1$	4.68	11.8
$Ca_5(AsO_4)_3OH$	$Ca_5(AsO_4)_3OH \rightleftharpoons 5Ca^{2+} + 3AsO_4^{3-} + OH^-$	$23 \pm 1$	9.54	38.04

## 2.5. Arsénico en Suelo

El suelo es un importante recurso natural pero también es un importante medio de acumulación, transformación y migración de tóxicos. Los principales factores que influyen en la concentración de los minerales en el suelo son las rocas parentales y las actividades humanas, las cuales pueden provenir de residuos industriales y/o del uso agrícola de pesticidas arsenicales. El rango medio del contenido

natural de As en suelos es 0.1 a 40 ppm con una media de 6 ppm (Bowen 1979; Boyle D.R. *et al.* 1998; Backer D.E. and Chesnin 1975; Vinogradov A.P. 1959).

La mayor parte de As existente en los suelos proviene principalmente de rocas parentales (Tanaka T. 1988) y el As es mayormente encontrado en sulfatos magmáticos y minerales de hierro. Las diferentes capas del suelo tienen diversas concentraciones de As debidas a la roca parental que van desde 2 hasta 30 ppm (Zou B. J. 1986).

La variación de la concentración de As a diversas profundidades en el suelo ha sido investigada por algunos autores (Ashraf Ali M. *et al.* 2003). Estos autores encontraron que las concentraciones de As en suelo para campos de vegetales en la mayoría de los casos o no varía significativamente con la profundidad o tiene una ligera variación (ver Figura 2.2). Esta misma tendencia se encuentra para cultivos, como el arroz donde el agua de irrigación se encuentra contaminada con As.

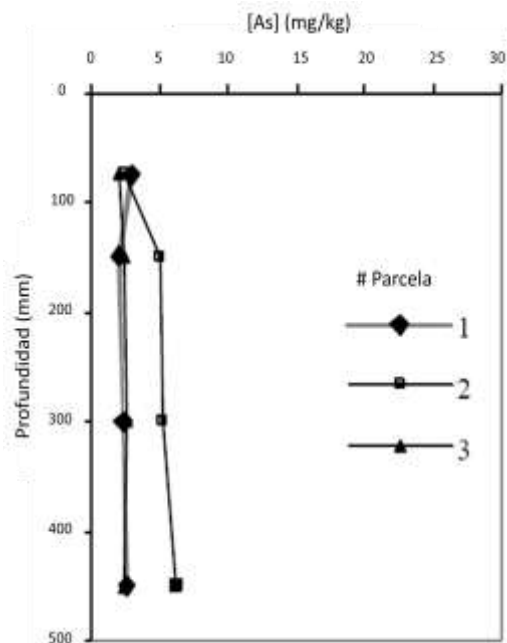


Figura 2.2. Perfiles de As en algunos suelos de cultivos vegetales recolectados en Sonargaon (Ashraf Ali M. *et al.* 2003).



El As en menor cantidad también es acumulado en el suelo a través de pesticidas, fertilizantes, irrigación emisiones de la quema de combustibles fósiles y residuos industriales.

A lo largo de la historia debido a la agricultura, el suelo ha venido acumulando residuos de As. Varias combinaciones químicas de pesticidas y fertilizantes fueron ampliamente aplicadas en largos periodos, e incluso algunas de ellas aun son distribuidas y aplicadas en nuestros días.

La acumulación de As en suelo agrícola puede ser causada por irrigación de Aguas contaminadas (por provenir de residuos mineros ó por ser extraída de ciertas profundidades), el As también tiende a acumularse en suelos de cultivo fertilizados con lodos con alta concentración de As (Nasier E.B *et al.* 1977).

Por otro lado factores tales como el clima, componentes orgánicos e inorgánicos en el suelo y el estado del potencial redox también afectan la concentración de arsénico en suelos. Un comparativo del contenido de As en suelos de diferentes países es mostrado en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Contenido de As en los primeros 20 cm del suelo de diferentes países (Henke 2009).

País	Suelo	Numero de muestras	Rango (ppm)	Media (ppm)
<b>Argentina</b>	Todos los tipos	20	0.8 - 22	5
<b>China</b>	Todos los tipos	4095	0.01 - 626	11.2
<b>Francia</b>	Todos los tipos		0.1 - 5	2
<b>Alemania</b>	Berlin región 2	2	2.5 - 4.6	3.5
<b>Italia</b>	Todos los tipos	20	1.8 - 60	20
<b>Japón</b>	Todos los tipos	358	0.4 - 70	11
	Paddy	97	1.2 - 38.2	9
<b>México</b>	Todos los tipos	18	2 - 40	14
<b>Sur África</b>		2	3.2 - 3.7	3
<b>Suiza</b>		2	2 - 2.4	2.2
<b>Estados Unidos</b>	Varios estados	52	1 - 20	7.5
<b>Unidos</b>	Agrícola	1215	1.6 - 72	7.5

La Tabla 2.4 muestra que la concentración típica de As en los suelos de México va de 2 hasta 40 con una media de 14 ppm de As, mientras que en países tales como Italia y Japón estos rangos son mayores, y en lo particular Italia cuenta con una media mayor que México.

La textura del suelo es otra característica importante que afecta la química del arsénico. Los minerales arcillosos finos tienden a adsorber y atrapar el As de forma más efectiva que la arena (Scazzola R. *et al.* 2004). En muchos suelos y sedimentos la movilidad del As(V) está limitada por la adsorción a arcillas minerales, materia orgánica u óxidos de hierro (Inskeep 2002).

Algunos autores (*Togashi S. et al. 2000*) argumentan que el clima, erosión y sedimentación son los responsables del enriquecimiento de As en el suelo. La temperatura, humedad, precipitación y evaporación son factores importantes porque contribuyen a la oxidación de minerales de sulfuro arsenosos.

Por otro lado en climas cálidos y húmedos, una precipitación excesiva produce una intensa actividad biológica creando condiciones de reducción en la superficie y bajo superficie, lo que impide la oxidación del sulfuro (Seal R.R. II *et al.* 2002). Mientras que en la superficie del suelo la alta humedad y las temperaturas pueden promover la oxidación de los minerales de sulfuro arsenosos (Williams M. 2001), liberando As al medio ambiente.

El As en el suelo se encuentra principalmente en especies inorgánicas aunque el As orgánico también es encontrado en materia orgánica en algunos suelos, puesto que algunas bacterias reductoras catalizan y mejoran la velocidad de oxidación de algunos minerales arsenosos (Mihaljević M. *et al.* 2004) por lo que convierten el As inorgánico en compuestos organofosforados. Típicamente el As(V) es predominante con valores de Eh alrededor de 200 mV y condiciones de pH de 5 a 8 (Akter and Naidu 2006).

La materia orgánica natural es común en sedimentos, suelos y agua. La materia orgánica está compuesta por una amplia variedad de compuestos orgánicos, incluyendo; ácido carboxílico, carbohidratos, fenoles, ácidos aminos y sustancias

húmicas (Wang S. and Mulligan 2006), las sustancias húmicas son especialmente importantes debido a la interacción con el As. Los componentes de las sustancias húmicas son; humin, ácido húmico y ácido fúlvico (Drever J.I. 1997).

La materia orgánica afecta la movilidad del As en agua, suelos y sedimentos a través de la sorción de los compuestos disueltos de As sobre materiales orgánicos insolubles, a través de ácidos fúlvicos y húmicos que convierten el As (V) en As (III) y forman complejos entre los materiales orgánicos y el As, por lo que la materia orgánica afecta la biodisponibilidad del As dado que existe una competencia entre el As y la materia orgánica por los sitios de adsorción en la superficie de los minerales (Buschmann J. *et al.* 2006; Sjöblom A. *et al.* 2004; Warwick P. *et al.* 2005).

Por otro lado la importancia de la materia orgánica radica en que la mayoría de sus componentes tienen carga negativa en condiciones de pH alcalino y neutro, lo que implica que competirá con oxi-aniones de As para ser adsorbidos por hidróxidos u oxi-óxidos sobre la superficie de minerales (Wilkin R.T. and Ford 2006). Por otro lado, el carbono orgánico en agua promueve la reducción bacteriana de sulfatos a sulfitos lo que produce condiciones anóxicas y bajo estas condiciones el As tiende a precipitar como compuestos sulfatados.

## 2.5. Arsénico en Planta

La tolerancia al As es muy variable en las plantas, sin embargo los límites de tolerancia varían, en la misma planta, dependiendo de la saturación de agua en el suelo, de su aireación y otras características del suelo. Entonces no solo el nivel de As en el suelo es determinante en los efectos tóxicos producidos en la planta, sino que diversos factores afectan la absorción y toxicidad de esta, lo que hace que las relaciones de agua de irrigación, suelo y planta sean un sistema muy complejo.

Las raíces de la planta pueden absorber fracciones muy bajas de As, del As total en el suelo. La literatura técnica (Huang *et al.* 2006) sugiere que los rangos de proporción de As absorbido del suelo son de 0.1 a 1.8 %, debido a la fuerza de adsorción que las arcillas ejercen sobre este.

El  $PO_4^{3-}$  y el  $AsO_4^{3-}$  son químicamente similares y compiten por intercambio de iones en los intersticios del suelo, por lo que se espera que en suelos con alto contenido de  $PO_4^{3-}$  contenga menos espacios libres para la adsorción de los  $AsO_4^{3-}$ , en principio la adición de fosfato puede desplazar al As del suelo y dejarlo disponible para la planta (Smith E. *et al.* 2002).

### 2.5.1. Transporte de Arsénico en Planta

El As no es uno de los elementos más importantes en la planta, (aunque en bajas concentraciones, es benéfico), sin embargo las especies inorgánicas de éste elemento por lo general presentan una alta fitotoxicidad.

El arseniato ( $AsO_4^{3-}$ ) es la especie predominante de As (V) en suelos aerobios, mientras que el arsenito ( $AsO_2^{1-}$ ) predomina bajo condiciones anaerobias. El arseniato interrumpe el metabolismo del fosfato ya que actúa de manera análoga a éste, mientras que el arsenito reacciona con los grupos sulfhídricos de enzimas conduciendo a la inhibición de la función celular y llevando finalmente a la muerte (Wang J. *et al.* 2002). Se encontró que los arseniatos son absorbidos a razones más bajas que los arsenitos por las raíces de la mostaza (Chaturverdi I. 2006).

Las variaciones en la toma de As del suelo son expresadas en términos del coeficiente de transferencia (TC), el cual es definido como el contenido de As total en las partes comestibles de la planta dividida entre el As total que hay en el suelo.

$$TC = \frac{[As_{total}]_{en\ planta}}{[As_{total}]_{en\ suelo}}$$

Los coeficientes de transferencias reportados de la literatura para 6 vegetales comunes en crecimiento en 4 sitios altamente contaminados al sur-oeste de

Inglaterra muestran un TC que va de 0.00015 en papa fresca a 0.0316 en la piel del rábano (Warren *et al.* 2003).

Por otro lado en un estudio realizado en arroz y 16 vegetales creciendo en suelos agrícolas en 6 sitios en la Provincia de Fujian, sur-este de China, se encontró que el TC medio en arroz es de 0.20, y valores menores en los vegetales (Huang *et al.* 2006), los cuales se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Coeficientes de transferencia de As total y disponible para cultivos seleccionados (Huang *et al.* 2006).

Cultivo	Coeficiente de Transferencia (total)		Coeficiente de Transferencia (disponible)	
	Mediana	Rango	Mediana	Rango
<b>Apio</b>	0.0074	0.0014-0.0284	0.035	0.006-0.119
<b>Espinaca</b>	0.0059	0.0008-0.0158	0.043	0.010-0.086
<b>Hoja de Mostaza</b>	0.0057	0.0003-0.0266	0.024	0.004-0.120
<b>Ajo</b>	0.0057	0.0010-0.0059	0.017	0.010-0.078
<b>Cebolla</b>	0.0049	0.0010-0.0139	0.033	0.009-0.070
<b>Lechuga</b>	0.0023	0.0004-0.0092	0.019	0.005-0.059
<b>Arroz</b>	0.0020	0.0060-0.0360	0.179	0.068-0.440
<b>Coliflor</b>	0.0011	0.00004-0.0023	0.009	0.001-0.017
<b>Rábano</b>	0.0007	0.0002-0.0024	0.053	0.003-0.022
<b>Berenjena</b>	0.0005	0.0001-0.0020	0.003	0.001-0.012

El presente capítulo mostró los antecedentes sobre la investigación del As en el sistema agua, suelo y planta, en donde se muestran las bases químicas y geoquímicas necesarias para la comprensión de los mecanismos que involucran al As dentro de dichos sistemas. Por otro lado, se presentan los antecedentes a este trabajo sobre la problemática de As en el sistema agua-suelo-planta.

### III. ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo tratará sobre el estado del arte en los sistemas de agua, planta y suelo reportadas en la literatura y su relación con las concentraciones de As, ya que dependiendo del estado físico-químico y de las condiciones químicas dominantes, la contaminación por metales pesados puede causar un deterioro en la estructura del suelo y planta así como un decremento biológico.

#### 3. 1. Estado del Arte en Suelo-Planta

En el oeste de Inglaterra se evaluó la retención de As en suelos ricos en materia orgánica, y se examinaron los patrones espaciales y temporales de las concentraciones disueltas de As. Se encontró que las concentraciones de As fluctúan en función de la profundidad del suelo, y los resultados revelan que en la capa superficial del suelo existe una mayor concentración de As. Por otro lado, se demuestra que estos suelos han sido contaminados con derivados antropogénicos de As (Rothwell J. J. *et al.* 2009).

Como reportaron los autores anteriores, la mayor contaminación de As en suelo ocurre en la capa superior que se encuentra a una profundidad de 20 cm, cuando la contaminación ocurre debido al riego con aguas contaminadas.

Por otro lado, en un estudio realizado en Portugal (Marques *et al.* 2009), se encontró que el suelo presentó una mayor concentración de Arsénico (As) en los puntos más cercanos a un canal de aguas residuales, aunado a esto, las mayores concentraciones de As se encontraron en las capas superficiales del suelo, de manera similar que los resultados reportados por Rothwell y colaboradores (2009). En el estudio realizado por Marquez y colaboradores (2009) se encontró que entre mayor contacto entre el suelo y el agua del canal, mayor la concentración de As.

Por otra parte, estos autores reportaron que en planta la concentración de As osciló entre 277 y 1721  $mg\ kg^{-1}$  en la raíz, de 30 a 110  $mg\ kg^{-1}$  en tallo y de 60 a 265  $mg\ kg^{-1}$  en hojas.

Posteriormente Marques y colaboradores (Marques *et al.* 2009) encontraron que el porcentaje extraíble de As en el suelo estudiado es de 0.7 % del total de la concentración del metal en el suelo, por otro lado obtuvieron que las concentraciones obtenidas en planta de Zarzamora son altas comparadas con las presentadas en la literatura. Sin embargo, la absorción de As en el sistema planta suelo también está relacionado con la presencia de diversos metales, como es el caso del Zinc, en donde diversos autores (Cardwell A. J. *et al.* 2002; Marques A. P. G. C. *et al.* 2007) han encontrado un patrón muy claro del incremento del As en las diversos cultivos con respecto al incremento del Zinc (Zn), indicando una interacción entre distintos metales.

Stoltz y Greger (Stoltz E. and Greger 2002) encontraron que algunos análisis muestran una alta correlación entre la concentración de As en planta y suelo, y reportaron que las plantas de humedales presentan como concentraciones máximas 8.4  $mg\ kg^{-1}$  en planta superficial y 276  $mg\ kg^{-1}$  en raíz, al igual que Marquez y colaboradores (2009), Stoltz y Greger (2002) encontraron que las concentraciones de As en raíz son más altas que las concentraciones de As en planta. La correlación de la concentración de As en raíz de la planta y la concentración de As en el suelo es una correlación positiva y significativa, mientras que para hoja y tallo generalmente no resultó significativo.

### 3.1.1. Remoción de As en Suelo

La fitoremediación de suelos contaminados con As ha sido considerada una técnica factible y ambientalmente amigable. La efectividad de la fitoremediación se ve determinada por dos factores, primero la identificación de plantas hiperacumuladoras de As y segundo por el conocimiento de factores que maximicen la acumulación de éste.

Estudios recientes muestran que los sistemas extendidos de raíces de árboles son más adecuados que las especies herbáceas para remediar capas profundas del suelo contaminado. Los problemas que se desarrollan cuando se utiliza la fitoremediación es que, quizá los contaminantes entren fácilmente a la cadena alimenticia y otro problema puede ser que a través de los microporos los contaminantes se lixivien (Roulier S. *et al.* 2008).

En la literatura técnica reciente (Chaney R. L. *et al.* 2007), se ha encontrado que es posible limpiar el suelo de los compuestos inorgánicos con una combinación de una elevada toma y translocación de contaminantes a la biomasa cosechable.

Los estudios recientes de fitoremediación muestran que la parte de la raíz puede tomar los metales pesados especialmente los de plomo y cobre (Del Río Celestino M. *et al.* 2006; Marmioli M. *et al.* 2005; Vazquez S. *et al.* 2006; Yoon J. K. *et al.* 2006), por lo que los exudantes de la raíz pueden causar precipitación o movilización del metal, tal como Roulier y colaboradores (2008) describen en su estudio.

La movilidad del As en suelos y sedimentos es altamente controlada por los procesos de precipitación, dilución y/o de sorción de la superficie de partículas metálicas (Smedley P. L. and Kinniburgh D. G 2002), por otra parte la disposición final de As es afectada por la materia orgánica (Bauer M. and Blodau C. 2006; Buschmann J. *et al.* 2006). A partir del estudio de estos mecanismos, es posible proponer diversos métodos que controlen la movilidad del As en suelos y de esta manera proponer una remediación efectiva para suelos contaminados por As.

Recientemente algunos autores (Srivastava M. *et al.* 2006) reportaron que *P. Biaurita* L. *P. quadriaurita* Retz y *P. ryukyuensis* Tagawa son hiperacumuladores de As. Todos estos hiperacumuladores son helechos y pueden potencializarse para ser usados en fitoremediación de sitios contaminados por As. Anteriormente se validó el descubrimiento del hiperacumulador de As *Pteris viatta* y posteriormente otras especies tales como como *Ptyrogramma calomelanos* (Francesconi K. 2002) y *P. Longifolia* y *P. Umbrosa* (Zhao F. J. *et al.* 2002).



### 3.2. Estado del Arte en Agua-Planta

La relación entre la concentración de As en agua y la concentración de As absorbida por la planta está influenciada por algunos parámetros tales como el pH, temperatura, tipo de suelo, tipo de planta entre otros, por lo que es necesario estudiar la relación entre el sistema agua-planta.

Algunos autores (Dahal B.M. *et al.* 2008) monitorearon la influencia de la contaminación de As por agua de irrigación sobre suelos alcalinos y la toma de As en plantas Agrícolas a nivel campo. Los rangos de concentración de As en el agua de irrigación fueron de 0.005 a 1.014  $mg L^{-1}$  donde las concentraciones de As medidas en suelo variaron de 6.1 a 16.7  $mg kg^{-1}$ , el contenido de As en las diferentes partes de la planta se encontró en el orden de raíces > retoños > hojas > partes comestibles. La media de la concentración de As (peso seco) que se encontró en los diferentes cultivos estudiados se muestra en la Tabla 3.1 de la cual se concluye que el contenido de As en suelo y plantas es influenciado por la concentración de As en el agua de irrigación.

Tabla 3.1. Concentraciones de As en diferentes cultivos (peso seco)

<b>Cultivo</b>	<b>Concentración</b> ( $mg As kg^{-1}$ )
<b>Hoja de cebolla</b>	0.55
<b>Bulbo de cebolla</b>	0.45
<b>Coliflor</b>	0.33
<b>Arroz</b>	0.18
<b>Berenjena</b>	0.09
<b>Papas</b>	0.01

### 3.2.1. Remediación en Agua

En América Latina algunas poblaciones presentan severos problemas de salud debido al consumo de aguas con alto contenido de As, debido a esto, diferentes métodos de remoción de As han sido aplicados en las aguas de América Latina. Tecnologías convencionales tales como la oxidación, coagulación – co precipitación, adsorción, osmosis inversa, intercambio de iones, aunque son técnicas muy costosas, son utilizadas para remover el arsénico del agua. Por este motivo han emergido métodos más económicos descentralizados tales como adsorbentes naturales, luz solar o tratamientos biológicos como métodos esenciales para reducir la contaminación de As en zonas de bajos recursos y aisladas en regiones de América Latina (Litte M. I. *et al.* 2010).

Otros autores (Manna A. K. *et al.* 2010) han investigado la remoción de As de aguas subterráneas contaminadas empleando un nuevo método que trabaja con membranas de destilación en contacto directo con membranas solares. Este sistema produce casi el 100 % de agua libre de As. Los resultados muestran que el diseño podría ser efectivo en muchas áreas rurales del sur-este de Asia que cuentan con un largo periodo de luz solar particularmente durante la crítica estación seca. La membrana de destilación solar tiene un alto potencial para remover As en aguas subterráneas contaminadas.

Por otro lado (Meltem B. B. and A. Pala 2010) se ha investigado el uso de sulfato de aluminio para remover el As contenido en el agua por precipitación – co precipitación. Se realizó un diseño estadístico de experimentos box Bahnken (BBD) así como la metodología de superficie de respuesta para investigar los efectos de las variables de operación más significativas. Inicialmente las variables de operación fueron arsenatos, pH y sulfato de aluminio las cuales fueron consideradas como variables independientes en el diseño de box Bahnken mientras la remoción de arsenato fue considerada la variable de respuesta. El sulfato de aluminio fue encontrado como un coagulante efectivo y seguro debido a la dosis que se requiere de este. El rango de pH óptimo para la máxima remoción

de arsenato fue de 6 a 8. A bajas concentraciones de arsenato la eficiencia de remoción obtenida fue alta aplicando dosis altas de sulfato de aluminio, mientras que para concentraciones iniciales altas de arsenatos una eficiencia de remoción alta fue realizada con dosis bajas del coagulante. Este estudio mostró que la metodología del diseño estadístico fue eficiente y factible en la determinación de condiciones óptimas para la remoción de As con coagulación y floculación.

### 3.3. Estado del Arte en Planta

La relación de la concentración de As y los cultivos es un tópico de interés general ya que, es la planta el medio por el cual el As pasa a los seres vivos. Por otro lado el efecto que el As tiene sobre el rendimiento de los cultivos es de suma importancia ya que impacta el sector agrícola.

El consumo de arroz es la mayor exposición a As orgánico en Asia, por lo que recientemente se han realizado estudios sobre la acumulación y especiación de As en diferentes especies de cultivos de arroz. Algunos autores (Lu Y. *et al.* 2010) estudiaron la especie *Indica* y un híbrido de *Indica* en donde encontraron que las concentraciones de As en las diferentes secciones del cultivo incrementan en el orden de [As] grano < [As] cascara < [As] tallo < [As] raíz. La concentración de As presente en el grano de ambos cultivos presentó una diferencia significativa y correlacionada con la concentración de fósforo siendo más alta para el cultivo *Indica* que para el híbrido *Indica*, por otro lado se encontró que el As inorgánico es la especie dominante presente en los granos de arroz en las especies analizadas.

Por otro lado en Polonia se realizan estudios de comparación de la concentración y especiación de As incorporado a plantas en crecimiento en presencia de diferentes compuestos de As en mostaza, en donde encontraron que la mostaza tiene una capacidad para absorber As en sus diferentes formas. Las muestras de mostaza fueron cultivadas en diferentes soluciones que contenían, As (III), As(V), Ácido MonometilArsonico (MMA) ó ácido dimetilarsónico (DMA). El factor de

translocación reportado por los autores fue alto (0.70) cuando el DMA fue agregado a la solución nutriente(Lukasz J. *et al.* 2010).

Algunos autores (Vamerali T. *et al.* 2009) encontraron que la concentración de los elementos traza es mucho más alta en las raíces de los árboles que en la parte aérea, siendo más acentuada esta acumulación en las raíces finas. En las diferentes especies utilizadas en este estudio se encontró un pronunciado envejecimiento en las raíces gruesas.

Por otra parte, se ha encontrado (Ruiz-Chancho M. J. *et al.* 2008) que la concentración de As en muestras de plantas, en sitios contaminados con As en suelo en un rango de 1.14 a 98.5  $mg\ kg^{-1}$  (masa seca), esta alrededor de los 1750  $mg\ kg^{-1}$  mientras que en plantas que crecen en sitios con las mismas características geológicas contenían concentración en un rango de 0.06 a 0.58  $mg\ As\ kg^{-1}$ . Por otro lado el arsenito y el arsenato fueron encontrados en todas las muestras de planta y en algunas especies de planta se encontró arsénico orgánico en las formas de metilarseniato (MA), DMA y óxido de trimetilarsina (TMAO).

En México diversos estudios se han realizado sobre acumulación de As en tejidos de algunos vegetales tales como tomate de hoja verde, jitomate, cilantro, rábano, lechuga, acelga y chayote en los cuales se han encontrado concentraciones de As relevantes (Prieto F. *et al.* 2005; Saldaña-Robles A. 2008; Saldaña-Robles A. *et al.* 2007). En el estado de Guanajuato se ha determinado un conjunto de pozos en el municipio de Irapuato, Guanajuato de agua potable con altas concentraciones de As (Fabiola 2007). Elias-Cabrera (Fabiola 2007) recomienda no consumir el agua extraída en forma directa y sugiere hacer un estudio para el análisis de agua en los pozos agrícolas cercanos a esta área.

## IV. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto producido por el arsénico tanto en campo como en invernadero sobre el rendimiento del cultivo en una región de Irapuato Gto.

### 4.1. Objetivos Específicos

Determinar las concentraciones de As en agua de pozo para uso agrícola.

Definir los cultivos más importantes que sean regados con agua de pozos potencialmente contaminados.

Seleccionar las parcelas en las cuales se sembrará Cebada.

Muestrear agua, suelo y cultivo en las zonas definidas.

Determinar pH, temperatura y concentración de As en las muestras obtenidas de agua.

Determinar la concentración de As en las muestras biológicas y de suelo obtenidas.

Determinar la influencia del P sobre la sorción de la concentración de As en planta.

Diseñar un experimento  $3^2$ , con variables de entrada arsénico y fosforo, y variable de salida la concentración de arsénico en planta.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se presentará una descripción del medio físico donde se realizó el estudio de la presente tesis, así como los materiales y métodos utilizados para el estudio de las concentraciones de As en agua, suelo y planta tanto para condiciones controladas (en invernadero) como para condiciones no controladas (en campo).

### 5.1. Estudio de la Concentración de As en Suelo y Planta en Invernadero

#### 5.1.1. Concentraciones de As y P en Agua

Para la irrigación del invernadero se utilizó agua destilada, a la cual se le agregaron los tratamientos descritos en la sección 5.2.1.1.

##### 5.1.1.1. Tratamientos

Se realizó un diseño de experimentos  $3^2$  considerando 2 variables. La concentración de As y la concentración de P, con tres niveles cada factor. Los niveles del factor P fueron 120, 210 y 300  $\mu\text{g L}^{-1}$ , mientras que los niveles de As fueron 50, 200 y 400  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Como variable de respuesta se determinó la concentración de As que absorbió en cada una de las partes de la planta. Se realizó con un replica. La Tabla 5.1 muestra los tratamientos aplicados.

Tabla 5.1. Tratamientos utilizados para la preparación de las soluciones de riego.

Tratamiento	As ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	P ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )
1	50	120
2	200	120
3	400	120
4	50	210

<b>5</b>	200	210
<b>6</b>	400	210
<b>7</b>	50	300
<b>8</b>	200	300
<b>9</b>	400	300
<b>Blanco</b>	0	0

Se utilizaron 3.8 L de agua destilada con las concentraciones de As y P mostradas en los tratamientos. El agua destilada se utilizó para introducir concentraciones adicionales de As y P al sistema.

### 5.1.2. Suelo



Figura 5.1. Tratamientos.

El suelo utilizado, proveniente de las parcelas estudiadas en campo fue mezclado para homogeneizarlo. Una vez mezclado se colocó en costales (pilas) con un área de  $0.126 \text{ m}^2$  y una altura de 40 cm. Se seleccionó esta altura para darle suficiente espacio a la raíz, debido a que la altura promedio de la raíz de la cebada de 25 cm. El área seleccionada es el área mínima necesaria para obtener una densidad de plantas tal que se tenga masa suficiente para las determinaciones. Esta área es calculada a partir de la densidad de plantación en campo ( $200 \text{ kg semilla por hectárea}$ ) y la cantidad de plantas necesarias para realizar la determinación de As. La Figura 5.1 muestra el arreglo de pilas con los diferentes tratamientos y sus replicas.

#### 5.1.2.1. Muestreo y Determinación de As en suelo

El muestreo se realizó mediante la técnica de tresbolillo descrita en la sección 5.2.2.1, la determinación de As en suelo se realizó mediante el proceso descrito en la sección 5.2.2.2.

### 5.1.3. Planta

En las pilas preparadas se sembró semilla de cebada en el mes de Diciembre 2009, al mismo tiempo se realizó su primer riego con una lámina de 40 mm.

En el agua de riego se agregaron los tratamientos mencionados en la sección 5.2.1.1.

El segundo riego se realizó a los 30 días de haber sido sembrada la cebada, la lámina de agua utilizada fue de 60 mm bajo las mismas condiciones de tratamiento aplicadas en el primer riego. El tercer riego se realizó 21 días después del segundo riego, y el cuarto riego se realizó 30 días después del tercer riego.

#### 5.1.3.1. Muestreo de Plantas

A diferencia del muestreo en Campo, el muestreo en el invernadero para plantas se realizó para cada pila (costal) utilizando el método de tresbolillo descrito en la sección 5.2.5.1. La Figura 5.2 muestra los tratamientos al mes de haber sido sembrada la semilla de cebada.



Figura 5.2. Tratamientos a los 30 días.



### 5.1.3.2. Determinación de Arsénico en Planta

La determinación de As en las diferentes secciones de la cebada y para los diferentes tratamientos se realizó de la forma descrita en la sección 5.2.5.2.

## 5.2. Estudio de la Concentración de As en Agua, Suelo y Planta en Campo

### 5.2.1. Selección y Descripción del Área de estudio

El área de estudio seleccionada corresponde a una parte del área Agrícola del municipio de Irapuato Gto., la cual se extiende hacía el municipio de Silao Gto.

### 5.2.2. Descripción del Medio Físico

#### 5.2.2.1. Localización

El Municipio de Irapuato se localiza prácticamente en el Centro del Estado. Como muestra la Figura 5.3, tiene una superficie de 786.40 Km<sup>2</sup> y una población de 440,134 habitantes (Municipal 2010).

Colinda al Norte con los municipios de Silao y Guanajuato; al Este con el municipio de Salamanca; al Sur con los municipios de Pueblo Nuevo y Abasolo y al Oeste con los municipios de Romita y Abasolo.

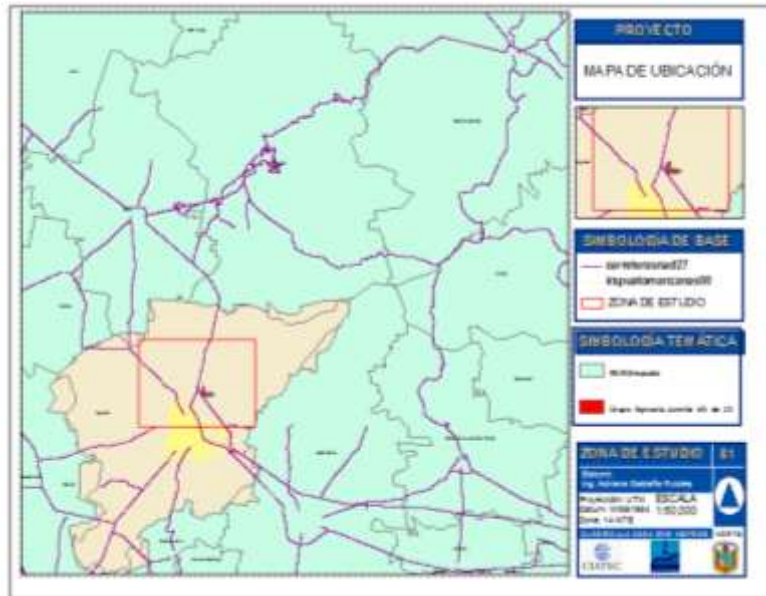


Figura 5.3. Localización del área de estudio.

#### 5.2.2.2. Geología

Las Unidades Geológicas por las que se compone el municipio de Irapuato Gto., son descritas a continuaciones y mostradas en la Figura 5.4.

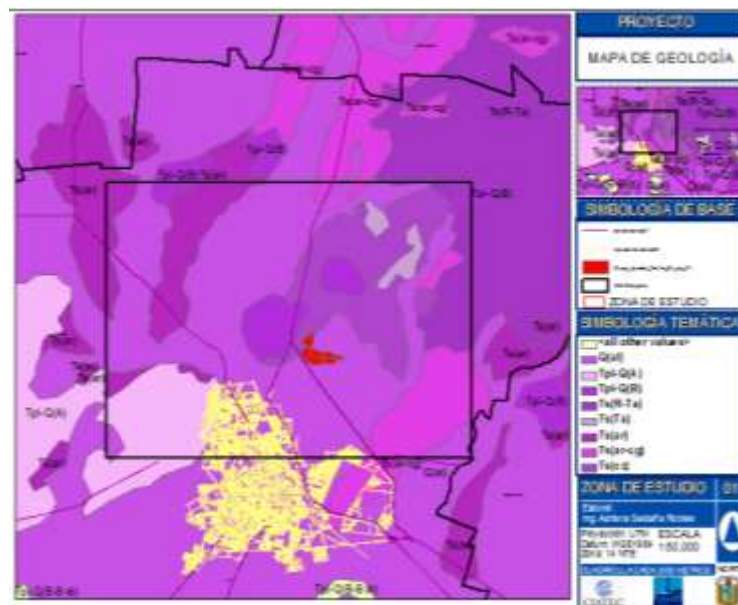


Figura 5.4. Mapa geológico de la zona de estudio.

#### Aluvión Q(al)

Se presentan los sedimentos de arenas, limos y arcillas. Contiene detritos de diversa composición y grado de redondez, de forma general se presenta una composición mineralógica de cuarzo y plagioclasa.

#### Basalto Tpl-Q(B)

En esta agrupación se identifica a una unidad de basalto de olivino y andesíticos de textura afanítica y porfírica; mineralógicamente se compone de labradorita y andesita y como minerales accesorios presenta el olivino e hiperstena.

#### Andesita Tpl-Q(A)

Mineralógicamente está formada por andesita y contiene como minerales la augita, biotita y hornblenda, entre otros. Cubre de manera discordante a rocas sedimentarias clásicas del Terciario Superior.

#### Riolitas-tobas ácidas Ts(R-Ta)

Esta unidad geológica presenta una alternancia de tobas riolíticas de espesores considerables; es de textura afanítica y porfídica según la localidad. Esporádicamente presenta afloramientos de brechas volcánicas de la misma composición. En menor proporción también se encuentran dentro del territorio la arenisca Ts(as), Arenisca y Conglomerado Ts(ar-cg) y Caliza Ts(cz).

### 5.2.2.3. Suelos

Los suelos predominantes en el municipio de Irapuato Gto., se muestran en la Figura 5.5 y se describen a continuación.

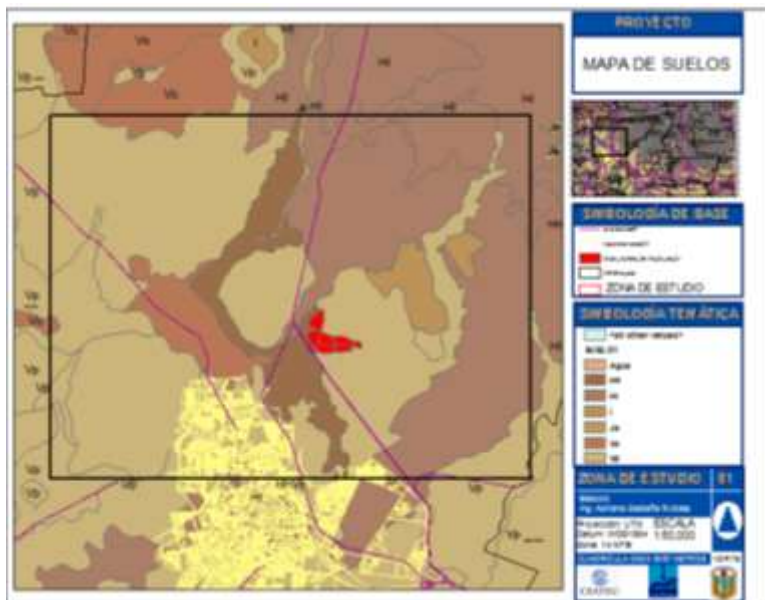


Figura 5.5. Mapa de suelos de la zona de estudio.

Feozem Háplico (Hh).- son suelos pardos, con una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes; los que se ubican en lugares planos frecuentemente son profundos y muy fértiles, los que se ubican en laderas y cerros. Estos suelos son más someros, menos productivos y fácilmente se erosionan.

Vertisol Pélico (Vp).- Se caracterizan por la presencia de anchas y profundas grietas que se forman en la época de secas por pérdida de humedad. Son suelos muy arcillosos, frecuentemente negros o grises oscuros, pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando están secos.

Feozem lúvico (Hl).- Se caracteriza por presentar en el subsuelo una capa de acumulación de arcilla. Algunos de estos pueden ser más infértiles.

#### 5.2.2.4. Climas

Los climas predominantes en esta región se muestran en la Figura 5.6 y se describen a continuación.

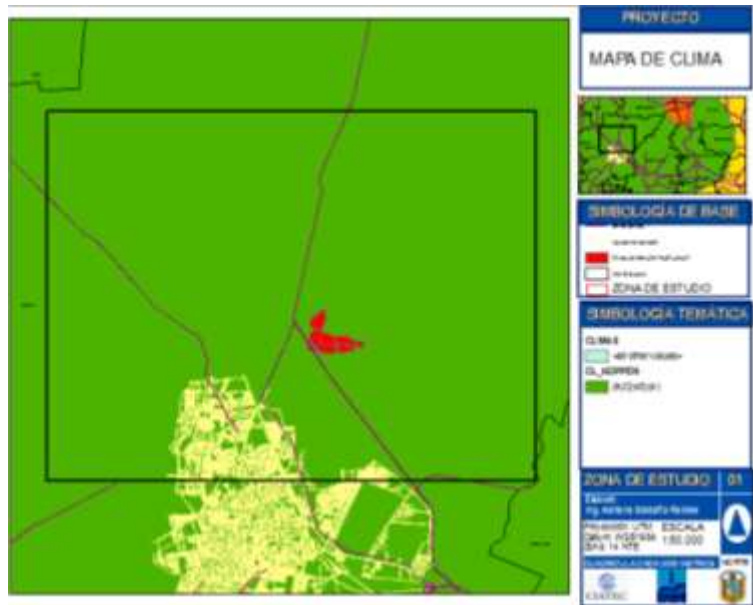


Figura 5.6. Mapa de clima de la zona de estudio.

Semicálido Subhúmedo (A)C(W0).- Semicálido con lluvia de verano, el más seco de este grupo con un porcentaje de lluvia invernal menor a 5. Temperatura anual mayor de 18°C.

Templado Subhúmedo Cw0w.- Clima templado, el más seco de los templados con un cociente P/T menor de 43.2. Participación pluvial de 700mm y temperatura promedio anual de 18°C.

### 5.2.3. Distribución de la Concentración de As en Agua

#### 5.2.3.1. Muestreo de Agua

El conjunto de pozos muestreados se seleccionó del tal forma que fueran representativos del total del pozos Agrícolas en el área seleccionada mostrada en la Figura 5.7. Esta área fue seleccionada debido a que estudios previos (Fabiola 2007; Rodríguez-Castillo R. 2005) reportaron altas concentraciones de As en

diferentes pozos de uso potable, sugiriendo necesario analizar las concentraciones de As en el agua de pozos agrícolas.

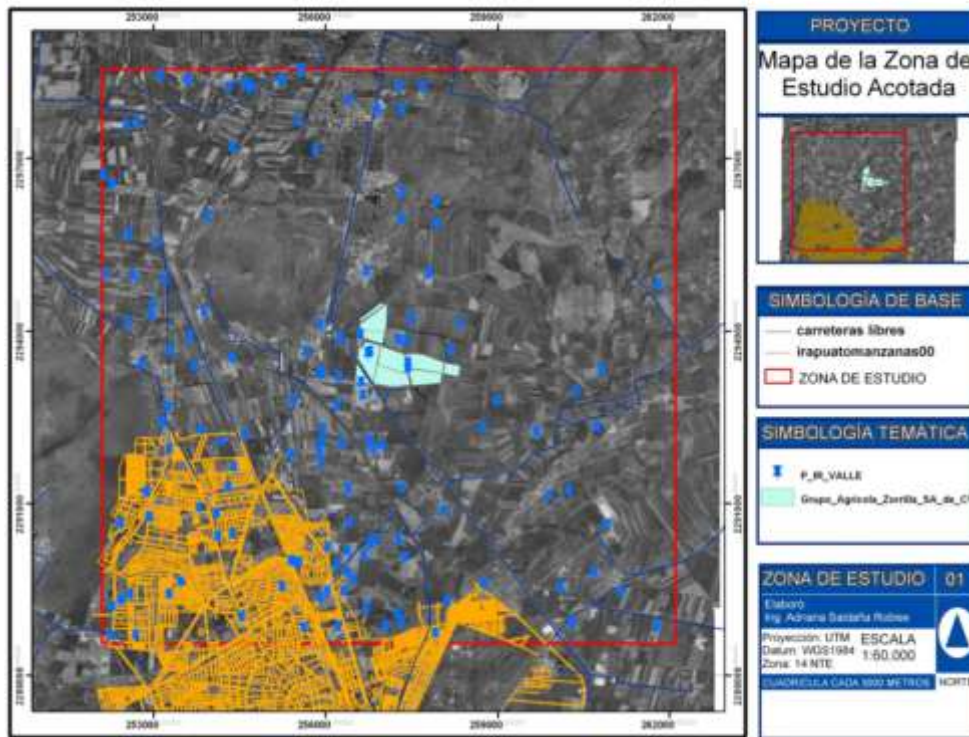


Figura 5.7. Zona acotada para muestreo de agua.

El muestreo fue efectuado con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993 de "Procedimientos Sanitarios para el Muestreo de Agua para uso y Consumo Humano en Sistemas de Abastecimiento de Agua Públicos y Privados" de la siguiente forma:

- Se utilizaron envases de polietileno.
- Los envases fueron lavados y enjuagados perfectamente con agua destilada.
- Una vez en las zonas de muestreo, el agua se dejó correr por más de 3 minutos (10 minutos) para asegurar de que el agua estancada en las tuberías hubiera salido por completo.
- Una vez transcurridos los 10 minutos se tomó agua en el envase y se tapó. Posteriormente se agitó vigorosamente y se tiró el agua para enjuagar el envase. Éste procedimiento se efectuó de 2 a 3 veces.

- Las muestras se transportaron al laboratorio a una temperatura  $<10^{\circ}\text{C}$ , en una hielera.
- Para la determinación de As en agua el tiempo máximo permitido entre la colección de muestras y el análisis es de 14 días.

Se realizaron 3 muestreos de agua durante el proyecto, el primero en Julio del 2009, el segundo muestreo se realizó en Diciembre del 2009 y el tercer muestreo se realizo en Mayo del 2010.

#### 5.2.3.2. Determinación de Arsénico en Agua

El método empleado para la determinación de arsénico fue el de espectrometría de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES). Esta es una técnica analítica usada en la detección de metales traza. Esto es un tipo de espectrofotometría de emisión que usa plasma acoplado inductivamente para producir iones y átomos excitados que emitan radiación electromagnética en longitudes de onda características del elemento en particular. La intensidad de esta emisión es un indicador de la concentración del elemento en la muestra.

La determinación de pH y temperatura en las muestras se llevó a cabo mediante: el uso de electrodos de ión específico en un Denver instrument modelo 220 pH ISE, termómetro de mercurio (escala de  $-10$  a  $100^{\circ}\text{C}$ ) para temperatura.

#### 5.2.4. Distribución de la Concentración de As en Suelo

##### 5.2.4.1. Selección y Muestreo de Parcelas

Las parcelas seleccionadas cumplen las siguientes características;

- Se encontraban muy cercanas por lo cual la variación climatológica y geológica es mínima.
- El agua de riego usada en las parcelas es contrastante, es decir, mientras que la parcela 1 es regada con agua que presenta concentraciones de As  $\leq 25 \mu\text{g L}^{-1}$ , el agua de riego para la parcela 2 presenta un rango de concentraciones de As de  $170$  a  $250 \mu\text{g L}^{-1}$ .

Se seleccionó la parcela 1 y la parcela 2, las cuales se resaltan en azul en la Figura 5.8. Las concentraciones de As en Agua del pozo utilizado en la parcela 1, son  $\leq 25 \mu\text{g L}^{-1}$ . En el pozo utilizado para la parcela 2 la concentración de As varía en un rango de 170 a  $250 \mu\text{g L}^{-1}$ . Cabe mencionar que dichas parcelas tuvieron 4 riegos en un periodo 5 meses con una lámina de agua de 40 mm para el primer riego mientras que para los riegos restantes se utilizó una lámina de agua de 60 mm.



Figura 5.8. Parcelas seleccionadas para muestreo de suelo y planta.

El muestreo de suelo en las parcelas se realizó en base a la Norma Mexicana de Muestreo de Suelos para la Identificación y la Cuantificación de Metales y Metaloides, y Manejo de la Muestra (NMX-AA-132-SCFI-2006). Se utilizó el método de tresbolillo (conocido como método de cuarteo) en donde las parcelas se dividieron en cuadrantes y se tomaron muestras simples como se indica en la Figura 5.9 para formar una muestra compuesta. El peso de la muestra compuesta fue de 5 kg.



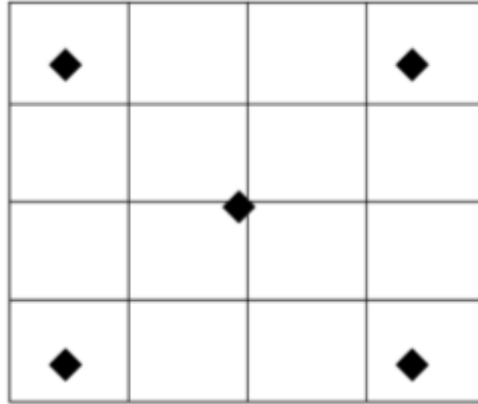


Figura 5.9. Esquema de distribución en tresbolillo de las muestras simples a tomar para la formación de la muestra compleja.

#### 5.2.4.2. Determinación de Arsénico en Suelo

La determinación de As en el suelo se realizó de la misma forma que para la determinación de As en el agua que se muestra en la sección 5.1.1.2, previo a esta determinación la muestra de suelo fue acondicionada de la siguiente manera:

- El suelo fue secado a 40 °C por 48 horas, hasta obtener un peso constante.
- Se pasó a través de un tamiz de 2 mm.
- Se peso 0.5 g de muestra.
- Se le agregó 10 mL de  $HNO_3$  concentrado
- Finalmente se llevaron al horno de microondas

En el horno de microondas se programaron 3 etapas de digestión. La presión en las 3 etapas se llevó hasta 120 psi. En la primera etapa la temperatura fue de 90°C con un tiempo de 15 minutos, la segunda etapa se llevó a 130°C y un tiempo de 10 minutos, y la tercer etapa se manejó con un tiempo de 15 minutos y a una temperatura de 130°C.

La digestión por microondas se basa en la interacción directa de la radiación electromagnética con los disolventes empleados en la muestra en un sistema cerrado, esto con la finalidad de solubilizar los elementos presentes en la muestra mediante ataques ácidos, sin pérdida de analitos para la determinación de la concentración de As en la muestra.

### 5.2.5. Distribución de la Concentración de As en Planta

En las parcelas seleccionadas en la sección anterior se realizó la plantación de cebada en los días 7 y 8 de Diciembre 2009, al mismo tiempo se realizó su primer riego con una lámina de 40 mm. La Figura 5.10 muestra la parcela 1 en su primer riego.



Figura 5.10. Parcela 1 después de la siembra.

En el agua de riego agregaron 200 kg por hectárea de DAP (fertilizante fosfatado), 250 kg de urea por hectárea, y se sembraron 200 kg por hectárea de semilla de cebada. De suma importancia es mencionar que la parcela 1 y la parcela 2 son regadas con pozos diferentes con contenidos de As diferentes, la primera es regada con agua que contiene concentraciones de As menores a  $25 \mu g As L^{-1}$  y en la segunda se encontraron concentraciones en un rango de 170 a  $250 \mu g As L^{-1}$ .

El segundo riego se realizó a los 30 días de haber sido sembrada la cebada. La lámina de agua utilizada fue de 60 mm con las mismas cantidades de DAP y de urea. El tercer riego se realizó 21 días después del segundo riego, en este riego

ya no se agregaron fertilizantes al igual que en el cuarto riego que se realizó 30 días después del tercer riego.

#### 5.2.5.1. Muestreo de Planta

Se realizaron 3 muestreos de planta el primero a los 30 días de haber sido sembrada la cebada, el segundo a los 2.5 meses de ser sembrada y el tercer muestreo se realizó a los 4.5 meses de que fue sembrada la cebada (justo antes de la cosecha). La Figura 5.11 muestra la cebada a los 2.5 meses de haber sido sembrada.



Figura 5.11. Cebada a los 2.5 meses de fue sembrada.

Para el muestreo de planta se utilizó el método de tresbolillo descrito anteriormente en la sección 5.2.2.1. El muestreo se llevó a cabo en las mismas parcelas utilizadas en el muestreo de suelo descrito en la sección 5.2.2.1.

#### 5.2.5.2. Determinación de As en Planta

La determinación de As en la planta se realizó de la misma forma que para la determinación de As en el agua que se muestra en la sección 5.2.1.2, previo a esta determinación la muestra de planta fue acondicionada de la siguiente manera:

- La planta fue lavada y diseccionada en partes, raíz, tallo-hoja y espiga, como muestra la Figura 5.12.
- Cada una de las partes de la planta fueron secadas a 70 °C por 72 horas, hasta tener un peso constante.
- Cada parte de la planta se pasó a través de un tamiz de 1 mm.
- Se peso 0.5 g de muestra en los vasos digestores.
- Se le agrego 10 mL de  $HNO_3$  concentrado
- Finalmente se llevaron al horno de microondas

En el horno de microondas se programaron 3 etapas de digestión, la presión en las 3 etapas se llevó hasta 120 psi, en la primera etapa la temperatura fue de 90°C con un tiempo de 15 minutos, la segunda etapa se llevó a 130°C y un tiempo de 10 minutos, y la tercer etapa se manejo con un tiempo de 15 minutos y a una temperatura de 130°C.



Figura 5.12. a) Espiga de cebada, b) Tallo-Hoja de Cebada.

## VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la presente sección se muestran un análisis y discusión de los resultados obtenido para la determinación de las concentraciones de As en agua, suelo y planta bajo condiciones controladas (invernadero) y bajo condiciones no controladas (campo).

### 6.1. Resultado de la distribución de As en Invernadero

#### 6.1.1. Resultados de la Distribución de As en Suelo

La Figura 6.1 muestra el diagrama del balance de materia con respecto a la concentración de As, en la unidad experimental.

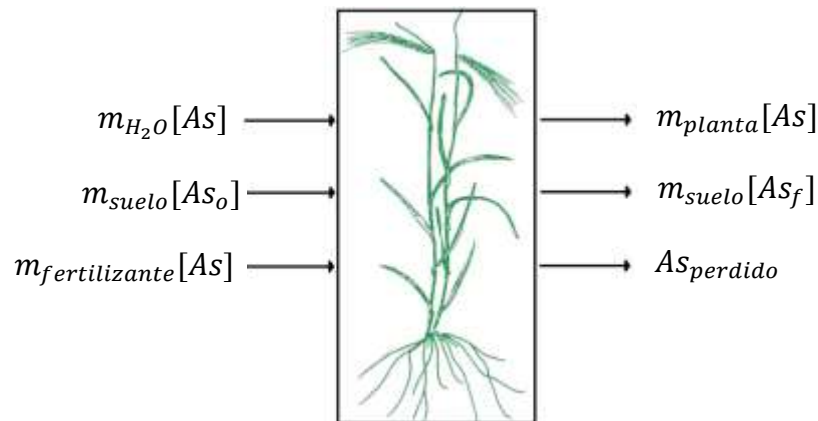


Figura 6.1. Diagrama del balance de materia con respecto a la concentración de As en el sistema de invernadero.

$$m_{H_2O}[As] + m_{suelo}[As_o] + m_{fertilizante}[As] = m_{planta}[As] + m_{suelo}[As_f] + AS_{perdido} \quad (1)$$

En donde;

$m_{H_2O}[As]$  es la masa de agua aplicada al cultivo por la concentración de As contenida en el agua,

$m_{suelo}[As_o]$  es la masa de suelo por la concentración inicial de As en suelo,

$m_{fertilizante}[As]$  es la masa de fertilizante aplicado al cultivo por la concentración de As en los fertilizantes,

$m_{planta}[As]$  es la masa de la planta por la concentración de As en ésta,

$m_{suelo}[As_f]$  es la masa de suelo por la concentración final de As en el suelo,

$As_{perdido}$  es el As perdido en diferentes formas en el sistema.

Debido a que los fertilizantes no contienen concentraciones de As (ver Anexo 1), la ecuación (1) se modificó como muestra la ecuación (2),

$$m_{H_2O}[As] + m_{suelo}[As_o] = m_{planta}[As] + m_{suelo}[As_f] + As_{perdido} \quad (2)$$

Las concentraciones de As y P utilizadas en cada uno de los tratamientos se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Concentraciones de As y P para cada tratamiento.

<b>Tratamiento</b>	<b>As (<math>\mu g L^{-1}</math>)</b>	<b>P (<math>\mu g L^{-1}</math>)</b>
<b>1</b>	50	120
<b>2</b>	200	120
<b>3</b>	400	120
<b>4</b>	50	210
<b>5</b>	200	210
<b>6</b>	400	210
<b>7</b>	50	300

<b>8</b>	200	300
<b>9</b>	400	300
<b>Blanco</b>	0	0

La Tabla 6.2 muestra un resumen de las entradas y las salidas en los 10 tratamientos realizados, donde se muestra el  $As_{perdido}$  por arrastre de agua ó en plantas muertas.

Tabla 6.2. Resumen de entradas y salidas al sistema de invernadero.

Tratamiento	$m_{H_2O}$ (L)	[P] agua	[As] agua	$m_{suelo}$ (kg)	$[As_o]$ en suelo	$m_{planta}$	[As] en planta	$[As_f]$ en suelo	% de $AS_{perdido}$
<b>1</b>	3.8	120	50	35	48041.7	0.1775	7761.76	1107.35	19.13
<b>2</b>	3.8	120	200	35	48041.7	0.1760	15596.2	1263.89	9.74
<b>3</b>	3.8	120	400	35	48041.7	0.1650	19686.1	1099.89	26.81
<b>4</b>	3.8	210	50	35	48041.7	0.1804	11050.03	1262.42	7.95
<b>5</b>	3.8	210	200	35	48041.7	0.1795	9062.43	1408.87	0.78
<b>6</b>	3.8	210	400	35	48041.7	0.1603	17943.84	1364.08	6.71
<b>7</b>	3.8	300	50	35	48041.7	0.1720	7799.5	1193.52	13.15
<b>8</b>	3.8	300	200	35	48041.7	0.1695	4909.52	1284.735	9.97
<b>9</b>	3.8	300	400	35	48041.7	0.1679	15154.35	1184.43	19.10
<b>10</b>	3.8	0	0	35	48041.7	0.1727	3637.84	1330.65	2.67

La Tabla 6.2 muestra que los mayores porcentajes de pérdida de As en el sistema fueron para los tratamientos 1, 3, 7 y 9, mientras que las menores pérdidas se encontraron para los tratamientos 2, 4, 6, 8 y 10, el tratamiento con menor pérdida de As fue el tratamiento 5 fijándose una mayor cantidad de As en suelo que en los demás tratamientos. Aunque el tratamiento 5 no presenta las mayores concentraciones de As en planta. Estos resultados muestran que para las concentraciones de As de  $200 \mu g L^{-1}$  en el rango estudiado, se encontró que

existen menores pérdidas de As lo que indica que el As se queda en planta y suelo. Por otro lado, para concentraciones de As de  $400 \mu g L^{-1}$  se presentaron las mayores pérdidas de As, a pesar de que las concentraciones de As en planta y suelo fueron mayores que para las otras concentraciones de As, lo que indican que el suelo y planta tienen un límite de absorción, por arriba del cual el sistema ya no absorberá más As.

### 6.1.2. Resultados de la Distribución de As en Planta

El análisis de varianza es la técnica central en el análisis de datos experimentales, la idea general de esta técnica consiste en separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento, es decir, la variación debida a los factores y la variación debida al error. Cuando la primera predomina claramente sobre la segunda se concluye que los factores tienen efecto, dicho de otra manera, las medias son diferentes. Cuando los factores no dominan, es decir, contribuyen igual o menos que el error, se dice que las medias son iguales.

En este trabajo se denotará el factor A como la concentración de P con tres niveles los cuales representan las concentraciones seleccionadas (120, 210 y  $300 \mu g L^{-1}$ ), el factor B como la concentración de As con tres niveles, de igual manera que para el P, representan las tres concentraciones seleccionadas (50, 200 y  $400 \mu g L^{-1}$ ) y el factor C como el tiempo con dos niveles que representan el tiempo en que se realizó el muestreo (45 y 90 días).

Para el presente análisis se utilizó la prueba F, dado se hizo un análisis de varianza multifactorial para comparar las varianzas en los factores que intervinieron en el diseño de experimentos. Con el uso de esta prueba se podrá comparar las varianzas de los factores seleccionados (concentraciones de P, As y tiempo) para estimar el efecto de estos factores sobre la concentración de As en la planta.



El análisis de varianza realizado para el presente trabajo se reporta en la Tabla 6.3, donde:

la suma de cuadrados representa la variabilidad parcial atribuible a cada uno de los factores y la adición del error experimental,

los grados de libertad (GL), representan un estimador del número de categorías independientes en una prueba particular o experimento estadístico,

los cuadrados medios son el cociente de la variabilidad del factor y sus grados de libertad,

la razón F representa el estadístico de prueba que sigue una distribución F, así para un nivel de significancia  $\alpha$  prefijado se rechaza la hipótesis nula si el estadístico F es mayor a  $F_{\alpha, k-1, n-k}$  donde este representa el percentil  $(1 - \alpha) \times 100$  de la distribución F,

la significancia  $\alpha$  prefijada es el riesgo máximo que el experimentador esta dispuesto a correr con respecto al error tipo I, es decir a que se rechace la hipótesis nula cuando esta es verdadera,

el valor P es la significancia observada (estimada) que es el área bajo la distribución F más allá del valor del estadístico de prueba y cuando el valor P es menor a  $\alpha$  se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 6.3. Análisis de Varianza para la planta de Cebada.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>	
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>						
A:P	2.58966E7	2	1.29483E7			
B:As	2.59578E8	2	1.29789E8	23.55	0.0061	(1)
C:tiempo	8.86996E8	1	8.86996E8	2178.6	0.0000	(2)
				2		
<b>INTERACCIONES</b>						
Error 1	2.2046E7	4	5.5115E6			
AC	1.23886E7	2	6.19432E6	18.99	0.0002	(2)
Error 2	3.9152E6	12	9.788E5			
<b>RESIDUOS</b>						
TOTAL (CORREGIDO)	1.46184E9	35				

Los resultados obtenidos en la planta de cebada, en el análisis de varianza realizado, muestran que la concentración de As agregada al tratamiento y el tiempo en que se realizó la cosecha de la planta tienen un efecto estadísticamente significativo, con un nivel de confianza del 95%, sobre la concentración de As que absorbe la planta en su estructura, dado que el valor p para estos factores es menor a un nivel de significancia de 0.05.

El efecto del fósforo sobre la absorción de As por la planta en los diferentes tiempos de muestreo es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95% dado que el valor p es menor a 0.05.

La Figura 6.2 muestra la grafica de interacciones entre los diferentes niveles de As y para los diferentes niveles de P, en donde se observa que las bajas concentraciones de As ( $50 \mu g L^{-1}$ ) en todas las concentraciones de P no afectaron la absorción de la concentración As en la planta.

Por otro lado la Figura 6.2 muestra que para el tratamiento con una concentración de As de  $200 \mu g L^{-1}$  y una concentración de P de  $120 \mu g L^{-1}$  se tiene la mayor absorción de As en planta, con respecto a las otras concentraciones de P ( $210$  y  $300 \mu g L^{-1}$ ), mientras que esta concentración de As y una concentración de P de  $200 \mu g L^{-1}$  presentaron la menor absorción de As.

Finalmente, como muestra la Figura 6.2 para los tratamientos con concentraciones de As de  $400 \mu g L^{-1}$  y con respecto a todas las concentraciones de P aplicadas en el experimento la concentración de As absorbida por la planta fue mayor que para las otras concentraciones de As ( $50$  y  $200 \mu g L^{-1}$ ) con respecto a todos los niveles de concentraciones del P.

Con respecto al P la Figura 6.2 muestra que para la concentración de  $210 \mu g L^{-1}$  en todos los niveles de la concentración de As se presentó una menor absorción de la concentración de As en la planta.

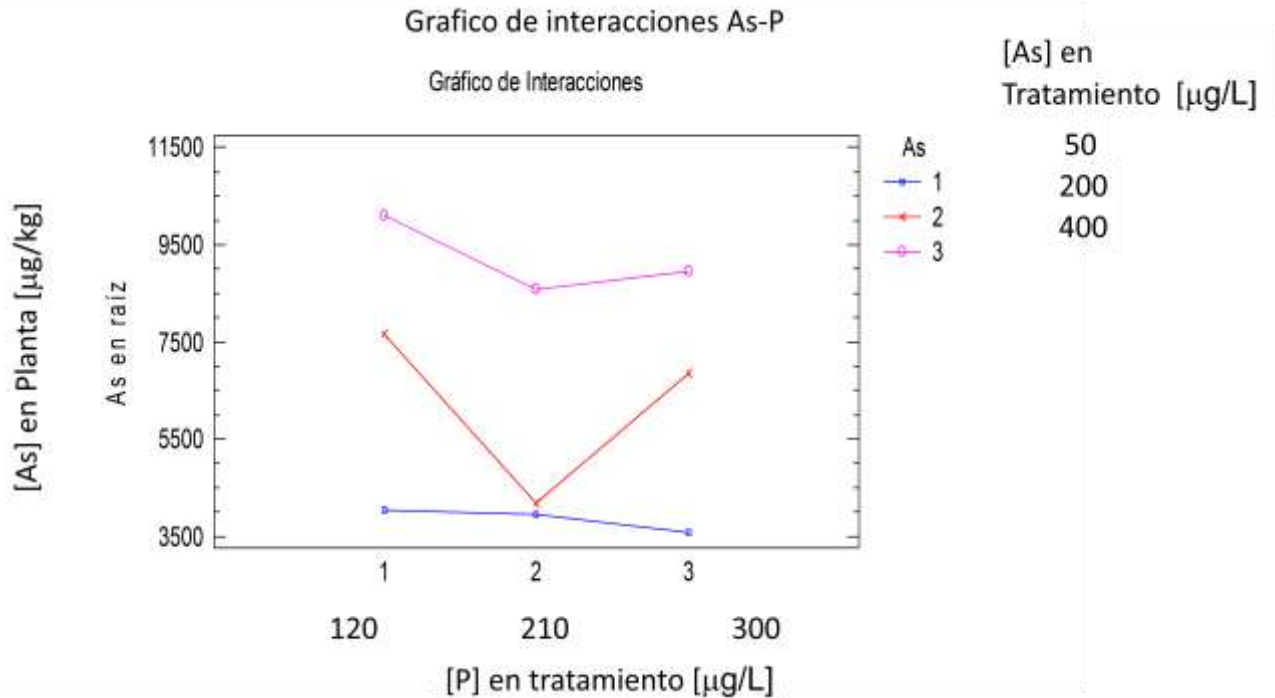


Figura 6.2. Gráfico de efecto de la interacción arsénico (As) y fosforo (P).

En la Figura 6.3 se muestran las interacciones entre los niveles de P y los muestreos realizados. Donde el tiempo 1 y 2 representan el primer muestreo realizado a los 45 días y segundo muestreo realizado a los 90 días. Como se observa para el primer muestreo, la absorción de As en planta se mantuvo casi invariante al incrementar los niveles de fósforo, sin embargo para el segundo muestreo, los niveles de las concentraciones de P de  $120$  a  $210 \mu g L^{-1}$  afectaron la absorción de As en planta, mostrando un decremento de absorción de As por la planta de cebada a mayores concentraciones de P.

En el segundo muestreo la concentración de As en planta disminuyó en un 33% en los tratamientos que contenían  $120 \mu g L^{-1}$  de P con respecto a los

tratamientos que contenían  $120 \mu\text{g L}^{-1}$  de P, pero al incrementar la concentración de P a  $300 \mu\text{g L}^{-1}$  la absorción de As vuelve a incrementar en un 20%.

En cuanto a la absorción de As en planta de cebada entre el primer y el segundo muestreo, se observa que la absorción de As en planta aumentó para el segundo muestreo para todos los niveles de concentración de P con respecto al primer muestreo, lo que muestra que la concentración de As absorbida por la planta esta relacionada con la etapa de crecimiento de la planta de cebada.

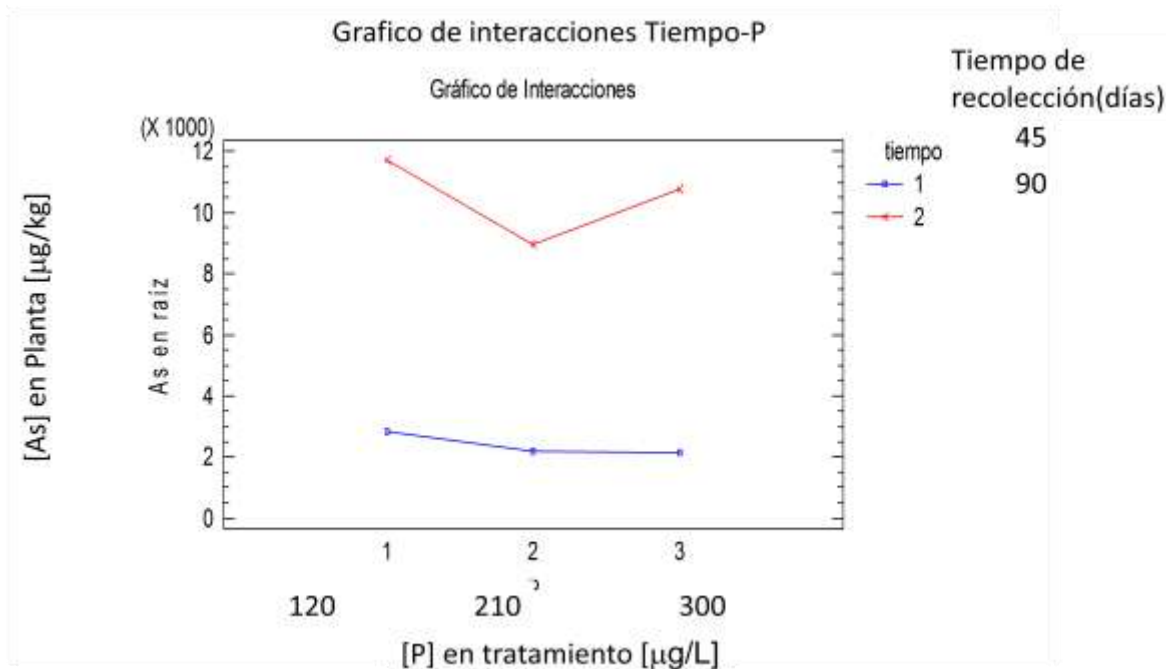


Figura 6.3. Gráfico del efecto de Interacción para fósforo (P) y tiempo.

En la Figura 6.4 se muestran las interacciones entre los muestreos realizados y la concentración de As. Como se observa para el primer y segundo muestreo la concentración de As en la planta de cebada aumenta conforme aumenta la concentración de As en el tratamiento.

Por otro lado cabe mencionar que la absorción de As por la planta de cebada fue mayor en todos los niveles de concentración de As en los tratamientos para el segundo muestreo con respecto al primer muestreo.

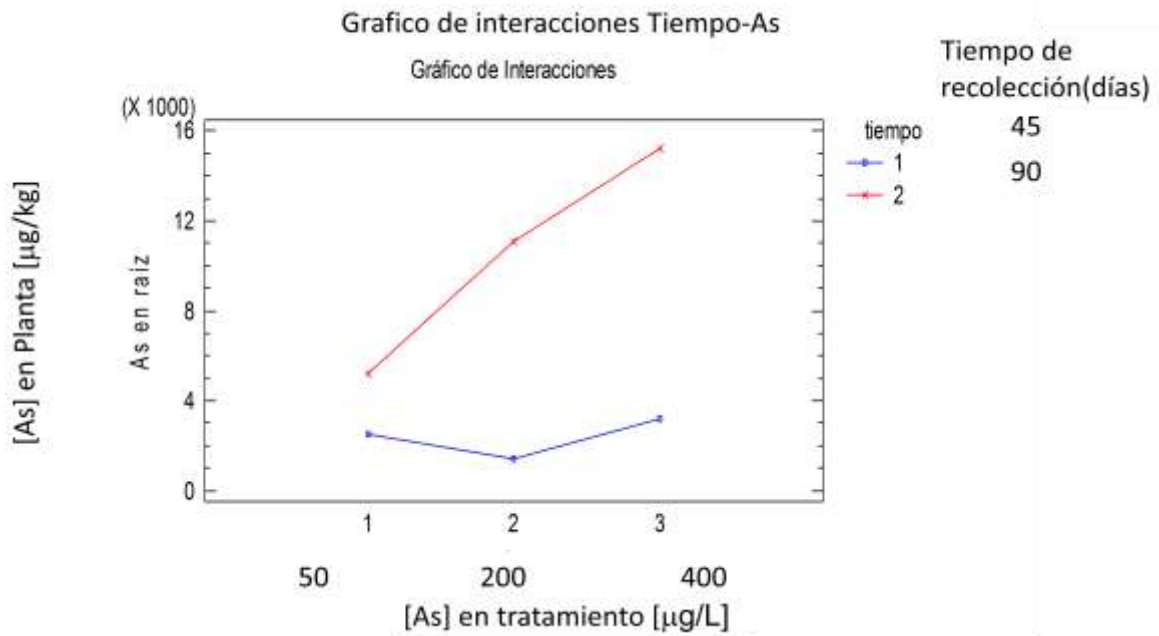


Figura 6.4. Grafica del efecto de interacción arsénico (As) tiempo.

## 6.2. Resultados de la Distribución de As en Campo

Los pozos muestreados en el área de estudio se observan en la Figura 6.5 con la finalidad de que estos sean localizados en los mapas de distribución de temperatura, de pH y de concentración de As..

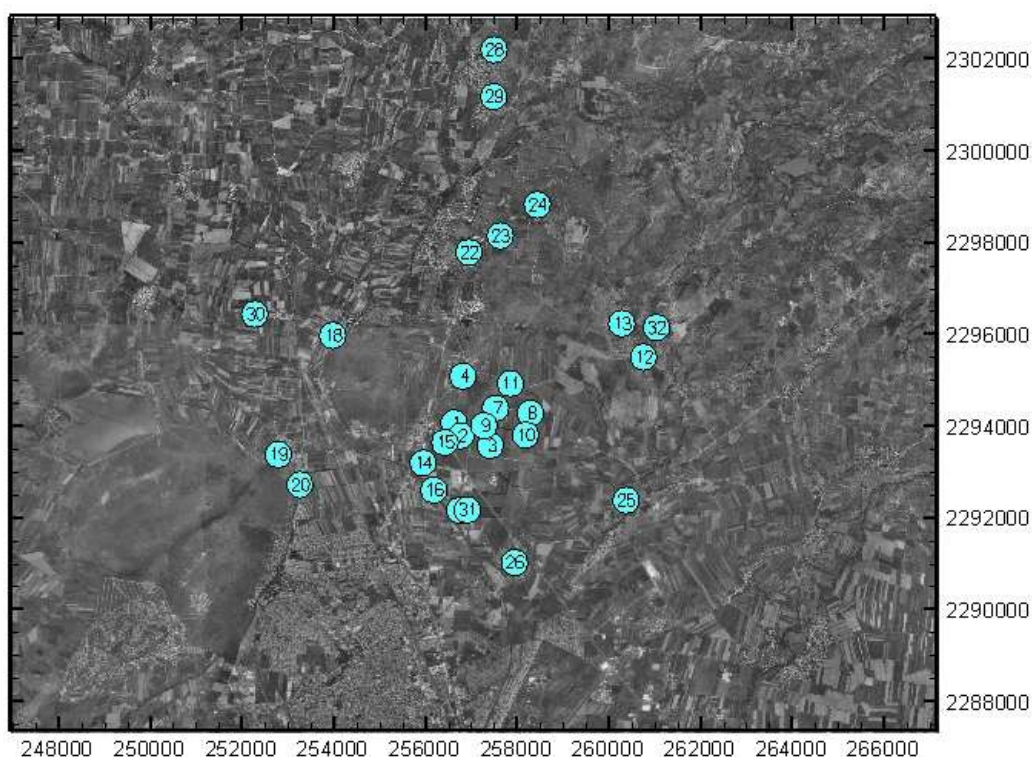


Figura 6.5. Mapa de distribución de pozos de agua seleccionados para el muestreo.

La Tabla 6.4 muestra el nombre, el código del pozo indicado por la CONAGUA así como las coordenadas de ubicación de los pozos de agua seleccionados para el muestreo.

Tabla 6.4. Descripción de los pozos muestreados.

Numero de Pozo	Nombre de Pozo	Código de Pozo	Coordenadas del Pozo	
			x	y
1	La Montañesa	M-001	256596	2294094
2	Isabelita	I-002	256750	2293812
3	La Torre	T-003	257386	2293602
4	ICA	IC-004	256795	2295113
5	Granja Sofía I	SI-007	257501	2294412
6	Granja Sofía II	SII-008	258260	2294304
7	Granja la Estacada I	EI-009	257247	2294031
8	Granja la Estacada II	EII-010	258151	2293826
9	San Antonio El Chico PREDIO EL COPAL	AC-011	257824	2294953
10	Valencianita Fría	VF-012	260720	2295531
11	Valencianita Caliente	VC-013	260245	2296260
12	Harienros	H-014	255926	2293220
13	Los Canarios "Fresas con Crema"	C-015	256400	2293666
14	Sauz de Bernalito "Ejido de Juárez"	SBE-016	256164	2292629
15	Soliman	S-017	256720	2292187
16	Rancho de la Garrida	LG-018	253964	2296001
17	Arandas	A-019	252777	2293408
18	Camino Real de Lo de Juárez	RJ-021	253249	2292746
19	Loma de Lo de Juárez	LJ-022	256922	2297810
20	Villa Verde Agrícola	VAM-023	257602	2298170
21	Caleras de Guanajuato S.A. de C.V.	CGS-024	258408	2298846
22	Carrizal Grande	CG-025	260336	2292407
23	Carrizalito	C-026	257912	2291049
24	La Calera	LC-028	257467	2302228
25	La Purísima El Progreso	PEP-029	257462	2301204
26	Nueva Colonia Copalillo	NC-030	252270	2296466
27	Granja Los Sauces	GS-031	256889	2292199
28	Peñuelas	PÑ-032	261000	2296170

### 6.1.1. Resultados de la Distribución de As en Agua

Los resultados obtenidos de la concentración de As en la zona de muestreo para agua se muestran en las Figuras 6.6 a 6.8 durante el periodo indicado.

Como muestra la Figura 6.6 las concentraciones de As se encontraron en un rango de 20 a 240  $\mu\text{g L}^{-1}$  en el primer muestreo realizado en Julio del 2009, donde 19 de los 30 pozos muestreados sobrepasaron la concentración de As permitida por la NOM 127 SSA 2000 (25  $\mu\text{g L}^{-1}$ ).

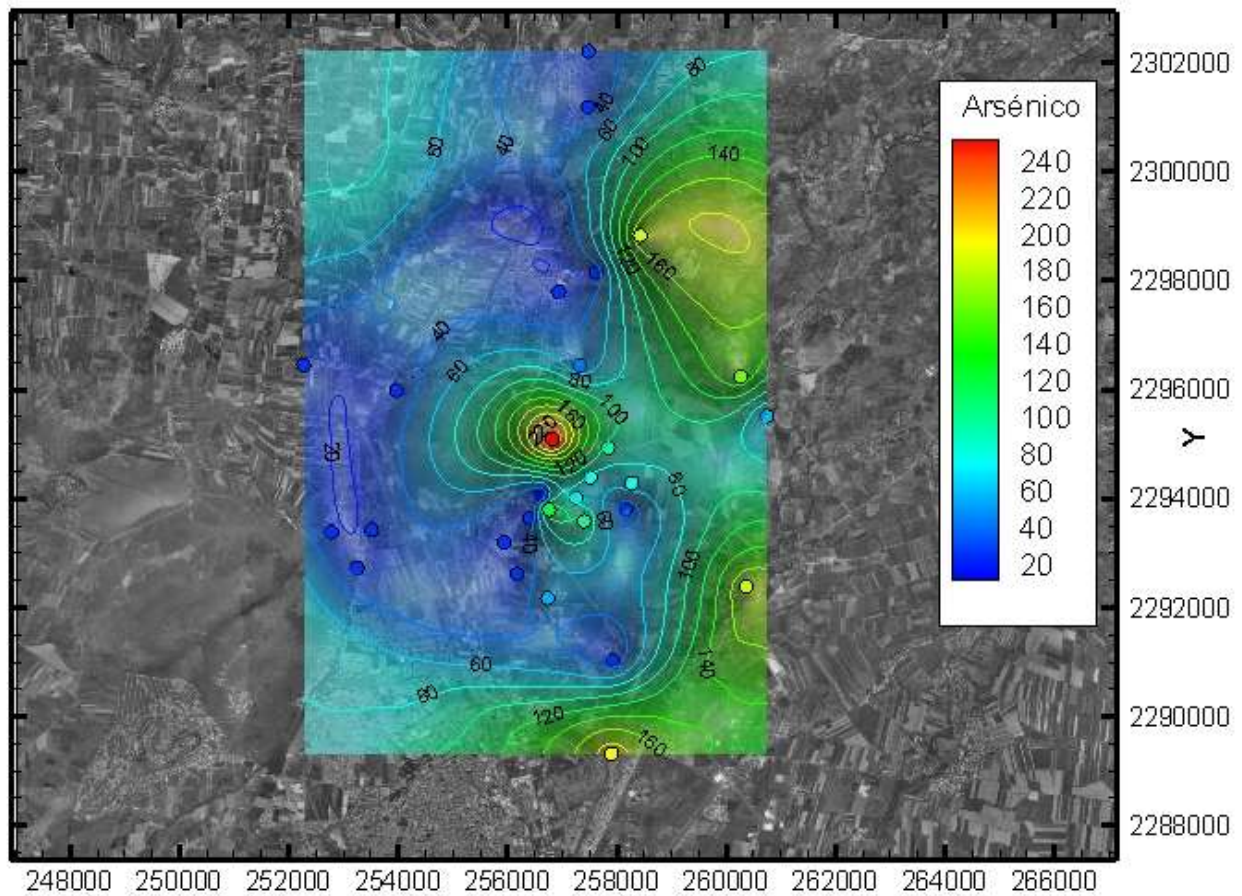


Figura 6.6. Mapa de concentración de As en agua de pozo en el primer muestreo (Julio 2009).

La Figura 6.7 muestra las concentraciones de As que se encontraron en la zona muestreada en Diciembre del 2009, las cuales se encontraron en un rango de 26 a



520  $\mu\text{g L}^{-1}$ , donde 14 de 27 muestras analizadas sobrepasan el límite establecido por la NOM 127 SSA 2000.

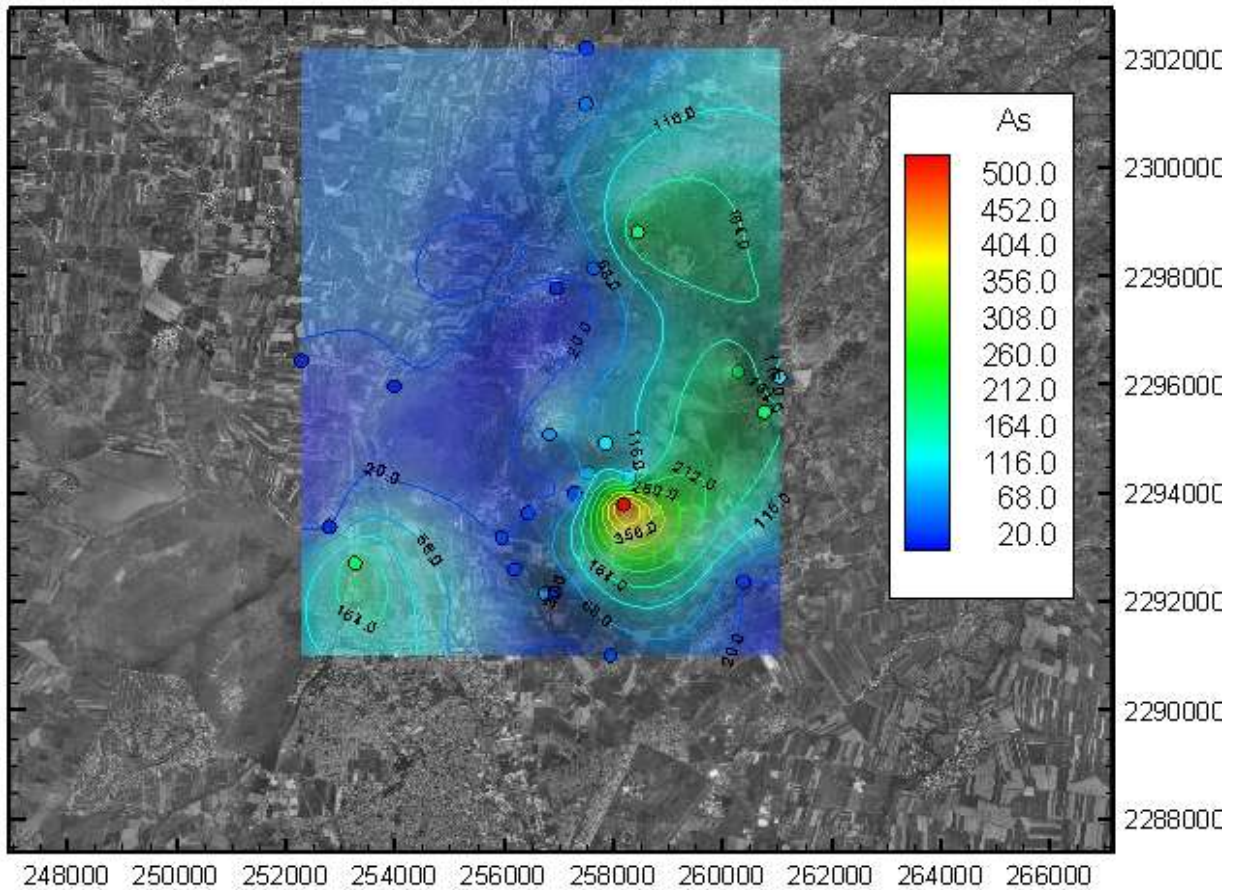


Figura 6.7. Mapa de concentración de As en el agua de pozo en el segundo muestreo (Diciembre 2009).

La Figura 6.8 muestra el mapa de concentración de As en la zona muestreada en Mayo del 2010, el cual presenta concentraciones de As en un rango de 9 a 640  $\mu\text{g L}^{-1}$ , donde 21 valores de 32 están fuera de la NOM 127 SSA 2000.

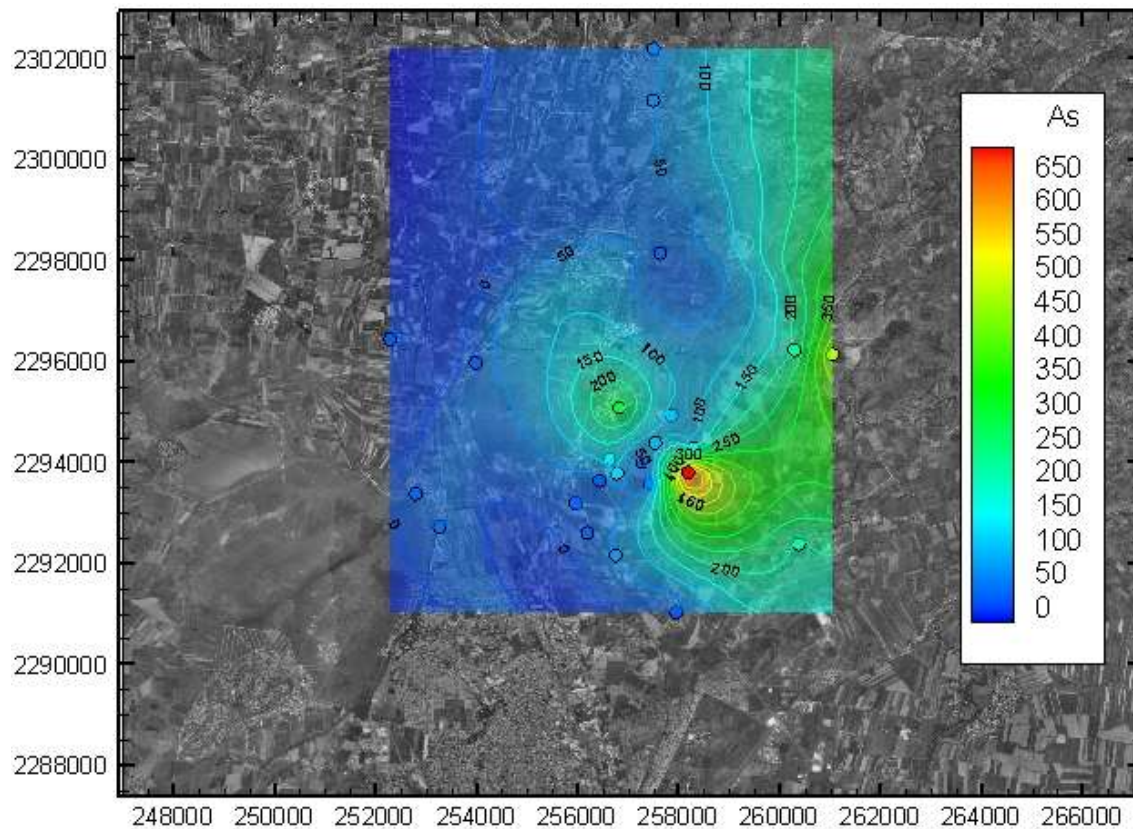


Figura 6.8. Mapa de concentración de As en el agua de pozo en el tercer muestreo (Mayo 2010).

De los resultados obtenidos en los mapas de concentración de As en los diferentes muestreos se observa que entre el primero y el segundo muestreo se presenta una considerable disminución de la concentración de As en el agua de los pozos muestreados (aproximadamente del 50%), a excepción del agua de un pozo en donde la concentración de As aumentó al doble.

En el segundo muestreo con respecto al tercer muestreo realizado en mayo 2010 se presentó un aumento de la concentración de As en la mayoría de los pozos de aproximadamente del 60%, por otro lado el tercer muestreo con respecto al primer muestreo se presentó un ligero aumento (alrededor del 8%) en la mayoría de los pozos, lo que demuestra una variación de la concentración de As en el agua de riego.

Las concentraciones de As en el agua utilizada para riego de cultivos agrícolas en las diferentes etapas de riego estuvieron en un rango de 100 a 250  $\mu\text{g L}^{-1}$  para el

pozo de la Montañesa ubicado como el pozo 1 y concentraciones menores a  $25 \mu\text{g L}^{-1}$  para el pozo Isabelita ubicado como el pozo 2. En los tres muestreos realizados se observó en los tres muestreos realizados se observo que estos dos pozos presentaron una alta concentración de As. un cambio en la concentración de As con respecto a la época.

Se debe considerar que en el segundo muestreo se presentó un fenómeno de precipitaciones pluviales anómalas en dicha época del año (Picado 2009).

El pH fue otro de los factores que se determinó en el muestreo de agua realizado. La Figura 6.9 muestra el mapa de distribución de pH en la zona de muestreo, el cual muestra que el rango de variación en el pH del agua en la zona de muestreo varió entre 7 y 8.8, predominando un pH alcalino por arriba de 7.

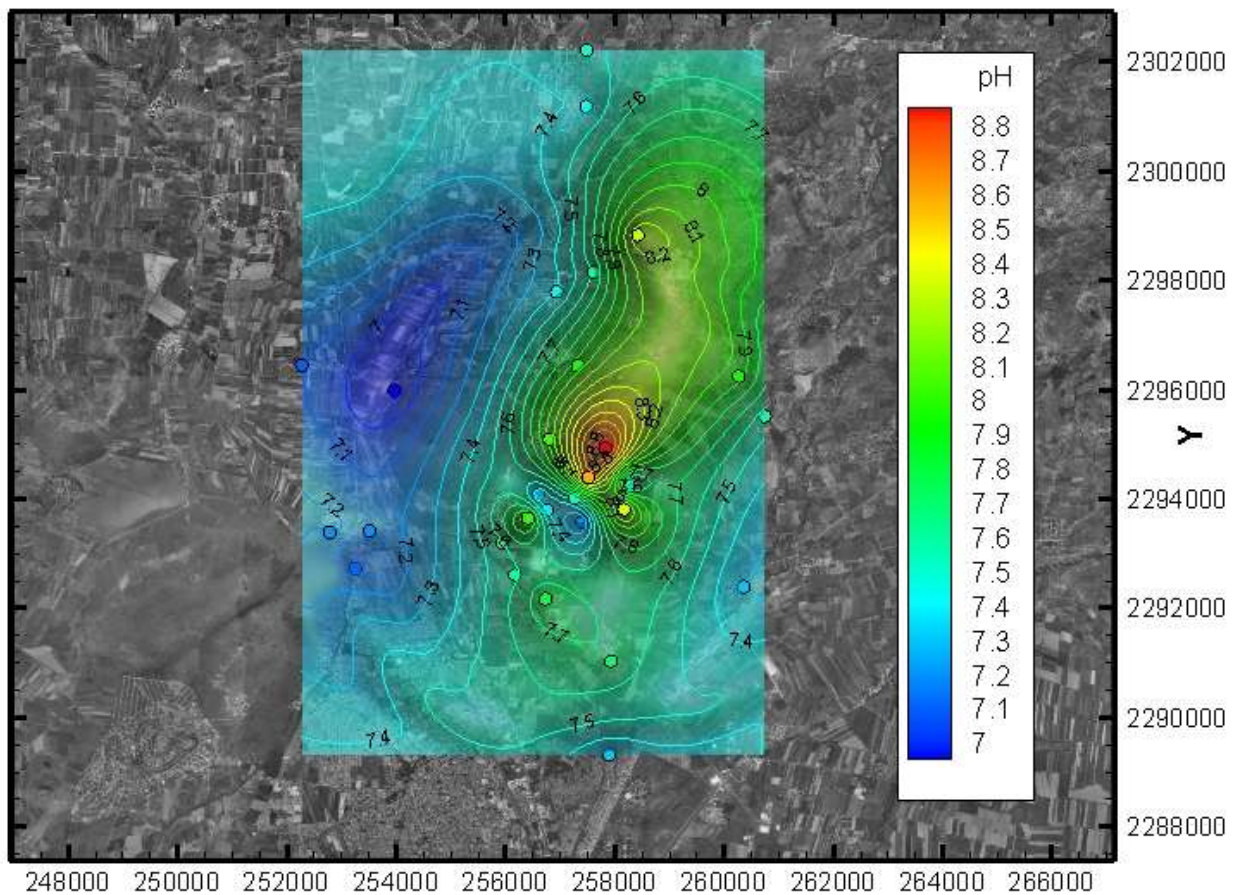


Figura 6.9. Mapa de distribución de pH en el agua de pozo en el primer muestreo (Julio 2009).

La Figura 6.10 muestra el mapa de distribución de pH en la zona de muestreo, en donde el pH varía en un rango de 5.5 a 8.8, predominando un pH por arriba de 7.5 en la zona.

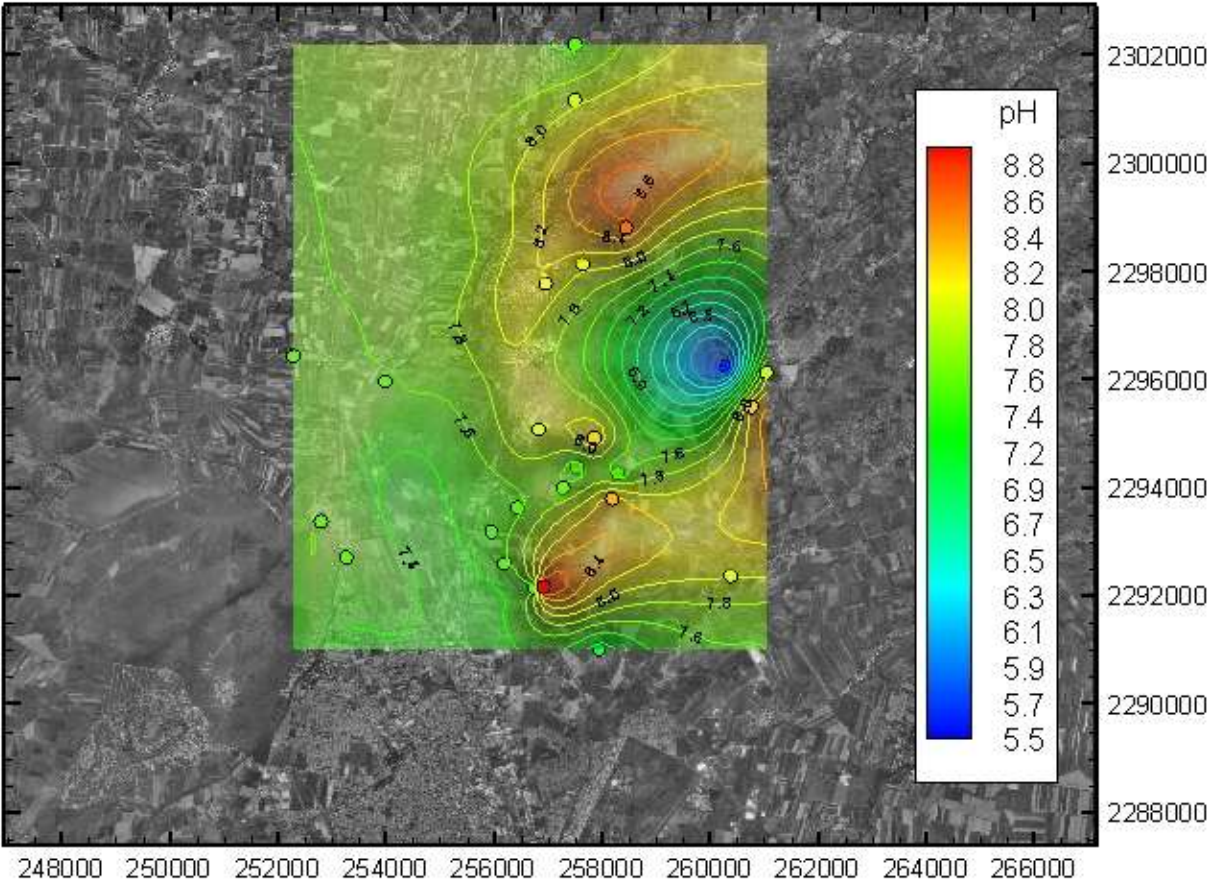


Figura 6.10. Mapa de distribución de pH en el agua de pozo en el segundo muestreo (Diciembre 2009).

La Figura 6.11 muestra el mapa de distribución de pH en la zona de muestreo, en el cual se observa que el pH en la zona es alcalino, el cual varía en un rango de 7.2 a 9.5.

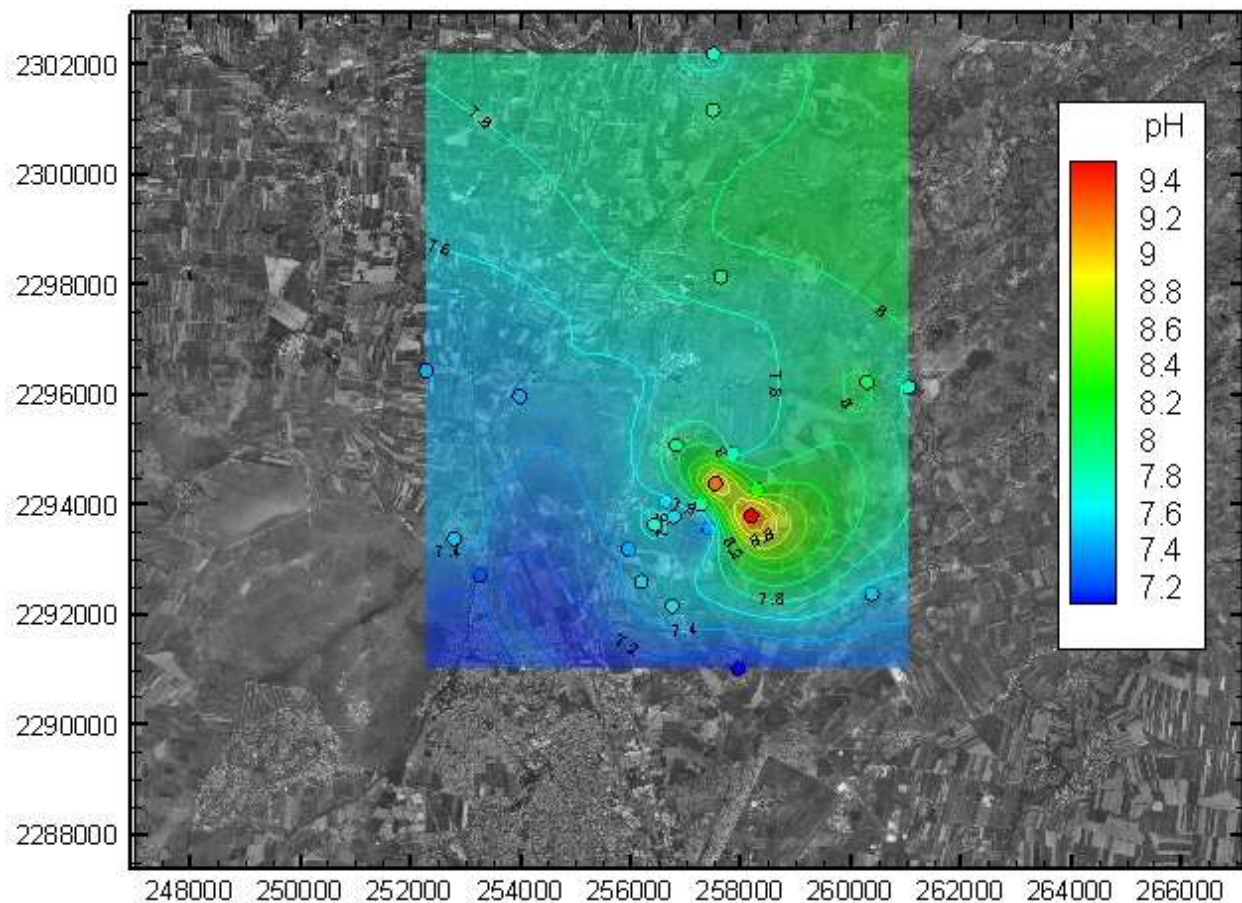


Figura 6.11. Mapa de distribución de pH en el agua de pozo en el tercer muestreo (Mayo 2010).

De las Figuras 6.12 a 6.14 se observa que en los tres muestreos, la distribución espacial de pH se conserva en la zona de muestreo, mientras que con respecto a la distribución temporal se observa un incremento aproximadamente de 0.4 unidades del primer muestreo al segundo muestreo, y una disminución aproximadamente de 0.2 unidades en 27 de 30 pozos muestreados del segundo al tercer muestreo, lo que demuestra que la variación temporal afecta el pH en la zona de estudio.

La temperatura fue otro de los factores que se midió en los tres muestreos realizados en la zona estudiada.

La Figura 6.12 muestra el mapa de distribución de temperatura determinada en las muestras de agua en el periodo Julio 2009, el cual muestra que las temperaturas en el área estudiada varían en un rango de 22 a 60 °C, en 24 de las muestras de agua la temperatura se encontró entre 27 y 35 °C mientras que en 3 muestras de agua se encontró una temperatura mayor a los 45°C, y en 2 muestras se encontró una temperatura por debajo de los 25 °C.

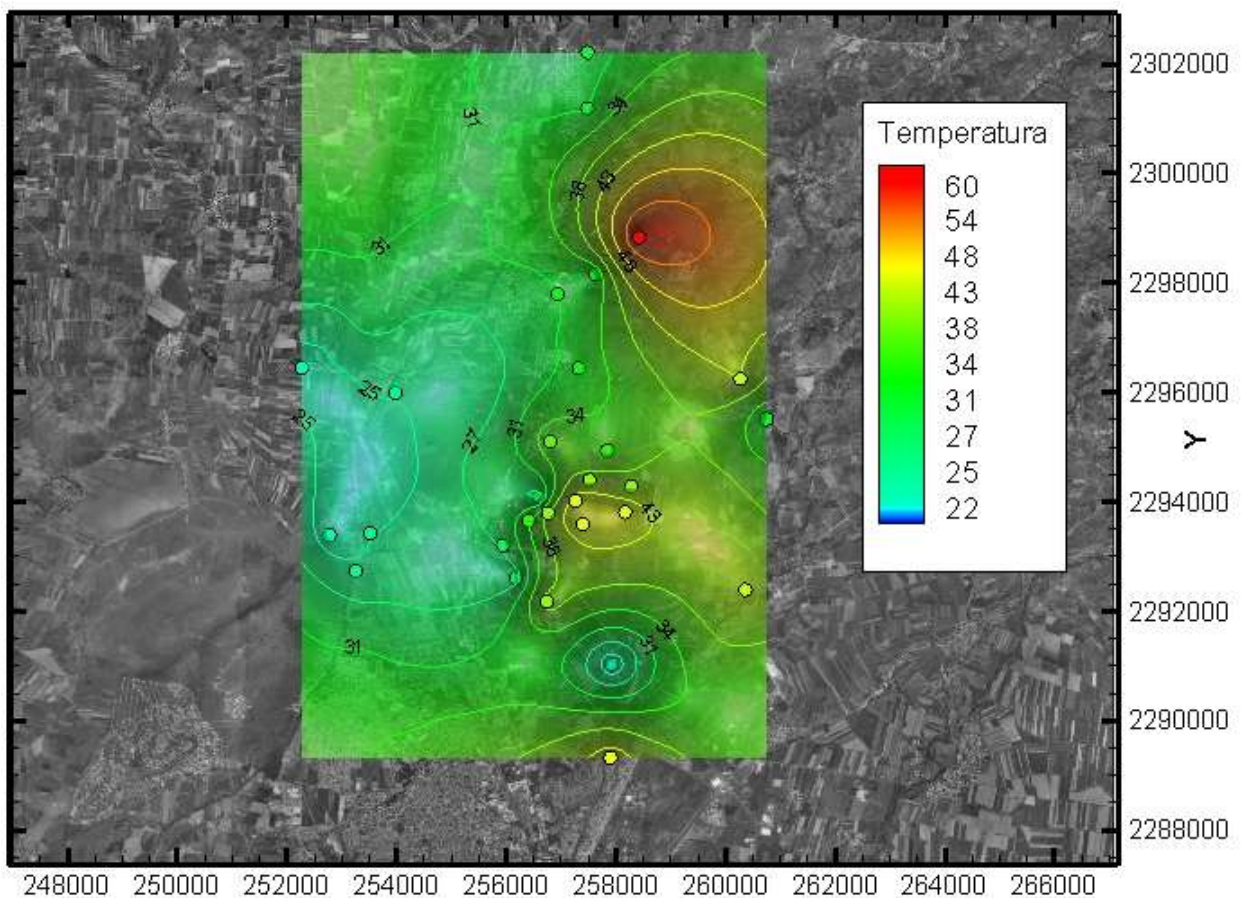


Figura 6.12. Mapa de distribución de temperatura en el agua de pozo en el primer muestreo (Julio 2009).

En el mapa de distribución de temperatura de las muestras de agua en el periodo de Diciembre 2009 que se muestra en la Figura 6.13 se observa que la zona de muestreo presentó una variación de temperaturas en un rango de 17 a 45 °C, 5 de estas muestras de agua presentaron una temperatura que se encontró por debajo de los 20 °C, mientras que todas las demás muestras de agua presentaron un rango de temperaturas de 20 a 45°C.

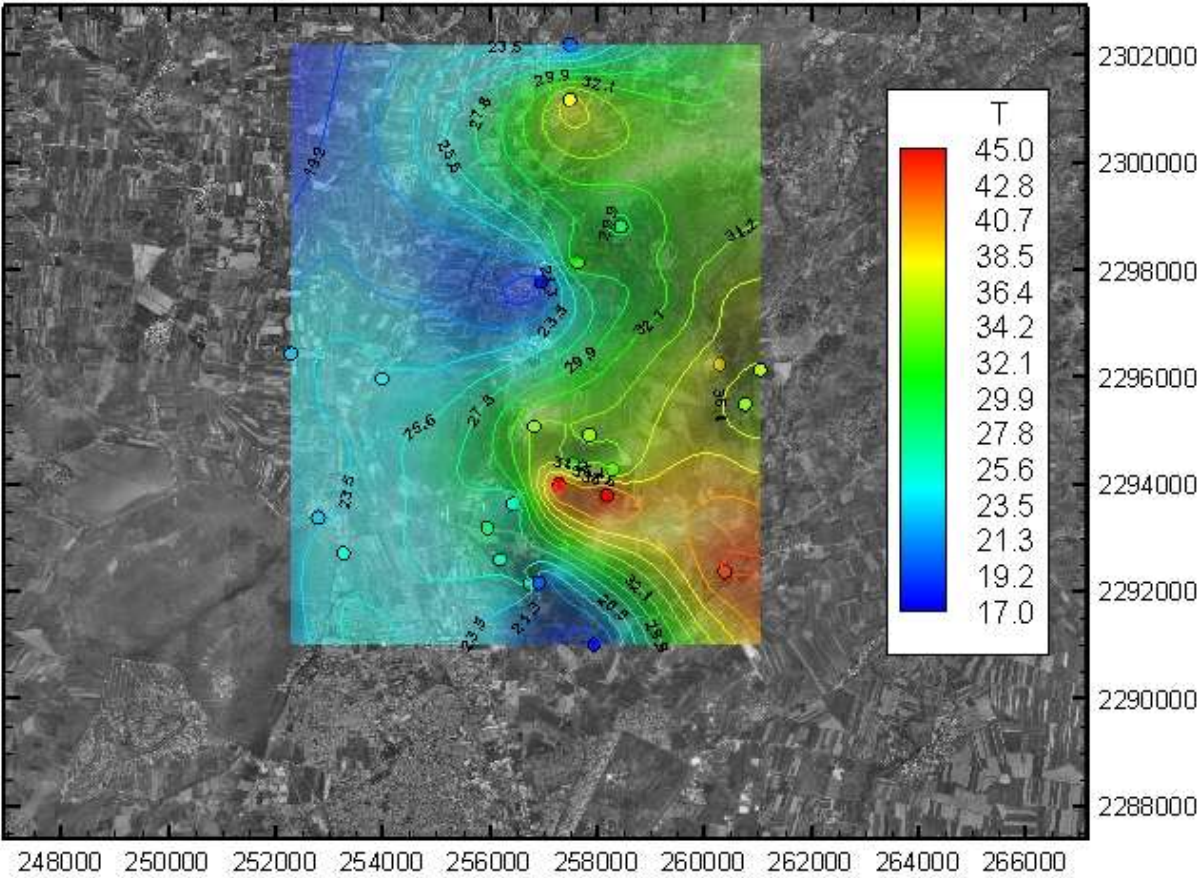


Figura 6.13. Mapa de distribución de temperatura en el agua de pozo en el segundo muestreo (Diciembre 2009).

La Figura 6.14 muestra el mapa de distribución de temperatura determinadas en las muestras de agua en el periodo Mayo 2010, el cual muestra que las temperaturas en el área estudiada varían en un rango de 24 a 44 °C, en 28 de las muestras de agua la temperatura se encontró entre 25 y 44 °C mientras que en 2 muestras de agua se encontró una temperatura por debajo de los 25 °C.

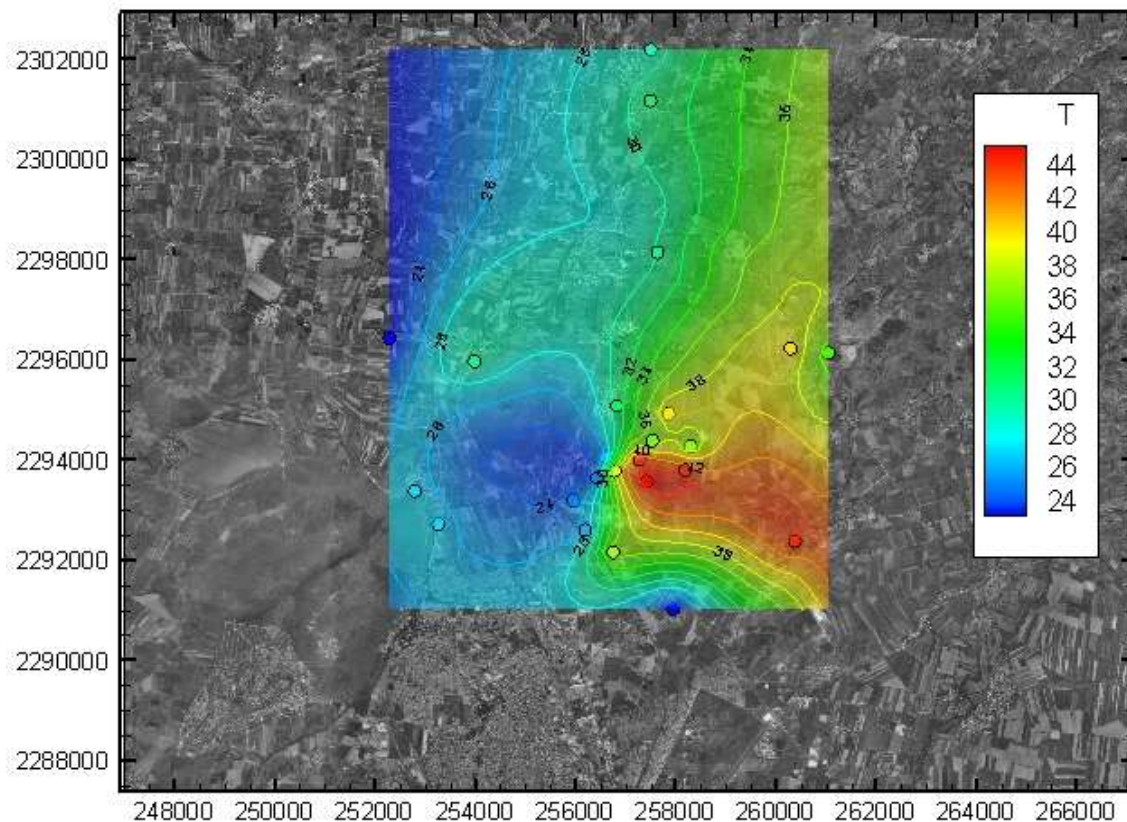


Figura 6.14. Mapa de distribución de temperatura en el agua de pozo en el tercer muestreo (Mayo 2010).

En el caso de la temperatura del primer muestreo con respecto al segundo y tercer muestreo (de la Figura 6.12 a 6.14) se encontró un decremento promedio de 3.5 °C, el cual se considera el resultado de precipitaciones pluviales inusuales en esta época del año para la zona estudiada.



Se encontró que los pozos que presentaron altas concentraciones de As presentaron temperaturas por arriba de los 30°C, la literatura sugiere que las zonas geotermales bajas, es decir que el agua presenta temperaturas entre 20 y 50 °C, tienden a tener mayores concentraciones de metales y metaloides. Los pH's encontrados en el área de estudio en todos los casos fueron de neutros a alcalino, lo cual sugiere que la forma predominante será As+5.

### 6.1.2. Resultados de la Distribución de As en Suelo

Las concentraciones de As en suelo de las parcelas sugieren que a mayor concentración de As en el agua de riego, una mayor concentración de As es acumulado en el suelo.

El suelo de la Parcela 1 tiene una concentración total de As de  $195 \mu g kg^{-1}$ , esta parcela fue regada con una concentración promedio de As en agua de  $20 \mu g L^{-1}$ . El suelo de la Parcela 2 tiene una concentración total de As de  $3\ 597.5 \mu g kg^{-1}$ , en esta parcela se utiliza un agua para riego con una concentración promedio de As de  $210 \mu g L^{-1}$ .

Para obtener un valor de referencia de la concentración de As en el suelo de la zona estudiada se realizó un muestreo de suelo en un área sin influencia agrícola cercana al sitio estudiado, en donde se encontró una concentración de As de  $0.11 \mu g L^{-1}$ .

### 6.1.3. Resultados de la Distribución de As en Planta

Los resultados obtenidos de la concentración de As en Tallo-Hoja y en las Espigas de la Cebada en las diferentes parcelas y en las diferentes épocas de muestreo se presentan a continuación en la Figura 6.15.

El muestreo uno se realizó un mes después de haber sido sembrada la cebada, el segundo muestreo se realizó a los 2.5 meses de haber sido plantada la cebada y el tercer muestreo se realiza a los 4.5 meses de haber sido sembrada la cebada, justo antes del corte.

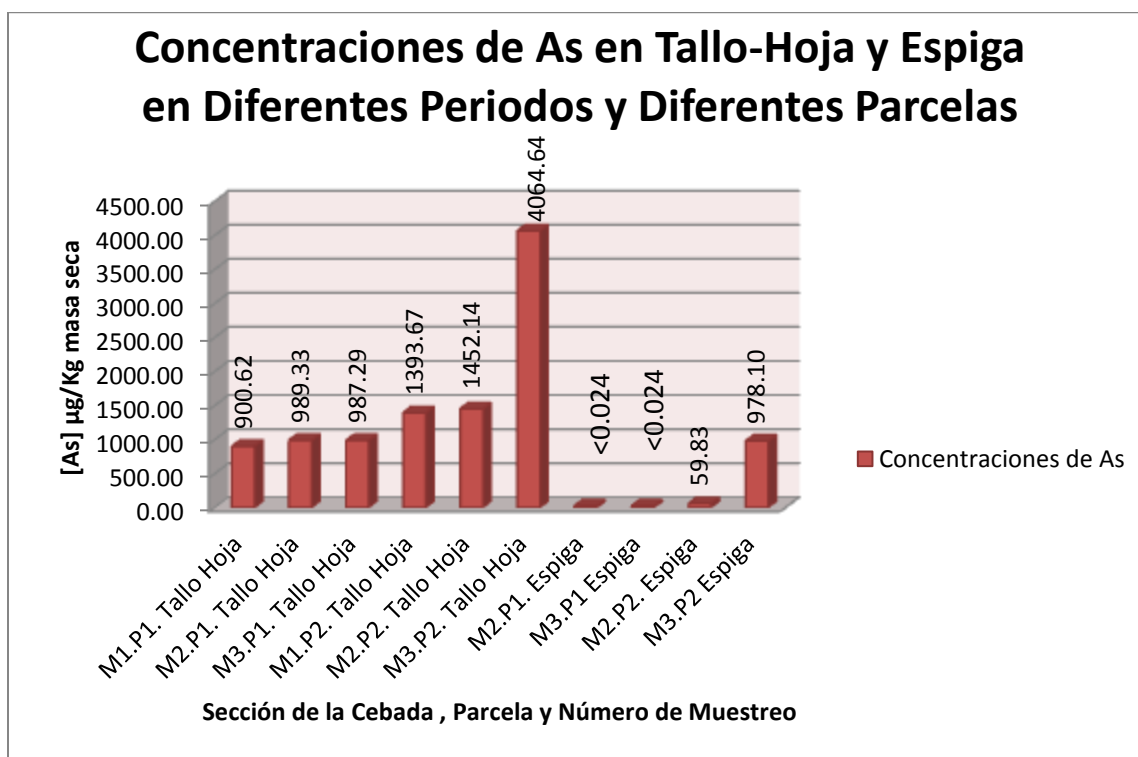


Figura 6.15. Concentración de As en tallo-hoja y espiga en la Parcela 1 y 2, en los diferentes muestreos.

Donde;

M1.P1 es muestreo uno en parcela uno,

M2P1 es muestreo dos en parcela uno,

M3P1 es muestreo tres en parcela uno,

M1P2 es muestreo uno en parcela dos,

M2P2 es muestreo dos en parcela dos,

M3P2 es muestreo tres en parcela dos.

En la Figura 6.15 se observa que para la parcela 1 en Tallo-Hoja del muestreo uno al muestreo dos existe un incremento del 8.9% en la concentración de As y del muestreo dos al muestreo tres la concentración de As se mantuvo similar, y en Espiga no hay incremento en la concentración de As del muestreo dos al muestreo tres. En la parcela 2 se observa un incremento mayor en la concentración de As, ya que del muestreo uno al muestreo dos se presenta un incremento del 28.63 % y del muestreo dos al muestreo tres hay un incremento del 51.9%. Por otro lado para espiga, el incremento de la concentración de As del muestreo dos al muestreo tres es de 93.88%, esto es debido al llenado del grano, ya que en el segundo muestreo el grado de la espiga no estaba lleno dado la época en que se muestreo (3 meses) y para el tercer muestreo el grano estaba lleno dado que el cultivo estaba a punto de ser cosechado. De manera general en la parcela 1 la planta absorbió menos As que en la Parcela 2, esto es debido a las diferentes concentraciones de As del Agua de riego que se utilizo en las parcelas.

Los resultados obtenidos de la concentración de As en raíz de la Cebada en las diferentes parcelas y en las diferentes épocas de muestreo se presentan a continuación en la Figura 6.16.

La Figura 6.16 muestra que el incremento en la concentración de As en la raíz para la parcela uno es bajo, dado que la concentración de As del muestreo uno al muestreo dos se mantiene. La concentración de As del muestreo dos al muestreo tres es del 15.38%.

El incremento en la concentración de As en la raíz para la parcela 2, del muestreo uno al muestreo dos fue de 65.86%, mientras que del muestreo dos al muestreo tres fue del 17%.

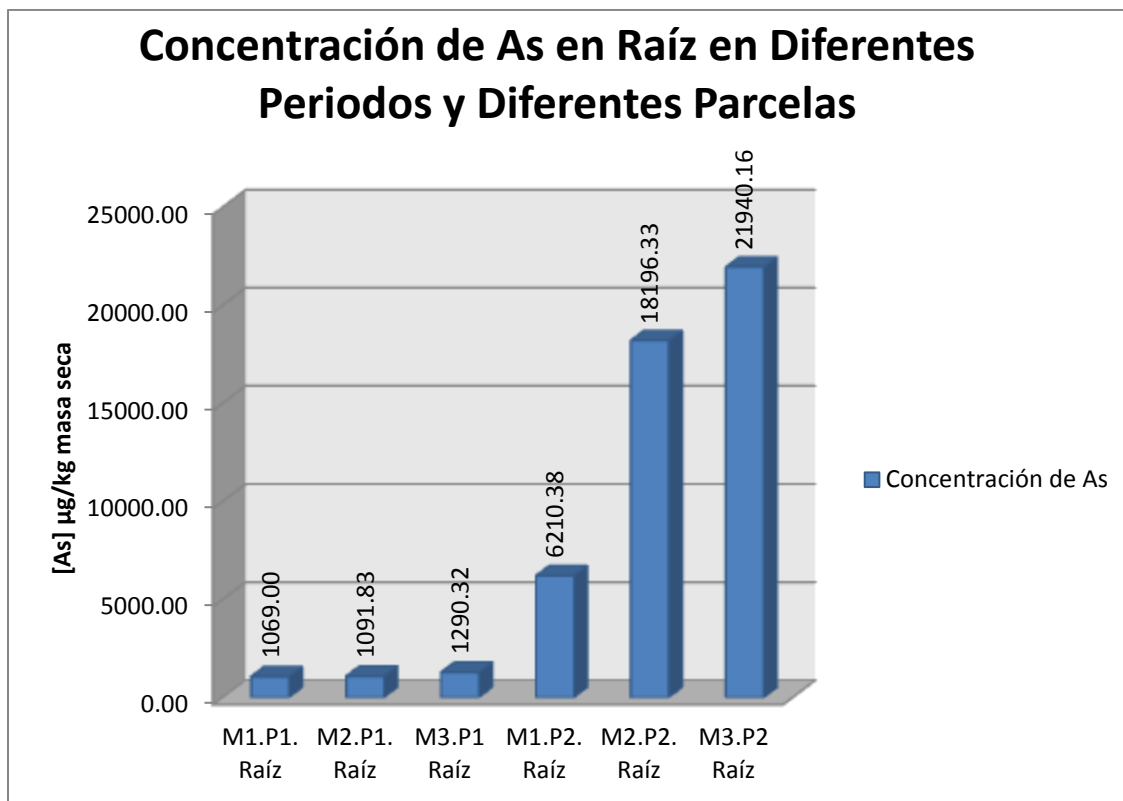


Figura 6.16. Concentración de As en raíz de la cebada en la Parcela 1 y 2, en los diferentes muestreos.

La parcela 2 tuvo una mayor absorción del As en todas sus estructuras con respecto al tiempo debido a la mayor concentración de As en agua de riego ( $170 - 210 \mu g L^{-1}$ ) y en el suelo ( $3 597.5 \mu g kg^{-1}$ ), mientras que la parcela 1 presenta una menor absorción con respecto al tiempo, puesto que el agua de riego tiene una menor concentración de As ( $20 \mu g L^{-1}$ ) así como el suelo ( $195 \mu g kg^{-1}$ ). Estos resultados indican que la concentración de As del agua de riego afecta directamente tanto la concentración de As en como la concentración de As en Planta.

## VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una investigación de la absorción del As en cebada bajo condiciones de campo, como bajo condiciones controladas. De forma adicional se analizó las concentraciones de As en el agua usada para riego agrícola en la zona, así como las concentraciones de As en el suelo.

Una característica de este trabajo es que en la irrigación se presenta la adición de As gradual y continua, y el efecto acumulativo amenaza la sustentabilidad de la agricultura en las áreas afectadas, ya que los alimentos producidos pueden contener niveles de As peligrosos para los seres vivos así como en el rendimiento de la producción de la cosecha.

De los resultados obtenidos en los muestreos de agua se concluye que la distribución espacial de la concentración de As, el pH y la temperatura se mantuvieron con poca variabilidad en los diferentes muestreos. Sin embargo, las concentraciones de As, así como el pH y la temperatura variaron con respecto a la época de muestreo, mostrando un incremento en la concentración de As de aproximadamente el 16%.

En cuanto a pH, se concluye que los valores de este parámetro tendieron hacia la alcalinidad en la zona de estudio en los periodos muestreados. La zona de muestreo es una zona de suelo calizo y se considera que el aumento de pH para el segundo muestreo se debe a un periodo inusual de precipitaciones pluviales, las cuales por arrastre de caliza tienden a aumentar el pH del agua en el área de estudio. Cabe mencionar que el pH en esta zona es alcalino lo que de forma general sugiere que la forma predominante de As será As<sup>+5</sup>.

Respecto a la temperatura se concluye que existe una disminución de 3.5°C durante los muestreos realizados, lo que se considera el resultado de las precipitaciones pluviales inusuales en esta época del año para la zona estudiada.

De los resultados encontrados para la concentración de As y la temperatura durante estos muestreos se observó una relación directa entre los mayores valores de temperatura encontrados y los mayores valores de concentración de As encontrados en el área de estudio. Lo que podría significar el área de estudio se encuentra en una zona geotérmica.

Se encontró que el suelo de la parcela que fue irrigada con agua que contenía una concentración de As alta (entre 170 y 210  $\mu g L^{-1}$ ) presentó una acumulación mayor de As que la parcela que fue regada con Agua con una concentración de As  $< 24 \mu g L^{-1}$ .

Las concentraciones de As encontradas en raíz fueron superiores a las concentraciones de As encontradas en tallo-hoja y espiga. La concentración de As en raíz  $>$  tallo-hoja  $>$  espiga en la parcela regada con altas concentraciones de As. Para la parcela regada con bajas concentraciones de As la diferencia entre la concentración encontrada en raíz fue similar a la concentración encontrada en tallo-hoja, pero a su vez las dos concentraciones de As mencionadas anteriormente fueron mayores a la concentración de As encontrada en espiga. Lo que muestra que a mayores concentraciones de As en agua de riego y en el suelo de la parcela mayor será la concentración de As la planta.

Los resultados encontrados para espiga presentaron una concentración de As menores a 24  $\mu g kg^{-1}$  para el caso de irrigación con agua con una concentración de As  $< 24 \mu g L^{-1}$ . Para el caso de irrigación con agua a una concentración de 170 a 210  $\mu g L^{-1}$  la espiga presentó una concentración de 987.10  $\mu g kg^{-1}$ , encontrándose que para ninguno de los dos casos se sobrepaso el límite para el contenido de arsénico en frutos, cultivos y vegetales que es de 2600  $\mu g As kg^{-1}$  en peso seco según la US Public Health Service (2005). Sin embargo, a pesar de que nos se sobrepasa la norma se observa una tendencia a la acumulación de As al transcurrir el tiempo y sugiere un problema a futuro con las parcelas que son irrigadas con concentraciones de As mayores a los 200  $\mu g L^{-1}$ .

Por otro lado, el tallo y hoja de la cebada son destinados para alimento ganadero, estas estructura de la cebada presentaron una concentración de  $978.29 \mu g kg^{-1}$  para el caso de irrigación de agua con una concentración de As menor a  $24 \mu g L^{-1}$ . Para el caso de irrigación con agua a una concentración de 170 a  $210 \mu g L^{-1}$  se presentó una concentración de  $4064.64 \mu g kg^{-1}$  para estas estructuras. Encontrándose que para el primer caso no se sobrepasa el límite de concentración de As en alimentos para animales es de  $2000 \mu g kg^{-1}$ , marcado por la Comunidad Europea (Blanes P. and M. 2005). Mientras que el segundo caso sobrepasa esta norma, lo que sugiere que este problema esta impactando la cadena alimenticia.

Es relevante mencionar que la parcela irrigada con agua con concentración de As alta ( $170-210 \mu g L^{-1}$ ) donde la planta de cebada presentó las mayores concentraciones de As acumuladas en todas sus estructuras tuvo un rendimiento de 55 toneladas por hectárea, mientras que la parcela regada con agua con concentración de As baja ( $<24 \mu g L^{-1}$ ) donde la planta de cebada presentó menores concentraciones de As acumuladas en todas sus estructuras que las anteriormente mencionadas tuvo un rendimiento de 70 toneladas por hectárea. Estos datos fueron obtenidos en básculas cuando el producto llego al consumidor. Lo que sugiere que el contenido de altas concentraciones de As afecta el rendimiento de la cebada disminuyendo la producción en un 21.43%.

De los resultados obtenidos en el balance de materia de As se concluye que para los tratamientos 2, 5 y 8, la cantidad de As absorbido por planta y suelo fue mayor que para los tratamientos 1, 4 y 7, mientras que los tratamientos 3, 6 y 9 presentaron mayor absorción de As que los tratamientos antes mencionados. De lo que se concluye que entre menor sea la cantidad de As agregado, menor será la concentración de As absorbido en planta y suelo, así como, que la concentración de P juega un papel importante en la reducción de absorción de As en planta y suelo.

Cabe mencionar que el tiempo, es un factor que tiende a acrecentar las concentraciones de As, ya que para la planta de cebada se encontró que entre

mayor tiempo de exposición al As, mayor será la concentración de As absorbida por la planta de cebada.

Los resultados obtenidos mostraron que para el primer muestreo la concentraciones de As en planta fueron de alrededor de los  $2000 \mu g kg^{-1}$  no excediendo el límite de concentración de As en alimentos para animales que es de  $2000 \mu g kg^{-1}$ , marcado por la Comunidad Europea (Blanes P. and M. 2005). En el segundo muestreo la concentración de As en planta sobrepaso este límite con concentraciones de As que van desde 4000 hasta  $12\ 000 \mu g kg^{-1}$ . Por lo que se sugiere, que el tipo de cultivo que se siembre en estas zonas deberá ser de periodo corto de crecimiento para disminuir su exposición al As y por ende la absorción de As.

De los resultados obtenidos en la cebada en invernadero, se concluye que existe una relación entre la concentración de As absorbida por la planta y las concentraciones de P y As en el agua de riego que fueron empleados. Estos resultados muestran que a mayores concentraciones de As mayor será la absorción de la planta, sin embargo, el P resulta ser benéfico en algunas concentraciones, ya que inhibió la absorción de arsénico bajo concentraciones de  $200 \mu g L^{-1}$ . Por lo que se concluye que el uso de P durante el riego en la concentración indicada probablemente disminuirá el As absorbido por la cebada.

Del análisis de varianza realizado al estudio de cebada en campo se concluye que el tiempo, la concentración de As y la concentración de P aplicadas en los diferentes tratamientos tienen un efecto estadísticamente significativo, con un nivel de confianza del 95%, sobre la absorción de As en planta de cebada para las condiciones antes mencionadas.

Debido a los resultados presentados en este estudio, se recomienda seguir sembrando este tipo de cultivos, ya que el que el grano no presente concentraciones de As fuera de la norma.



No se recomienda sembrar ningún tipo de cultivo con estructura subterránea comestible, debido a que los resultados presentes en este estudio muestran que la estructura subterránea sorbe mayores concentraciones de As.

Por otro lado se recomienda no utilizar el tallo y la hoja como alimento para gado y darles un manejo especial tanto a tallo, hoja y raíz, debido a las altas concentraciones de As presentes en estas estructuras.

Se sugiere realizar estudios de bajo costo y efectivos para el tratamiento de suelo y agua para uso agrícola.

## VIII. REFERENCIAS

- Akter, K., and R. Naidu. 2006. "Arsenic speciation in the environment " In *Managing Arsenic in the Environment: From Soil to Human Health*, ed. E. S. R. Naidu, G. Owens *et al*: Collingwood.
- Albert, A.L. 2004. *Toxicología Ambiental*. Edited by U. A. d. C. Juárez. Chihuahua, México.
- Ashraf Ali M., Badruzzaman A. B. M., Jalil M. A., Delwar Hossain M., Feroze Ahmed M., Al Masud A., Kamruzzaman Md., and Azizur Rahman M. 2003. "Arsenic in Plant-Soil Environment in Bangladesh." In *Fate of Arsenic in the Environment*. Organización Panamericana de la Salud.
- Ayotte J.D., M.G. Nielsen, and G. R. Robinson Jr. 1998. "Relation of arsenic concentrations in ground water to bedrock lithology in eastern New England." ed. G. S. o. A. A. Meeting. Toronto, Ontario.
- Azcue J.M., and J. O. Nriagu. 1994. "Arsenic: Historical perspectives." *Advances in Environmental Science and Technology*:430.
- Backer D.E., and L. Chesnin. 1975. "Chemical monitoring of soils for environment quality and animal and human health." *Adv. Agron* 27:305-74.
- Bauer M., and Blodau C. 2006. "Mobilisation of arsenic by dissolved organic matter from iron oxides, soils and sediments." *Science Total Environment* 354:179-90.
- Blanes P., and Giménez M. 2005. "Cuantificación y Correlación de Arsénico y Metales Pesados en Aguas Naturales de la Región Centro-Oeste de la Provincia de Chaco - Argentina." In *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*, ed. E-047.
- Bowen, H. J. M. 1979. *Elemental Chemistry of the Elements* Edited by A. Press. London and New York
- Boyle D.R., R. J. Turner, and G. E.M. Hall. 1998. "Anomalous arsenic concentrations in groundwaters of an island community, Bowen Island, British Columbia." *Environmental Geochemistry and Health* 20 (4):199-212.
- Bronstein A.C., D. A. Spyker, and L. R. Cantilena Jr. 2006. "Annual Report of the American Association of Poison Control Centers' National Poison Data System (NPDS)." *Clinical Toxicology* 45 (8):815-917.
- Buschmann J., Kappeler A., Lindauer U., Kistler D., Berg M., and Sigg L. 2006. "Arsenite and arsenate binding to dissolved humic acids: influence of pH, type of humic acid and aluminium." *Environ Sci Technol* 40 (19):6015-20.
- Cano A. I., A. A. F. Aguilera, and M. Gutiérrez. 2004. Arsenic in Groundwater: natural occurrence Guanajuato, Mexico: its impacts and low cost remediation Paper read at Natural Arsenic in Groundwater, at Florence.
- Cardwell A. J., D. W. Hawkerd, and M. Greenway. 2002. "Metal Accumulation in Aquatic Macrophytes from Southeast Queensland." *Chemosphere* 48:653-63.

- Chaney R. L., J. S. Angle, C. L. Broadhurst, C. A. Peters, R. V. Tappero, and D. L. Sparks. 2007. "Improved Understanding of Hyperaccumulation Yields Commercial Phytoextraction and Phytomining Technologies." *J. of Environmental Quality* 36:1429-43.
- Chaturverdi I. 2006. "Effects of Arsenic concentrations and forms on growth and Arsenic Uptake and Accumulation by Indian Mustard (*Brassica juncea* L.) Genotypes." *Journal of Central European Agriculture* 7:31-40.
- Chen S. L., S. R. Dzung, M. H. Yang, K. H. Chlu, G. M. Shieh, and C. M. Wai. 1994. "Arsenic species in groundwaters of the Blackfoot Disease Area, Taiwan." *Environmental Science and Technology* 28:877-81.
- Dahal B.M., M. Fuerhacker, A. Mentler, K.B. Karki, R.R. Shrestha, and W.E.H. Blum. 2008. "Arsenic contamination of soils and agricultural plants through irrigation water in Nepal " *Environmental Pollution* 155 (1):157-63.
- Das D., A. Chatterjee, B. K. Mandal, G. Samanta, D. Chakraborti, and B. Chanda. 1995. "Arsenic in ground-water in 6 districts of West Bengal, India - the biggest arsenic calamity in the world." *Analyst* 120 (3):917-24.
- Del Río Celestino M., R. Front, R. Moreno-Rojas, and A. De Haro Bailon. 2006. "Uptake of Lead and Zinc by Wild Plants Growing on Contaminated Soils." *Industrial Crops and Products* 24:230-7.
- Drever J.I. 1997. *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments*. Saddle River, New York: Prentice Hall.
- Fabiola, Elias-Cabrera. 2007. Escenarios de Riesgos por Contaminación debida a la Presencia de Arsénico en Aguas Subterráneas de Irapuato, Gto., Ingeniería Ambiental, Universidad de Guanajuato, Irapuato.
- Focazio, M. J., Welch, A. H., Watkins, S.A., Helsel, D. R., and Horn, M. A. 2000. "Retrospective analysis on the occurrence of arsenic in public ground - water resources of the United States and limitations in drinking - water - supply characterizations." ed. G. S. W.-r. Investigations. United States: Geological Survey Water - resources Investigations
- Francesconi K., Visoottiviseth P., Sridockhan W., Goessler W. 2002. "Arsenic Species in an Hyperaccumulating Fern, *Pityrogramma calomelanos*: A potential phytoremediator." *Sci. Total Environ.* 284:27-35.
- Henke, Kevin. 2009. *ARSENIC, Environmental Chemistry, Health Threats and Wastw Treatment*. Edited by WILEY.
- Huang, R. Q., S. F. Gao, W. L. Wang, S. Stuanton, and G. Wang. 2006. "Soil Arsenic Availability and the Transfer of Soil Arsenic to Crops in Suburban Areas in Fujian Province, Southeast China." *Science of the Total Environment* 368 (2-3):531-41.
- Hughes, M. F. 2002. "Arsenic toxicity and potential mechanisms of action." *Toxicology Letters* 133 (1):1-16.
- Inskeep, W.P., McDermott, T.R. and Fendorf, S. 2002. "Arsenic (V)/(III) cycling in soil and natural waters: chemical and microbiological processes." In *Environmental Chemistry of Arsenic*, ed. J. W.T. Frankenberger. New York: Marcel Dekker.
- Kenyon E.M., L. M. Del Razo, and M. F. Hughes. 2005b. "An integrated pharmacokinetic and pharmacodynamic study of arsenite action: 2. Heme oxygenase induction in mice." *Toxicology* 206 (3):389-401.

- Kenyon, E.M., Del Razo, L. M. and Hughes, M. F. 2005a. "Tissue distribution and urinary excretion of inorganic arsenic and its methylated metabolites in mice following acute oral administration of arsenate." *Toxicological Sciences* 85 (1):468-75.
- Litte M. I., M. E. Morgada, and J. Bundschuh. 2010. "Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption." *Environmental Pollution* 158 (5):1105-18.
- Lu Y., F. Dong, C. Deacon, H. Chen, A. Raab, and A. A. Meharg. 2010. "Arsenic accumulation and phosphorus status in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars surveyed from fields in South China " *Environmental Pollution* 158 (5):1536-41.
- Lukasz J., J. Kowalska, M. Kossykowska, and J. Golimowski. 2010. "Studies on the uptake of different arsenic forms and the influence of sample pretreatment on arsenic speciation in White mustard (*Sinapis alba*) " *Environmental Pollution* 94 (2):125-9.
- M.J. Ellenhorn. 1997. *Diagnosis and Treatment of Human Poisoning*,. Edited by 2: Williams and Wilkins, Baltimore,.
- Magalhães M., and F. Clara. 2002. "An Environmental Problem Limited by Solubility." *Pure appl. Chem* 74:1843-50.
- Manna A. K., M. Sen, A. R. Martin, and P. Pal. 2010. "Removal of arsenic from contaminated groundwater by solar-driven membrane distillation " *Environmental Pollution* 158 (5):1536-41.
- Marmioli M., G. Antonioli, E. Maestri, and N. Marmioli. 2005. "Evidence of the Involvement of Plant ligno-cellulosic Structure in the Sequestration of Pb, an X-Ray an X-ray spectroscopy- based Analysis." *J. Environmental Pollution* 134:217-27.
- Marques A. P. G. C., A. O. S. S. Rangel, and P. M. L. Castro. 2007. "Zn Accumulation in Plant Species indigenous to a Portuguese Polluted cite: relation with Soil Contamination." *J. Environ. Qual.* 36:646-53.
- Marques, Ana P.G.C., Helena Moreira, Antonio O.S.S. Rangle, and Paula M. L. Castro. 2009. "Arsenic, Lead and Nickel Accumulation in *Rubus ulmifolius* growing in Contaminated Soil in Portugal." *J. of Hazardous Material* (165):174-0.
- Mason B., and L. G. Berry. 1978. "Elements of Mineralogy." In *Freeman*. New York.
- Meltem B. B., and A. Pala. 2010. "A statistical experiment design approach for arsenic removal by coagulation process using aluminum sulfates " *Desalination* 254 (1-3):42-8.
- Mihaljević M., L. Sisir, and V. Ettler. 2004. "oxidation of As-bearing gold ore- a comparison of batch and column experiments." *Journal of Geochemical Exploration* 81:59-70.
- Municipal, Presidencia. *Irapuato Gto.* 2010 [cited. Available from <http://www.irapuato.gob.mx/pageIn01.php?mnu=47>].
- Nasier E.B, K. Hansi, and T. Cord. 1977. "Effect of waste water, sewage sludge and refuse compost on accumulation and movement of arsenic and selenium in cultivated soil " *Landbauforsch Voelkenrode* 27 (2):105-10.

- National-Research-Council. 1999. "Arsenic in Drinking Water." ed. N. Academy. Washinton D.C.
- Nickson R. T., J. McArthur, P. Ravenscroft, W. G. Burgess, and K. M. Ahmed. 2000. "Mechanism of arsenic release to groundwater, Bangladesh and West Bengal." *Applied Geochemistry* 15 (4):403-13.
- Picado, Freddy. *El Niño 2009 - 2010: Impactos y Consecuencias para Latinoamérica* 2009 [cited. Available from <http://www.cathalac.org/EI-Ni%C3%B1o/>].
- Price R.E., and T. Pichler. 2005. "Distribution, speciation and bioavailability of arsenic in a shallow-water submarine hydrothermal system, Tutum Bay, Ambitle Island, PNG." *Chemical Geology* 224 (1-3):122-35.
- Prieto F., J. Callejas, M. Lechuga, J. Gaytan, and E. Barrado. 2005. "Acumulación en Tejidos Vegetales de Arsénico Provenientes de Aguas y suelos de Zimapán, Estado de Hidalgo, México." *Bioagro* 17 (3).
- Redman, A.D., Macalady, D.L. and Ahmann, D. 2002. "Natural organic matter affects arsenic speciation and sorption onto hematite." *Environmental Science and Technology* 36 (13):2889-1896.
- Rodríguez-Castillo R. 2005. Contaminación de Acuíferos. Paper read at Seminario de Contaminación de Acuíferos, at Instituto de Geofísica UNAM, México.
- Rothwell J. J., K. G. Taylor, E. L. Ander, M. G. Evans, S. M. Daniels, and T. E. H. Allott. 2009. "Arsenic retention and release in ombrotrophic peatlands." *Science of the Total Environment* 407:1405-17.
- Roulier S., B. Robinson, E. Kuster, and R. Schulin. 2008. "Analysing the Preferential Transport of Lead in a Vegetated Roadside Soil Using Lysimeter experiments and dual-porosity model." *European Journal of Soil Science* 59:61-70.
- Ruiz-Chancho M. J., J. F. López-Sánchez, E. Schmeisser, W. Goessler, K. A. Francesconi, and R. Rubio. 2008. "Arsenic speciation in plants growing in arsenic-contaminated sites " *Chemosphere* 71 (8):1522-30.
- Saldaña-Robles A. 2008. Cuantificación de Arsénico Absorbido por Plantas de Jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) desarrolladas en Sustrato e Invernadero, y en Alfalfa (*Mendicago Sativa*) en condiciones de Campo, Ingeniería Ambiental, Universidad de Guanajuato, Irapuato.
- Saldaña-Robles A., R. Alcacio-Juarez, F. Diaz-Serrano, M. Romero-Valdez, J. Berlín-Izaguirre, D. Francia-Perez, and R. Salcedo-Hernández. 2007. Cuantificación de Arsénico Absorbido por *Solanum lycopersicum* L. (Jitomate) y *Mendicago sativa* (Alfafa). Paper read at XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, at Mexico, D. F.
- Sarkar B. 2002. *Heavy Metals in the Environment*. Edited by M. Dekker. USA.
- Scazzola R., G. Mattducci, and S. Guerzoni. 2004. "Evaluation of trace metal fluxes to soils in hinterland of Porto." *Pollution* 153 (1-4):195-203.
- Schreiber M. E., J. A. Simo, and P. G. Freiberg. 2000. "stratigraphic and geochemical controls on naturally occurring in groundwater, eastern Wisconsin, USA." *Hydrology J.* 8:161-76.
- Seal R.R. II, J. M. Hammatstsom, N. K. Foley, and C. N. Alpers. 2002. "Geoenvironmental models for seafloor massive sulfide deposits." In *Progress on Geoenvironmental Models for Selected Mineral Deposits Types*, ed. R. R. S. I. a. N. K. Foley. USA.

- Sjöblom A., K. Håkansson, and B. Allard. 2004. "River water metal speciation in a mining region - the influence of wetlands, liming, tributaries and groundwater." *Water Air and Soil Pollution* 152 (1-4):173-94.
- Smedley P. L., H.B. Nicolli, D. M. J. Macdonald, A. J. Barros, and J. O. Tullio. 2002. "Hydrogeochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwater from La Pampa, Argentina " *Applied Geochemistry* 17 (3):259-84.
- Smedley P. L., and Kinniburgh D. G. 2002. "A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters." *Appl Geochem* 17:517-68.
- Smedley P.L., D. G. Kinniburgh, and D. M. J. Macdonald. 2005. "Arsenic associations in sediments from the loess aquifer of La Pampa, Argentina." *Applied Geochemistry* 20 (5):989-1016.
- Smith E., R. Naidu, and A. M. Alston. 2002. "Chemistry of Inorganic Arsenic in Soils: II. Effect of Phosphorus, Sodium, and Calcium on Arsenic Sorption." *Journal of Environmental Quality* 31:557-63.
- Srivastava M., Mrittunjai, L. Q. Ma., and J. A. G. Santos. 2006. "Three new Arsenic Hyperaccumulating , Ferns." *Sci. Total Environ.* 364:24-31.
- Stoltz E., and M. Greger. 2002. "Acumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn four Wetland plant Species Grownig on Submerged mine Tallings." *Environ. Exp. Bot.* 47:271-80.
- Stollenwerk K. G. 2003. "Geochemical processes controlling transport of arsenic in groundwater: a review of adsorption, in arsenic in Ground water." ed. K. A. Publishers. Boston.
- Tanaka T. 1988. "Distribution of Arsenic in the natural environment with emphasis on rock and soil." *Appl Organomet Chem* 2 (4):283-95.
- Togashi S., N. Imai, and Y. Okuyama-Kusunose. 2000. "Young upper crustal chemical composition of the orogenic Japan " *Arc. Geochemistry, Geophysics, Geosystems* G3 (1).
- Vamerali T., M. Bandiera, L. Coletto, F. Zanetti, N. M. Dickinson, and G. Mosca. 2009. "Phytoremediation Trials on metal- and arsenic- contaminated Pyrite Wastes (Torviscosa, Italy)." *Environmental Pollution* 157:887-94.
- Vazquez S., R. Agha, A. Granado, M. J. Sarro, E. Esteban, J. M. Penalosa, and R. O. Carena. 2006. "Use of White lupin Plant for Phytostabilization of Cd and As polluted Acid Soil." *Water, Air and Soil Pollution* 177:349-65.
- Vinogradov A.P. 1959. *The Geochemistry of Rare and Dispersed Chemical Elements in Soils*. Edited by 2. New York.
- Wang J., Zhao F., Meharg A., Raab A., Feldmann J., and McGrath S. 2002. "Mechanims of Arsenic Hyperaccumulation in *Pteris vittata*. Uptake kinetics, Interactions with Phosphate, and arsenic Speciation." *Plant Physiology* 130:1552-61.
- Wang S., and C. N. Mulligan. 2006. "Effect of natural organic matter on arsenic release from soils and sediments into groundwater." *Environmental Geochemistry and Health* 28 (3):197-214.
- Warren, G.P., B.J. Alloway, N.W. Lepp, B. Singh, F.J.M. Bochereau, and C. Penny. 2003. "Field Trials to Assess the Uptake of Arsenic by Vegetables from Contaminated Soils and Soil Remediation with Iron Oxides." *Science of the Total Environment* 311 (1-3):19-33.

- Warwick P., E. Inam, and N. Evans. 2005. "Arsenic's interaction with humic acid." *Environmental Chemistry* 2 (2):119-24.
- Wilkin R.T., and R. G. Ford. 2006. "Arsenic solid-phase partitioning in reducing sediments of a contaminated wetland." *Chemical Geology* 228 (1-3):156-74.
- Williams M. 2001. "Arsenic in mine waters: international study." *Environmental Geology* 40 (3):267-78.
- Yoon J. K., X. D. Cao, Q. X. Zhou, and L.Q. Ma. 2006. "Accumulation of Pb, Cu and Zn in Native Plants Grown on a Contaminated Florida Cite." *Science of the Total Environment* 268:456-64.
- Zhao F. J., S. J. Dunham, and S. P. McGrath. 2002. "Arsenic hyperaccumulation by Different Fern species." *New Phytol.* 156:27-31.
- Zou B. J. 1986. "Adsorption and release of arsenic in soil " *Huanjing Huaxue* 14 (2):8-13.



http://www.fertisquisa.com | For Evaluation Use **DAP**  
**18-46-00**

## Ficha Técnica

Fecha de Elaboración: Dic. / 2007  
Registro CICOPAFEST: RSCO-071/IX/06

### Generalidades

El Fosfato Diamónico (DAP) es el fertilizante sólido aplicado directamente al suelo con la más alta concentración de nutrientes primarios 18-46-00, se considera un complejo químico por contar con 2 nutrientes en su formulación. Es una fórmula muy apreciada por los agricultores ya que tiene una relación costo-beneficio muy positiva en cuanto a aporte de nutrientes (64%) y por consiguiente por el costo de la tonelada transportada por concentración de nutrientes.

### Características Físicas y Químicas

**Nombre Químico:** Fosfato de Amonio Dibásico **Fórmula Química:**  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$   
**Otros Nombres:** Fosfato Diamónico, Fosfato Dibásico de Amonio, Fosfato de Amonio Secundario, Fosfato de Amonio Monoácido, Fosfato de Amonio Grado Fertilizante, Ortofosfato de Amonio **Peso Molecular (g/mol):** 132.055

**Contenido de Nitrógeno Total (N):** 18% de Nitrógeno Amoniacal (w/w)  
**Contenido de Fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ):**  
- Fósforo Total 46% de Pentóxido de Fósforo (w/w)  
- Fósforo Disponible 46% de Pentóxido de Fósforo (w/w)  
- Fósforo Soluble en Agua 42% de Pentóxido de Fósforo (w/w)

Presentación Física: Gránulos esféricos de color café oscuro, grisáceo ó negro  
Tamaño de partícula: 1.18 a 4.00 mm  
Solubilidad en agua, a 20° C (100 g/100 ml): 58.0 g/100 ml. de agua  
pH en solución al 10%: 7.4 – 8.0 Unidades  
Densidad Aparente ( $\text{Kg/m}^3$ ): 955 – 1,040  $\text{Kg/m}^3$   
Índice de Salinidad: 29.2  
Humedad Relativa Crítica (a 30° C): 83 %  
Acidez equivalente a Carbonato de Calcio: 69 partes de Carbonato de Calcio por 100 partes de DAP



## Comportamiento en el Suelo

El Fosfato Diamónico (DAP), se clasifica primordialmente como una fuente de Fósforo y como complemento secundario de Nitrógeno, sin embargo, la presencia del 18% de Nitrógeno en esta fórmula, influye favorablemente en la absorción y aprovechamiento del Fósforo, este efecto es debido que el Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) influye significativamente sobre la disponibilidad y absorción del Fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ). El Amonio en altas concentraciones reduce las reacciones de fijación del Fósforo, igualmente, la absorción del Amonio ayuda a mantener condición de acidez en el contorno de la raíz, condición que mejora la absorción del Fósforo, gracias a esta sinergia del N-P, la fórmula del DAP 18-46-00 es de alta eficiencia como fertilizante.

**Fósforo:** El  $\text{P}_2\text{O}_5$  es un elemento que tiene muy poca movilidad en el suelo, y por consecuencia es un producto muy estable, por lo que las pérdidas por lixiviación son mínimas. Debido a esta característica del Fósforo, es determinante para su máximo aprovechamiento el método y la profundidad de aplicación dependiendo del cultivo, esto es colocarlo dentro del área de desarrollo radical y asegurar con ello la cercanía con el área de absorción de las raíces. El pH es un factor que influye enormemente sobre la solubilidad y disponibilidad del Fósforo, éste es más disponible en pH de 6 a 7.

**Nitrógeno:** Las plantas absorben la mayoría del Nitrógeno en forma de iones Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y en muy pequeña proporción lo obtienen de aminoácidos solubles en agua. Los cultivos absorben la mayor parte del Nitrógeno como nitratos, sin embargo estudios recientes demuestran que los cultivos usan cantidades importantes de Amonio estando este presente en el suelo. En el proceso de Nitrificación al convertir ( $\text{NH}_4^+$ ) en ( $\text{NO}_3^-$ ), se liberan iones  $\text{H}^+$ , este proceso produce acidez en el suelo.

## Papel Nutricional

**Fósforo:** El ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) esencial para el crecimiento de las plantas, desempeña un papel importante en la fotosíntesis, la respiración, el almacenamiento y transferencia de energía, y en la división y el crecimiento celular. Promueve la rápida formación y crecimiento de las raíces, mejora la calidad de la fruta, del follaje de las hortalizas, de los granos y es vital para la formación de las semillas ya que esta involucrado en la transferencia de las características genéticas de una generación a otra.

**Nitrógeno:** El N en las plantas, es necesario para la síntesis de la clorofila y como parte de la molécula de clorofila está involucrado en el proceso de la fotosíntesis. Cantidades adecuadas de Nitrógeno producen hojas de color verde oscuro por su alta concentración de clorofila y esta participa en el proceso de conversión del Carbono, Hidrógeno y Oxígeno en azúcares simples que serán utilizados en el crecimiento y desarrollo de la planta.

## Usos y Recomendaciones

Por su alto aporte de nutrientes primarios, el Fosfato Diamónico (DAP) es un fertilizante complejo ideal para ser aplicado como monoproducto en presiembra o al momento de la siembra. Dado su alto aporte de Fósforo (46%), es un componente imprescindible para la elaboración de fórmulas balanceadas de fertilización (mezclas físicas).

## Compatibilidad y Estabilidad en Almacenamiento

El Fosfato Diamónico (DAP) es compatible con la mayoría de los fertilizantes, pero existe incompatibilidad con Superfosfato Triple (SPT) y Superfosfato Simple (SPS) ya que genera reacción húmeda y se apelmaza, en el caso de mezclas de aplicación inmediata es posible combinarlos siempre y cuando la mezcla no se destine a almacenamiento.

El DAP es un producto muy estable en almacenamientos prolongados, pero es muy importante observar un buen manejo del producto en almacén, preferentemente bajo condiciones adecuadas, es decir en lugares secos, frescos, ventilados y libres de cualquier agente contaminante.

---

---

**ISQUISA S.A. DE C.V.**  
**CALLE 10 NO. 917 PRIMER PISO ESQUINA AVENIDA 9 BIS**  
**COLONIA SAN JOSE C.P. 94560**  
**CORDOBA, VERACRUZ, MEXICO**  
**TEL. 01 (271) 71 71 800      VENTAS 01 (800) 822 40 92**

---

---

## Ficha Técnica

Fecha de Elaboración: Dic. / 2007  
Registro CICOPLAFEST: RSCO-070/IX/06

### Generalidades

La Urea es un fertilizante químico de origen orgánico. Entre los fertilizantes sólidos, es la fuente Nitrogenada de mayor concentración (46%), siendo por ello de gran utilidad en la integración de fórmulas de mezclas físicas de fertilizantes, dando grandes ventajas en términos económicos y de manejo de cultivos altamente demandantes de Nitrógeno (N).

### Características Físicas y Químicas

**Nombre Químico:** Carbamida

**Fórmula Química:**  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$

**Otros Nombres:** Urea, Carbonildiamida, Ácido Carbomídico ó Amida Alifática

**Peso Molecular (g/mol):** 60.06

#### **Contenido de Nitrógeno Total (N):**

**46 % de Nitrógeno Uréico (w/w)**

Presentación Física:	Perlas o Perdijones Esféricos, color blanco.
Tamaño de partícula:	0.85 a 3.35 mm
Solubilidad en agua, a 20° C (100 g/100 ml):	100 g/100 ml. de agua
pH en solución al 10%:	7.5-10.0 Unidades
Densidad Aparente (Kg/m <sup>3</sup> ):	770 - 809 Kg/m <sup>3</sup>
Índice de Salinidad:	75.4
Humedad Relativa Crítica (a 30° C):	73%
Acidez equivalente a Carbonato de Calcio:	84 partes de Carbonato de Calcio por 100 partes de Urea.

### Comportamiento en el Suelo

La Urea, en su forma original, no contiene Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), sin embargo ésta se hidroliza con rapidez por efecto de la enzima "ureasa" y por la temperatura del suelo. En suelos desnudos y con aplicaciones superficiales de Urea, algún porcentaje de Amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) se pierde por volatilización. La Urea, al hidrolizarse produce Amonio y bicarbonato. Los iones bicarbonato reaccionan con la acidez del suelo e incrementan el pH en la zona próxima al sitio de reacción de este fertilizante (banda de aplicación). Una vez que la urea se ha convertido en Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), éste es absorbido por las arcillas y la materia orgánica del suelo y el Amonio es eventualmente nitrificado o absorbido directamente por las plantas.

### Papel Nutricional

El Nitrógeno (N) es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, es parte constitutiva de cada célula viva. En las Plantas, el Nitrógeno es necesario para la síntesis de la clorofila y como parte de la molécula de clorofila está involucrado en el proceso de la fotosíntesis. El Nitrógeno (N) también es un componente de las vitaminas y de los componentes energéticos de las plantas, igualmente es parte esencial de los aminoácidos y por tanto es determinante para el incremento en el contenido de proteínas en las plantas. Una planta deficiente

de Nitrógeno (N) no puede hacer un óptimo uso de la luz solar, por lo que se ve afectada la capacidad de fotosintetizar y en consecuencia su capacidad de aprovechamiento y absorción de nutrientes, limitando con esto el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas.

## Usos y Recomendaciones

La Urea es la fuente más económica de Nitrógeno (N) de alta concentración. Es un fertilizante que tiene una gran variedad de usos y aplicaciones. Es un componente indispensable para producir formulas balanceadas de fertilización. Se puede aplicar al suelo directamente como monoproducto, se puede incorporar a mezclas físicas balanceadas, y por su alta solubilidad en agua, puede funcionar como aporte de nitrógeno en formulas NPK's foliares, para uso en fertirriego altamente solubles y en fertilizantes líquidos.

En el caso de aplicaciones Foliares de Urea, es muy importante utilizar Urea libre de Biuret, con un contenido no mayor al 0.25%. El Biuret o Carbamyl Urea es un producto de condensación resultante de la descomposición por efecto térmico de la Urea. El Biuret es fitotóxico en aplicaciones al follaje únicamente (foliar), no así cuando se aplica al suelo.

## Compatibilidad y Estabilidad en Almacenamiento

La Urea es compatible con la mayoría de los fertilizantes, sin embargo existe una compatibilidad limitada con Superfosfato Triple (SPT) y Superfosfato Simple (SPS). En mezclas físicas que no se envían a almacenamiento, porque son producidas para su aplicación inmediata, es posible mezclarlos, ya que al aplicarse rápidamente se evita la reacción de la Urea y estos fosfatos poco compatibles. Es claramente incompatible con productos a base de Nitrato de Amonio, ya que la mezcla de ambos tiene una reacción inmediata aún en condiciones de bajos niveles de humedad relativa.

Es muy importante asegurar las mejores condiciones durante el almacenamiento, es decir, se debe contar con un lugar seco, fresco, ventilado y libre de cualquier agente contaminante, utilizando "tarimas" o "camas" para el estibado en el caso de productos envasados.

En general los fertilizantes, bajo condiciones adecuadas de almacenamiento y una vez envasados, son productos que no se degradan y que conservan íntegras sus propiedades fisicoquímicas y la concentración de nutrientes sin mayores alteraciones. Lo que si ocurre en el almacenamiento prolongado es que por su alta capacidad higroscópica, los fertilizantes toman humedad del ambiente y se compactan o apelmazan, por efecto de la presión y el peso ejercido en las estibas de sacos.

---

**ISQUISA S.A. DE C.V.**  
CALLE 10 NO. 917 PRIMER PISO ESQUINA AVENIDA 9 BIS  
COLONIA SAN JOSE C.P. 94560  
CORDOBA, VERACRUZ, MEXICO  
TEL. 01 (271) 71 71 800                      VENTAS 01 (800) 822 40 92

---