

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



**Efecto Contaminante por Fertilizantes Nitrogenados en Suelo y Agua.**

Por:

**MARÍA ADELAIDA JARILLO CAMPO**

**TESIS**

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL.**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Septiembre 2008

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



**Efecto Contaminante por Fertilizantes Nitrogenados en Suelo y Agua.**

Por:

**MARÍA ADELAIDA JARILLO CAMPO**

**TESIS**

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Septiembre 2008

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Efecto Contaminante por Fertilizantes Nitrogenados en Suelo y Agua.

Por:

MARÍA ADELAIDA JARILLO CAMPO

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para

Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN



Dr. Raúl Rodríguez García  
Coordinación de  
Ingeniería

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México.

Septiembre 2008.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Efecto Contaminante por Fertilizantes Nitrogenados en Suelo y Agua.

Por:

MARÍA ADELAIDA JARILLO CAMPO


TESIS

Que Somete a Consideración del H. Jurado Examinador

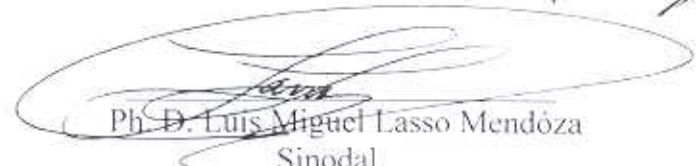
Como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL


Aprobada por:




M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala  
Asesor Principal



Ph.D. Luis Miguel Lasso Mendoza  
Sinodal



M.C. Antonio Ilizaliturri Verastegui  
Sinodal



M.C. Blas Alberto Rios Burciaga  
Vocal Suplente

## INDICE DE CONTENIDO

|   |            |
|---|------------|
| <b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....                                | <b>i</b>   |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....                                    | <b>I</b>   |
| <b>DEDICATORIA</b> .....  | <b>III</b> |
| <b>INDICE DE CUADROS</b> .....                                  | <b>IV</b>  |
| <b>INDICE DE FIGURAS</b> .....                                  | <b>IV</b>  |
| <b>INDICE DE GRÁFICAS</b> .....                                 | <b>V</b>   |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                                       | <b>6</b>   |
| Objetivo.....   | 8          |
| Hipótesis.....  | 8          |
| <b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....                             | <b>9</b>   |
| Fertilización .....   | 9          |
| Fertilizantes Nitrogenados .....                                | 10         |
| Nitrógeno en Suelo y Agua.....                                  | 11         |
| Contaminación por Nitratos en Suelo y Agua .....                | 14         |
| Criterios de Contaminación del Agua.....                        | 17         |
| Determinación de Calidad del Agua.....                          | 19         |
| Métodos físico-químicos .....                                   | 19         |
| Métodos Biológicos.....   | 20         |
| Indicadores Físico-Químicos .....                               | 20         |
| Funciones de suelo y agua en defensa de la contaminación .....  | 21         |
| Situación Mundial .....   | 22         |
| Situación en la República Mexicana.....                         | 24         |
| Normatividad para Control de Nitratos en Agua Subterránea ..... | 27         |
| <b>MATERIALES Y METODOS</b> .....                               | <b>29</b>  |
| Características del Sitio Experimental.....                     | 29         |
| Materiales utilizados .....                                     | 30         |
| Suelo.....  | 30         |
| Zeolita.....  | 31         |
| Ácidos húmicos H-85.....  | 31         |
| Fertigro N .....  | 31         |
| Nitrato de Amonio (NO <sub>3</sub> NH <sub>4</sub> ).....       | 31         |
| Columnas de Suelo.....  | 32         |

|  |           |
|--|-----------|
| Columnas de grava.....                               | 32        |
| Agua destilada.....                                  | 32        |
| Caracterización de las Unidades Experimentales ..... | 32        |
| Descripción de Tratamientos .....                    | 34        |
| Diseño Experimental .....                            | 35        |
| Características principales.....                     | 35        |
| Formación de Factoriales .....                       | 37        |
| Ventajas en Experimentos con Factoriales .....       | 37        |
| Desventajas en Experimentos con Factoriales.....     | 38        |
| Análisis Estadístico de los Factoriales .....        | 38        |
| Parámetros de Evaluación .....                       | 39        |
| Cronología del Experimento.....                      | 40        |
| Planeación.....                                      | 40        |
| Trabajo de Campo.....                                | 41        |
| Análisis .....                                       | 41        |
| <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>                  | <b>42</b> |
| Resultados en Agua.....                              | 42        |
| Resultados en Suelo .....                            | 46        |
| Análisis de Varianza.....                            | 48        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>                            | <b>50</b> |
| <b>LITERATURA CITADA .....</b>                       | <b>51</b> |
| <b>APÉNDICE.....</b>                                 | <b>57</b> |

## AGRADECIMIENTOS

*Al **Supremo Creador**, que sabiamente me conduce en el laberinto de la vida, por darme la oportunidad de conocer su inmenso amor expresado en todo cuanto me rodea. Y por cruzar en mí camino a seres y situaciones que a través del dolor me conducen directamente al campo de la superación y el aprendizaje, logrando alcanzar las metas que surgen en el fondo del abatimiento, siendo hasta ahora los desafíos más grandes de mi vida. Gracias Señor por las dificultades que se presentan para lograr resultados verdaderamente valiosos...*

*A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por admitir mi presencia dentro de ésta gran institución, por darme la oportunidad de adquirir en sus aulas el conocimiento requerido para mi formación en esta importante etapa de crecimiento intelectual y por todos los apoyos y facilidades brindados. Gracias por hacer de mí una profesionista en la más noble de las ciencias; la Agronomía.*

*A la persona que me mostró a través de sí lo valioso del ser humano, el **Ph. D. Luís Miguel Lasso Mendoza**, por su colaboración en la realización de este proyecto, pero principalmente por sus enseñanzas, comprensión, confianza, respeto, cariño e invaluable amistad, y sobre todo por el gran apoyo en todos los aspectos, durante mi transcurso en esta Universidad. Le agradezco infinitamente todo lo que me ha brindado de manera desinteresada. Para usted mi admiración y sincero respeto Doctor. Dios lo tenga siempre bajo su amparo.*

*Al **M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala**, gracias por la colaboración, gran apoyo y paciencia en el desarrollo de esta obra, especialmente agradezco los consejos brindados desde los inicios de mi carrera profesional, por el crecimiento y desarrollo que inspiró en el Departamento de Ciencias del Suelo y particularmente en mi persona.*

*Al **M.C. Antonio Ilizaliturri Verastegui**, por el apoyo y comprensión mostrados para la realización y revisión del trabajo.*

*Al **M.C. Blas Alberto Ríos Burciaga**, por su enseñanza, apoyo, disposición aportados para llevar a cabo todo lo necesario en el desarrollo de éste trabajo.*

*A la Lic. Guadalupe Lucia Barrera Valdez, por su amistad y apoyo incondicional en todas las etapas de realización de éste trabajo.*

*A la empresa COSMOCEL por la generosidad y atención mostradas en la realización de este proyecto de investigación, apoyando de principio a fin.*

*Agradezco especialmente al M.C. Javier Silveyra Medina por su ayuda en el trabajo estadístico, por el tiempo brindado, la paciencia y el apoyo brindado para realizar la presente investigación.*

*A todos mis amigos que me han apoyado incondicionalmente y que a pesar de la distancia están presentes en mi vida, gracias Ángela Hernández, Antonio Licon, M. Luisa Arias, Lourdes Ramírez, Lucas Moreno, Víctor Escorcía, Ángeles Romero, Uriel González, Yasmín Osorio y Yolanda Valencia. A mis amigos que hicieron inolvidable mi estancia en la Universidad, gracias Fermín Flores, Hortensia Yescas, Jacob Félix, Gerardo Juárez, Ismael Pérez, William Escalante, Rosario Medina, Rubén Sierra, por enseñarme el valor de la amistad sincera, por su infinito apoyo, nunca olvidaré los momentos tan agradables que pasamos juntos, amigos los llevo en mi corazón. También agradezco la convivencia tan amena con mis amigos Hugo A. Rivero y Celin O. Pérez.*

*A mis compañeros de la generación CIV, por compartir momentos especiales risas, tristezas, problemas, enfrentamientos y demás, durante mas de cuatro años.*

*Hago también un agradecimiento especial al Arq. Francisco Javier García Guerrero (Gerente Estatal de CONAFOR, Colima), por su apoyo para lograr ésta meta, así como también a tres grandes amigos y compañeros de trabajo: Enrique Urzúa, Luis Ruelas y Oscar Arath Pérez, por el gran apoyo incondicional y desinteresado, gracias también por los consejos brindados, por su compañía en momentos muy agradables y en los difíciles, por que no me han dejado caer y por que simplemente me muestran que no estoy sola y cuento con ustedes, mil gracias.*

*A ti D. S. S. que tal vez ya no tenga ningún sentido ahora, pero fuiste el impulso principal a continuar estudiando. Gracias por alejarte de mi vida.*



## DEDICATORIA

*A mi madre, **Cristina Campo Tino**, la manifestación más grande del amor divino, la mujer que acepto alojarme en su cuerpo, me ofreció el regalo más grande y hermoso, mi vida, cuidando con vehemencia de nosotros sus hijos. Kity eres el pilar principal que sostiene mis esfuerzos. Gracias por que cuento con tu apoyo incondicional y desinteresado, con tu confianza y sobre todo con tu inmenso amor maternal, único e incomparable. Pero sin duda por brindarme hasta la última gota de entusiasmo, demostrando tu sacrificio por hacer de mí lo mejor. Te amo Kity.*

*A mi hermano, **Antonio Jarillo Campo**, Dios te colocó entre la familia como un enorme apoyo en todo momento y en todos los aspectos, formas parte de mi vida, aunque somos dos únicamente, seguiremos luchando juntos en las buenas y en las malas, confío en ti por que se que tienes la inteligencia, la fuerza y el coraje, muestras de que estamos hechos. Toño, te agradezco mucho tu admiración, yo también te admiro, recuerda que, aunque de manera diferente, buscamos el mismo objetivo. Gracias también por tu inmenso apoyo y comprensión en todo lo que hago. Te quiero mucho hermanito.*

*A mi padre **Jesús Jarillo Lira**, te dedico de manera especial éste trabajo por que a través de tu conducta, actitudes y ejemplo, he logrado llegar donde estoy. Todo lo que haz mostrado como padre, me permite descubrir hasta donde llega mi capacidad de enfrentar la vida, de encontrar nuevos caminos y jamás aceptar la derrota, por que tú eres quien motiva mi entusiasmo y fortaleza. Cada paso que doy es uno más de tus desafíos y aquí tienes otro resultado favorable, es tuyo y de toda nuestra familia. Gracias por brindarme la oportunidad de aprender libre y responsablemente.*

CON AMOR Y GRATITUD, POR SIEMPRE MI FAMILIA

## INDICE DE CUADROS

|   |    |
|---|----|
| <b>Cuadro 1.</b> Efecto de los fertilizantes sobre el pH del suelo.....   | 10 |
| <b>Cuadro 2.</b> Directivas de la comunidad Europea de calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la alimentación..... | 21 |
| <b>Cuadro 3.</b> Descripción de solución y dosis de fertilizantes utilizados.....   | 34 |
| <b>Cuadro 4.</b> Descripción de los tratamientos.....   | 34 |
| <b>Cuadro 5.</b> Parámetros de Evaluación en Agua, metodología y lugar donde se realizó el Análisis.....                                | 40 |
| <b>Cuadro 6.</b> Parámetros de Evaluación en Suelo, metodología y lugar donde se realizó el Análisis.....                               | 40 |

## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Provincias Hidrogeológicas de la República Mexicana.....             | 25 |
| <b>Figura 2.</b> Acuíferos Disponibles y no Disponibles en la República Mexicana..... | 26 |
| <b>Figura 3.</b> Ubicación del sitio experimental.....                                | 29 |
| <b>Figura 4.</b> Ubicación del sitio donde procede el suelo en estudio.....           | 29 |
| <b>Figura 5.</b> Distribución de las unidades experimentales.....                     | 33 |

## INDICE DE GRÁFICAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Gráfica 1.</b> Análisis de Nitratos en agua, en los seis tratamientos.....                                 | 42 |
| <b>Gráfica 2.</b> Comparación de contenido de Sulfatos en Agua, para los seis tratamientos.....               | 43 |
| <b>Gráfica 3.</b> Resultados obtenidos para la variable Cloruros en Agua, en seis tratamientos.....           | 43 |
| <b>Gráfica 4.</b> Presencia de Bicarbonatos en los seis tratamientos.....                                     | 44 |
| <b>Gráfica 5.</b> Conductividad Eléctrica en Agua obtenida de los seis tratamientos.....                      | 45 |
| <b>Gráfica 6.</b> Comparación entre resultados obtenidos de pH en agua, en seis tratamientos.....             | 45 |
| <b>Gráfica 7.</b> Comportamiento de la variable Nitratos, en tres profundidades del suelo.                    | 46 |
| <b>Gráfica 8.</b> Comportamiento de la variable Conductividad Eléctrica, en tres profundidades del suelo..... | 47 |
| <b>Gráfica 9.</b> Comportamiento de la variable pH en tres profundidades del suelo.....                       | 47 |

## INTRODUCCIÓN

Se le llama contaminación a la alteración de alguno de los elementos necesarios para la vida, tierra, agua o aire, o a las perturbaciones producidas sobre los seres vivos como consecuencia de dicha alteración (Seoáñez, 1999).

Los nuevos sistemas de producción agrícolas, más comprometidos con el cuidado del medio ambiente y con menor utilización de productos químicos, necesitan tecnologías innovadoras que permitan asegurar los rendimientos y la calidad de los productos, a la vez minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente, pues son diversos los problemas de contaminación difusa derivados de la fertilización de los cultivos, el más importante posiblemente sea la contaminación de las aguas por nitratos (Carrasco, 2002).

El uso de fertilizantes inició en 1950, a partir de esa fecha su demanda aumentó a 150 millones de toneladas en 2005, su uso se justifica, porque se produciría 50% menos de los alimentos con que se cuenta actualmente. El 95 por ciento de los agricultores del país utilizan fertilizantes, aunque con frecuencia muy por debajo de las dosis recomendadas. El fertilizante más utilizado es el nitrógeno, seguido del fósforo y el potasio. El primero es usado en una proporción no mayor de dos a uno, con respecto al fósforo, mientras que el potasio llega al 10 por ciento del consumo total. (Herrera, 2002).

La contaminación de aguas superficiales y profundas por nitratos es uno de los problemas medio ambientales más criticados a la agricultura intensiva actual. La aplicación de fertilizantes nitrogenados, minerales u orgánicos, de forma generalizada y discriminada origina una contaminación difusa de las aguas superficiales y subterráneas. Otros problemas medio ambientales por aportación de N a los cultivos son la eutrofización de las aguas, emisión de óxidos de N a la atmósfera y acumulación de nitratos en los productos de consumo.

La presente investigación se realizó con la finalidad de evaluar el grado de contaminación entre un fertilizante químico y uno orgánico, e impulsar a las estancias correspondientes a prestar atención en este problema para promulgar normas y

actualizar las que existen con el fin de controlar el uso de fertilizantes que causan la contaminación de aguas subterráneas, por lixiviación de nitratos y demás problemas que derivan las actividades agrícolas.

### **Objetivo**

Evaluar y comparar el efecto contaminante de dos materiales fertilizantes nitrogenados (inorgánico y orgánico) en la generación de sales.

### **Hipótesis**

El fertilizante orgánico causa menor grado de contaminación con sales, en el suelo y agua, comparado con un fertilizante inorgánico.

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

### **Fertilización**

Las actividades agrícolas, buscan mayor cantidad y calidad de productos agrícolas. Esto se logra mediante la acción de factores naturales y humanos. En principio, todo aporte equilibrado de nutrientes a los vegetales proporcionará mejores cosechas. Si el cultivo se repite, extrae los nutrientes que necesita y que el suelo llega un momento, es incapaz de proporcionar en cantidad suficiente, ante lo cual se debe compensar con fertilizante. Los nutrientes deben estar en formas asimilables por la vegetación, los fertilizantes no contienen los nutrientes en forma elemental (N, P, K, etc.), se componen de formas iónicas fáciles de absorber (Seoánez, 1999).

En la agricultura moderna es necesario el uso de agroquímicos para mantener altos rendimientos en los cultivos, pero algunas desventajas que presentan los fertilizantes es que alteran las propiedades químicas y biológicas del suelo; asimismo, los fertilizantes nitrogenados propician una variada lixiviación de nitratos que contaminan los acuíferos (Medina y Cano, 2001).

Antes de pensar en la aplicación de fertilizantes, todas las fuentes disponibles de los nutrientes deberían ser utilizadas, por ejemplo diferentes tipos de estiércol, esquilmos agrícolas, después de ser convertidos en abono y descompuestos, antes de su aplicación al suelo. El abono orgánico a menudo crea la base para el uso exitoso de fertilizantes minerales. La combinación de abono orgánico, materia orgánica y fertilizantes minerales (Sistema Integrado de Nutrición de las Plantas, SINP) ofrece condiciones ambientales ideales para el cultivo, cuando el abono orgánico mejora las propiedades del suelo y el suministro de los fertilizantes minerales provee los nutrientes que las plantas necesitan (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002).

Es frecuente el abuso en el uso de fertilizantes, sobre todo de los nitratos. El aumento de su aplicación, a partir de ciertos umbrales, no implica mayores rendimientos agrícolas. Es decir que las partes no asimiladas o no incorporadas al suelo pueden ser arrastradas por escorrentía superficial o penetrar hacia las aguas subterráneas. Algunos fertilizantes

nitrogenados aplicados en grandes dosis pueden bajar el pH de suelo, como se indica a continuación

**Cuadro 1.** Efecto de los fertilizantes sobre el pH del suelo

| <b>Fertilizantes</b> | <b>Efectos sobre el pH</b>                                  |
|----------------------|---|
| Potásicos            | No tienen efectos (cloruro potásico, sulfato potásico).     |
| Superfosfatos        | Pocos o tendencia a neutralizar (escorias, roca fosfórica). |
| Amoniacales          | Producción de acidez (se suele añadir cal)                  |
| Nitratos             | Si están combinados con bases como Na o Ca aumentan el pH.  |
| Cianamidas cálcicas  | Ejercen el mismo efecto que los nitratos.                   |

Por otra parte, estos nitratos pueden concentrarse en alguna especie cultivadas, con el consiguiente peligro para la salud humana y animal, pues los nitratos se reducen en el intestino y pasan a nitritos e incluso a nitrosaminas, ambos tóxicos, e incluso estas ultimas cancerigenas. (Seoáñez, 1999).

### **Fertilizantes Nitrogenados**

El nitrógeno es considerado como un macroelemento, debido a que es requerido por los vegetales en grandes cantidades y tiene como principal función en todos los organismos vivos, la de formar parte de la estructura química de algunas de las moléculas orgánicas mas importantes de las que forman la estructura de las células viva, estas son las proteínas (Yañes, 1993).

El nitrógeno produce plantas de color verde oscuro y mas suculentas; también hace que las células sean mas grandes con paredes celulares mas delgadas, además aumenta la proporción de agua y reduce el porcentaje de calcio en los tejidos vegetales, fomenta el desarrollo vegetativo e impulsa la formación de follaje de buena calidad facilitando la producción de carbohidratos y ayudando a la succulencia (Tamhane *et al.*, 1986)

Existen tres formas del N; libre (componente del aire), orgánica (formación de tejidos y órganos vegetales y animales, y sus desechos), éste constituye más del 85% del nitrógeno total existente en el suelo. Mineral (compuestos simples). La totalidad del nitrógeno esta determinada por: los residuos orgánicos (85%) el N de origen



atmosférico dejado por los *Rhizobium*, aportes del agua de lluvia en forma de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y aportes de fertilización. En una primera fase el nitrógeno orgánico es transformado por bacterias amonificantes en amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) constituyendo una forma amoniacal. Esta sustancia es luego convertida en nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) por las bacterias nitrificadoras, constituyendo la fase nítrica del proceso (Rodríguez, 1982).

El hecho de que las plantas no puedan utilizar completamente el N del suelo es de gran importancia. La utilización del N puede oscilar entre un 25 y 85% según el cultivo y las técnicas agrícolas; por lo tanto a fin de obtener una máxima producción, se aplica un exceso de fertilizante nitrogenado al suelo, razón por la cual aumenta sustancialmente el arrastre de nitrógeno por las aguas pluviales (Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud 1980).

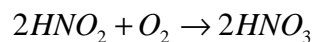
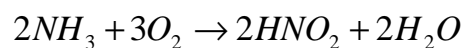
Entre los fertilizantes nitrogenados se distinguen a) nitrogenados orgánicos, de origen variado, como gallinaza, compostas, etc., aportan elementos nutritivos básicos y contribuyen al mejoramiento de la composición del suelo, b) nitrogenados de origen natural como el nitrato de sodio ( $\text{NO}_3 \text{Na}$ ), con 16% de N en forma nítrica fácilmente soluble y asimilable, c) nitrogenados sintéticos: Sulfato amónico,  $\text{SO}_4 ((\text{NH}_4)_2$ , Nitrato amónico  $\text{NO}_3 \text{NH}_4$ , Nitrato potásico,  $\text{NO}_3 \text{K}$ , Amoníaco anhidro,  $\text{NH}_3$ , Cianamida cálcica,  $\text{CN}_2 \text{Ca}$ , Urea  $\text{CO} (\text{NH}_2)_2$ , Urea formaldehído,  $\text{CO} (\text{NH}_2)_2$ , Soluciones amoniacales,  $\text{NH}_4 \text{OH}$ , etc. La materia prima para la síntesis de estos compuestos es el nitrógeno atmosférico. También se utiliza, pero en muchos menos casos, la recuperación del amoníaco a partir de ciertos tipos de carbón (Rodríguez, 1982).

### **Nitrógeno en Suelo y Agua**

El nitrógeno en el suelo en sus formas solubles se pierde por la utilización directa de las plantas que lo extraen de la solución del suelo, el consumo de los microorganismos que lo utilizan para sus funciones vitales, los procesos de desnitrificación causados por un pH bajo o por una mala aireación del suelo, perdiéndose el nitrógeno en forma de gas, pérdidas del elemento principalmente en su forma nítrica (la más soluble) por el drenaje, nitrógeno fijado en el complejo de cambio del suelo y el utilizado por los microorganismos son pérdidas relativas pues no son utilizados directamente por las plantas (Rodríguez, 1982).

El N atmosférico puede ser fijado por bacterias y hongos; el contenido en el agua de lluvia y en las proteínas de los seres vivos, es devuelto al suelo excretado por las raíces y por los restos vegetales y animales muertos. Este N sufre en el suelo una serie de transformaciones que van desde la mineralización hasta la inmovilización; cuando existe una relación C/N alta, los microorganismos utilizan todo el N mineral existente en el suelo, pasando por los procesos de nitrificación conversión de sales amoniacales en nitritos, y finalmente en nitratos por bacterias del genero *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. Los nitratos, fuente de N para las plantas, a su vez pueden ser reducidos a nitrógeno libre (gaseoso) o a óxidos de nitrógeno por bacterias (*Pseudomonas*, *Micrococcus*) y hongos, a través del proceso de desnitrificación (Seoánez, 1999).

El proceso de nitrificación es la conversión de N-NH<sub>3</sub> a N-NO<sub>3</sub>. La conversión es conducida principalmente por dos tipos específicos de bacterias, referidas como nitrificantes que son mas activas en suelos ricos en materia orgánica. La conversión biológica del NH<sub>3</sub> a N-NO<sub>3</sub> incluye dos procesos distintos, según las reacciones siguientes:



En la primera reacción intervienen las nitrosomonas y los nitrosococcus y en la segunda reacción interviene nitrobacter. Estas dos reacciones muestran que es un proceso de oxidación. Es evidente que el proceso de nitrificación no aumenta el abastecimiento total del nitrógeno, si no que únicamente cambia su forma (Ortiz y Ortiz, 1990).

La nitrificación es importante por varias razones:

- El nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) es inmediatamente disponible para uso de las plantas y microorganismos del suelo. En condiciones de buena aireación los organismos también usan NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

- El ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) puede perderse por desnitrificación, proceso mediante el cual se reduce a formas gaseosas como el óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ) o  $\text{N}_2$  que se pierde a la atmósfera, es altamente móvil y se mueve libremente con el agua del suelo. Mucho del nitrato puede escurrirse por el perfil del suelo, esto sucede más en los suelos arenosos profundos que en los suelos de textura fina con un drenaje moderado. El manejo apropiado del nitrógeno puede controlar la lixiviación a mantos freáticos e incrementar la productividad de los cultivos (Lavado, 2001).

El nitrógeno en forma amoniacal ( $\text{NH}_3$ ) se transforma en ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y en un suelo que no sea ácido puede ser retenido del mismo modo que lo son el calcio, el magnesio y el potasio. Por lo tanto, la forma amoniacal del nitrógeno no es eliminada con facilidad del suelo, mientras no se transforme en forma nítrica (Worthen and Aldrich, 1980). El suelo tiene muy poca capacidad para evitar que los nitratos de cualquier clase sean arrastrados con las aguas de drenaje (Bear, 1969).

En los suelos agrícolas, los ácidos nítrico y nítrico probablemente no existan como tales, pero están combinados con elementos básicos formando sales (nitratos de Ca, Mg, K, Na) dependiendo de la composición química del suelo. Las condiciones del suelo bajo las cuales ocurre una nitrificación activa son mucho más restringidas que las de la amonificación, es decir, el proceso es más afectado por cambios en la reacción del suelo, aireación, humedad, concentración de sales y otras condiciones del medio ambiente. El drenaje es factor muy importante. La reacción óptima para los nitrificadores son los pH de 7.0 a 8.0 (Ortiz y Ortiz, 1990).

El nitrógeno que utilizan la mayoría de las plantas cultivadas en condiciones naturales tiene su origen en las proteínas de la materia orgánica del suelo. A la descomposición de la materia orgánica, su nitrógeno es liberado en forma de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), combinación para la cual el suelo tiene un alto poder de retención, ya que de otro modo se escaparía a la atmósfera. En condiciones favorables este amoníaco es oxidado por los microorganismos que lo transforman en ácido nítrico (Bear, 1969).

La mayor parte del nitrógeno es absorbido tanto en la forma amónica como en la de nitratos, dependiendo de las condiciones del suelo, la clase de planta y su grado de crecimiento. En general, parece ser más favorable la presencia de ambos iones juntos.

El ion nitrito esta casi siempre presente en pequeñas cantidades, pues es fácilmente oxidado a la forma nitrato. Esto es favorable porque una concentración de nitrógeno en forma de nitrito es marcadamente toxica para los vegetales (Buckman y Brady, 1985).

Los nitratos son fracciones de moléculas llamadas iones que constan de nitrógeno y oxígeno. Las plantas absorben del suelo los iones nitrato para formar proteínas y para ello deben separar el nitrógeno del oxígeno y juntarlo con el hidrogeno para formar iones amonio; este proceso se denomina reducción del nitrógeno. Seguidamente el ion amonio se liga a un acido para formar un aminoácido; las moléculas de proteína se constituyen por cientos de aminoácidos y constituyen la materia viva, así que las proteínas coloidales en el agua son el asiento de los fenómenos que llamamos vida. Todo el proceso de síntesis proteica exige mucha energía para llevarse a cabo y es aquí donde la planta invierte casi toda la energía en su respiración (Garcidueñas, 1994).

Los nitritos se forman por la oxidación bacteriana incompleta del nitrógeno en el medio acuático o terrestre, o por la reducción del nitrógeno en el medio acuático o terrestre, o por la reducción bacteriana del nitrato. Son productos intermedios del ciclo completo de oxidación-reducción y solo se encuentran presentes en condiciones de baja oxidación. El nitrito en comparación con el nitrato es menos soluble en agua y menos estable (García *et al.*, 1994)

El nitrógeno en forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) presenta una gran movilidad en el suelo, por acción del agua; se pierde por lixiviación debido a su solubilidad y se concentra en la superficie por capilaridad (Worthen and Aldrich, 1980).

### **Contaminación por Nitratos en Suelo y Agua**

Los fertilizantes utilizados en prácticas agrícolas son la fuente principal de contaminación de las aguas por nitratos. A ello se pueden añadir los subproductos como estiércol, etc. Después del vertido, los nitritos y nitratos se diluyen en la solución del suelo y son absorbidos por los complejos coloidales arcillo-húmicos, constituyéndose en reserva de elementos fertilizantes; los vegetales los absorben al convertirse estos productos en soluciones salinas del suelo. Si en los vertidos se sobrepasa la capacidad de asimilación del suelo, aumentaran, los dos iones en la precolación de las aguas y su

presencia en las corrientes subterráneas; estas últimas y la escorrentía superficial arrastrarán estos derivados del nitrógeno hasta los cursos de agua. Su presencia produce la eutrofización (Seoáñez, 1999).

La cantidad de nitratos que se lixivian hacia el subsuelo depende del régimen de pluviosidad y de la clase textural del suelo. La mayoría de los suelos poseen abundantes partículas coloidales orgánicas e inorgánicas, cargadas negativamente, por lo tanto rechazan a los aniones, como consecuencia, los nitratos se lixiviarán con facilidad. Por el contrario, muchos suelos tropicales poseen carga positiva, por lo tanto manifiestan una fuerte retención de nitratos. La textura del suelo es un factor importante en relación con la lixiviación. Cuanto más fina sea la textura más capacidad de retención presentarán (García y Dorronsoro, 2007).

Contaminaciones básicas de las aguas dulces: Contaminación por sales solubles, de origen natural, química (detergentes, fertilizantes, sales minerales, metales pesados, fenoles, productos fitosanitarios), contaminación orgánica de origen urbano, térmica, por residuos radiactivos.

El movimiento de un curso de agua, el de sus afluentes, las precipitaciones y el simple contacto con el suelo hacen que las aguas arrastren tierras y por ello llevarán suspensiones y disoluciones de componentes del suelo, ácidos húmicos, etc. (Seoáñez, 1999).

La contaminación del agua subterránea por nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) es un problema extendido en muchos lugares del mundo (Canter, 1997) e impone una seria amenaza al abastecimiento de agua potable (Pauwels *et al.*, 2001; Muñoz *et al.*, 2004). Este problema obedece al impacto que tiene el excesivo uso de fuentes nitrogenadas en el sector agropecuario ya que no está regulada la aplicación y uso de fertilizantes minerales (inorgánicos), ni la fertilización proporcionada por estiércol y biosólidos (inorgánicos) (Ongley, 1997; Figueroa *et al.*, 2003).

La acumulación de nitratos en las aguas subterráneas y superficiales junto con su excesiva presencia en alimentos hortícolas constituye un problema ambiental y sanitario creciente. Esta acumulación es atribuida a las inadecuadas prácticas agrícolas y ganaderas. En el ámbito agrícola la fuente fundamental de este tipo de contaminación es

la aplicación excesiva o inadecuada de fertilizantes nitrogenados minerales u orgánicos (Ordóñez *et al.*, 1997).

Los nitratos son solubles en agua, y solo son retenidos por la fase sólida del suelo mientras lo sea el agua, por lo cual este anión puede lixivarse fácilmente y alcanzar las napas de agua subterránea, pudiendo permanecer ahí por décadas (Nolan, 1999).

La entrada de los nitratos a las aguas subterráneas es un resultado de procesos naturales y del efecto directo o indirecto de las actividades humanas. Los procesos naturales incluyen la precipitación, el intemperismo de los materiales y la descomposición de la materia orgánica. Los nitratos provenientes de las actividades humanas incluyen la escorrentía de terrenos cultivados, efluentes de lagunas y tanques sépticos, fertilización excesiva con nitrógeno, deforestación y el cambio en la materia orgánica del suelo como resultado de la rotación de cultivos (Heaton, 1985).

El problema con los nitratos, es que son contaminantes móviles en el agua subterránea que no son adsorbidos por los materiales del acuífero y no precipitan como un mineral. Estos dos factores, permiten que grandes cantidades de nitrato disuelto permanezcan en el agua subterránea. Debido a su naturaleza soluble, los nitratos tienden a viajar grandes distancias en la subsuperficie, específicamente en sedimentos altamente permeables o rocas fracturadas (Freeze y Cherry, 1979).

Las sales de nitrato son muy solubles, por lo tanto la posibilidad de lixiviación es elevada, teniendo en cuenta el bajo poder de adsorción que presenta el suelo con las partículas de carga negativa. El problema ambiental es la acumulación de nitratos en el subsuelo que pueden incorporarse a las aguas subterráneas o, arrastrados a cauces y reservorios superficiales, donde también actúan como fertilizantes de la vegetación acuática. Su concentración puede originar eutrofización del medio, causando proliferación de especies como algas y plantas verdes que cubren la superficie, por consecuencia un elevado consumo de oxígeno y su reducción en el medio acuático, dificultando la incidencia de la radiación solar por debajo de la superficie, ambos fenómenos disminuyen la capacidad autodepuradora del medio y la capacidad fotosintética de los organismos acuáticos (García y Dorronsoro, 2007).

Mientras que la contaminación por fuentes puntuales se origina de diversos medios tales como efluentes de tanques sépticos y depósitos de excretas, la contaminación no puntual se distribuye en amplias áreas como son los campos donde los fertilizantes nitrogenados han sido aplicados (Hurlburt, 1988).

Cuando se realizan vertidos intensivos de aguas residuales con grandes cantidades de materia orgánica, se acumulan aminos y nitritos en el suelo, lo que puede originar la formación de nitrosaminas (que son carcinógenos) por condensación del ácido nitroso con una amina secundaria, o por acción de los organismos del suelo, en medio neutro o alcalino, con iones nitrito. El  $\text{NO}_3^-$  representa un peligro potencial para las aguas subterráneas, pues la parte no extraída por las plantas, puede emigrar por arrastre, siendo muy interesante conocer el grado de intensidad del proceso de desnitrificación en el perfil del suelo (Seoáñez, 1999).

Las cantidades presentes en los cursos de agua son muy variables. Como orientación diremos que los límites admitidos en USA, para nitratos, son de  $10 \text{ mg l}^{-1}$  en las aguas potables y de  $45 \text{ mg l}^{-1}$  en los vertidos residuales (Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud 1980).

La composición química de un agua puede verse modificada por una serie de fenómenos de naturaleza fisicoquímica, como son: reducción de sulfatos, reducción de nitratos, cambio iónico, concentración por disolución, concentración por evaporación y nuevas disoluciones (Seoáñez, 1999).

### **Criterios de Contaminación del Agua**

El análisis de cualquier agua revela la presencia de gases, elementos minerales y elementos orgánicos en solución o en suspensión. Estos elementos tienen un origen natural, rocas, suelo y aire, al que hay que añadir el procedente de las actividades de producción y consumo humano, que originan una serie de productos de desecho que son vertidos, depurados o no, a las aguas para su eliminación. Son precisamente la naturaleza y la cantidad de estos elementos los que definen un agua y precisan y limitan su empleo para los diversos usos: agua potable, de uso doméstico, industrial, agrícola o recreativo (Seoáñez, 1999).

El problema del agua no se limita a su aspecto cuantitativo de abastecimiento y consumo. Aun cuando son muchos los usos que se pueden dar a este recurso, aquellos que involucran criterios de calidad son principalmente: uso como agua potable y en industrias alimentarias, uso recreativo, conservación de flora y fauna, uso agrícola e industrial. La calidad de las aguas superficiales, en particular las corrientes, ha sido objeto de estudios relativamente detallados de las mayores cuencas de muchos países (Fernández, 2007).

La calidad natural del agua es el conjunto de características físico-químicas y bacteriológicas que presenta el agua en su estado natural (temperatura, cantidad y tipos de sales en disolución, gases disueltos, contenido de microorganismos, etc.). La calidad útil del agua está definida por las características físico-químicas y biológicas que exigen los diferentes usos del agua y que proporcionan un beneficio económico, social, o psicológico al hombre. Por lo anterior la calidad del agua se define en relación con el uso o actividad a que se le quiera dedicar (Seoánez, 1999).

El agua forma parte de todos los ecosistemas. De su existencia y conservación depende un sinnúmero de recursos naturales, así como todas las actividades humanas desde las que tienen que ver con su subsistencia hasta con el desarrollo como nación, es así que el manejo y conservación del vital líquido es tema central para la gestión ambiental. En términos ambientales, el tema del agua es una de las peores crisis que desafía el mundo (Cabanillas, 2003).

Los indicadores de calidad son parámetros físicos, químicos o biológicos que proporcionan una medida de la misma y permiten evaluar cualitativamente los cambios que las diferentes aplicaciones del agua pueden originar en su calidad. El valor de los indicadores de calidad ha de basarse en el mismo principio de finalidad del uso.

La elaboración de unas normas de calidad del agua plantea muchos problemas, tanto en el terreno teórico como en el práctico.

En las reglamentaciones internacionales, aparecen distintas definiciones para el agua destinada al consumo doméstico:



- La concentración máxima recomendada representa un límite a alcanzar; un agua cuyas características estén de acuerdo con estas concentraciones se considera de excelente calidad.
- La concentración máxima aceptable es el límite a partir del cual la calidad del agua disminuye, y puede provocar cierta reticencia para el consumidor.
- La concentración máxima admisible es la cantidad máxima de sustancia desfavorable; contenidos superiores pueden ser peligrosos para la salud. Si alguno de los elementos considerados se presenta en el agua a concentración superior, se considera impropia para el consumo domestico.

Estas definiciones se basan en un “riesgo aceptable”, traducido cuantitativamente en términos de composición del medio acuático, teniendo en cuenta, sobre todo, las repercusiones sobre el hombre, y que deben ser estudiadas para cada contaminante considerado (Seoáñez, 1999).

En este sentido, la definición de una contaminación límite ha de establecerse: para cada elemento, compuesto, y en función de cada organismo en particular (hombre, peces, crustáceos, plantas, etc.), y para cada medio en particular. Es mas factible fijar un limite de “flujo de contaminación”, concepto que introduce la “capacidad limite de aceptación del medio”, definida como el flujo máximo de contaminantes (en volumen o en peso por unidad de tiempo) que puede recibir el medio, sin que aparezcan riesgos significativos para el hombre o para el medio (Rodier, 1998).

## **Determinación de Calidad del Agua**

### **Métodos físico-químicos**

Se basan en el estudio de los factores físico-químicos del agua, se realizan mediante una toma de muestras de los sistemas acuáticos, con la determinación de sus características físicas y con análisis de sus componentes químicos, dan información valiosa, pero se refiere únicamente al instante en que se obtuvo la muestra; por lo tanto, pueden dar resultados muy alarmantes o, al contrario, pasar desapercibidos ciertos factores que pueden ser decisivos para un uso determinado del agua. No indican el estado anterior al

de la toma de muestras ni la capacidad de recuperación natural después de un aporte contaminante, tanto en el tiempo como en el espacio (Seoánez 1999).

### **Métodos Biológicos**

Se fundamentan en el estudio de las comunidades de animales y de plantas acuáticas. Dado que cada biocenosis o cada comunidad responde a las condiciones físico-químicas del medio donde vive, cualquier alteración en éstas induce cambios que se manifiestan en la sustitución de unas especies por otras, o por la variación del número y proporción de cada una de ellas. (Patrick, 1974).

### **Indicadores Físico-Químicos**

*Materiales en suspensión*, estos materiales producen contaminación mecánica. *Color*, por desechos que causan dificultad en los procesos de fotosíntesis e intercambio de oxígeno. *Turbidez*, debida a la presencia de materias en suspensión finamente divididas: arcillas, limos, granos de sílice, materia orgánica, etc. *Temperatura*, Influye en la solubilidad de sales y gases, en la disociación de sales disueltas, y por tanto en la conductividad eléctrica y pH del agua. *pH*, mide la concentración de iones  $H^+$  en el agua, elevado indica baja concentración de iones  $H^+$ , por tanto alcalinización del medio. *Conductividad eléctrica*, estrechamente ligada a la concentración de sustancias disueltas. Las sales minerales son buenas conductoras. *Potencial de óxido-reducción (rH)*, logaritmo decimal, cambiado de signo, de la presión en atm., del H gaseoso en equilibrio con el H molecular disuelto en la solución. *Indicadores de la contaminación orgánica*, como son: carbono orgánico total (COT), demanda total de oxígeno (DTO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, determinación de nitritos. *Determinación de los compuestos y elementos tóxicos*, los elementos tóxicos presentes en el agua son: antimonio, plata, arsénico, bario, cloratos, cromo, cobalto, cianuro, estaño, flúor, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio, uranio y vanadio. *Determinación de elementos no deseables y microcontaminantes orgánicos del agua* en éste grupo se encuentran los hidrocarburos clorados, policíclicos aromáticos, aceites, grasas, mercaptanos, pentaclorofenol y derivados, trialometanos, tensoactivos, nitrilo-triacetato de sodio y cloruro de vinilo (Seoánez, 1999).

**Cuadro 2.** Directivas de la comunidad Europea de calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la alimentación

| Parámetros  | A <sub>1</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | A <sub>3</sub> |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|   | G              | 1              | G              | 1              | G              | 1              |
| pH  | 6.5-8.5        | -              | 5.5-9          | -              | 5.5-9          | -              |
| Coloración (después de la filtración) mg lt <sup>-1</sup> escala Pt | 10             | 20 (0)         | 50             | 100 (0)        | 50             | 200 (0)        |
| Temperatura °C  | 22             | 25 (0)         | 22             | 25 (0)         | 22             | 25 (0)         |
| Conductividad μs/cm <sup>-1</sup> a 20 °C                           | 1.000          | -              | 1.000          | -              | 1.000          | -              |
| Nitratos mg lt <sup>-1</sup>  | 25             | 50 (0)         | -              | 50 (0)         | -              | 50 (0)         |
| Sulfatos mg lt <sup>-1</sup>  | 150            | 250            | 150            | 250 (0)        | 150            | 250 (0)        |
| Cloruros mg lt <sup>-1</sup>  | 200            | -              | 200            | -              | 200            | -              |

G = Valor Guía; I = Valor Imperativo; (0) = Circunstancias climáticas o geográficas excepcionales; A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, = Tratamientos tipo de las aguas superficiales para el uso de las mismas como agua potable; A<sub>1</sub> = Tratamiento físico simple y desinfección; A<sub>2</sub> = Tratamiento normal, físico y químico y desinfección; A<sub>3</sub> = Tratamiento físico, químico afinado y desinfección.

### **Funciones de suelo y agua en defensa de la contaminación**

El suelo ejerce varias funciones como son: a) Sustrato físico de la vegetación y de su sistema radicular y sustrato nutritivo que aporta aire, agua y elementos básicos para su metabolismo, b) Filtro, por sus características actúa al paso del agua, reteniendo materias y productos que podrían contaminar, c) Tampón, minimiza las alteraciones incorporando o transformando productos, retiene el agua, controla y distribuye su transporte, d) Transformador de productos, degrada muchas sustancias, metaboliza, inmoviliza o las destruye, utilizándolas en su beneficio o en el de los seres vivos que sustenta, e) Fuente de materias primas, extracción de recursos mineros y de todo tipo, f) Reserva de agua que fija o se desplaza en el suelo, manteniendo y nutriendo a los cursos de agua y la vegetación (Seoánez, 1999).

Por su naturaleza, los acuíferos son lentos para contaminarse pero una vez contaminados, difícilmente se autodepuran. La única opción para evitar futuras

contaminaciones por nitratos en acuíferos someros susceptibles, es iniciar con el control del uso del suelo (Hendry, 1988).

La defensa contra la presencia excesiva de iones nitrato y nitrato en las aguas se basa en la instalación de estaciones depuradoras biológicas, en el estudio profundo de la capacidad de asimilación del suelo, y, en general, en la búsqueda de técnicas que disminuyan la producción residual de derivados del nitrógeno tanto líquidos como gaseosos, de forma que se mitigue la alteración del ciclo del nitrógeno en la biosfera (Seoáñez, 1999).

### **Situación Mundial**

A nivel mundial el consumo de fertilizantes nitrogenados aumentó de 8 a 17 Kg ha<sup>-1</sup> de suelo agrícola en un periodo de 15 años (1973-1988). Se predice que los requerimientos de fertilizantes nitrogenados aumentarán en el futuro; sin embargo, con la tecnología actual de producción de fertilizantes y los métodos de aplicación empleados que resultan poco eficientes, así como el costo y la contaminación ecológica que producen, su uso se hace más prohibitivo. Por más de cien años, la FBN ha atraído a los científicos interesados en la nutrición vegetal, y se ha explotado este conocimiento en la agricultura (Hussein, 1999).

El agudo deterioro de los ecosistemas impone a la sociedad adoptar no sólo medidas de reordenamiento ecológico, sino también hacer estudios que permitan comprender en qué medida y cuáles actividades del hombre contribuyen a tal deterioro y que, al mismo tiempo, ayuden a evaluar si está en peligro la salud del hombre. En un sentido estricto, el volumen de satisfactores que se pueden producir en una región determinada puede verse disminuido en el tiempo como consecuencia del agotamiento de los recursos fuente de la producción. Este agotamiento puede ser producto de dos factores principales o de una combinación de ambos: a) el abuso de los recursos en respuesta a las formas de una cierta racionalidad de rentabilidad, o b) el agotamiento de los recursos como producto de una explotación inapropiada (Toledo *et al.*, 1989).

En el ámbito mundial, alrededor del 70 por ciento del agua se utiliza para agricultura y más de 90 por ciento no recibe ningún tratamiento y es descargada de esa forma, lo que

indudablemente repercute en problemas de pobreza y salud. En países en desarrollo, aproximadamente 50 por ciento del agua proviene de mantos subterráneos, lo que significa que más de mil 500 millones de personas utilizan el agua subterránea como fuente de agua potable (Cabanillas, 2003).

El Instituto de Salud Pública y el Ambiente de Holanda (RIVM), (1992) señala que la agricultura europea es causante del 60 por ciento del total del flujo fluvial de nitrógeno, que llega al Mar del Norte y es responsable del 25 por ciento de la carga total de fósforo. El mismo informe señala que en la República Checa, la agricultura aporta el 48 por ciento de la contaminación del agua superficial. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (1991) indica que Holanda registra una contaminación sustancial de las aguas subterráneas por nitratos, en tanto Appelgren (1994) observa que el 50 por ciento de los pozos poco profundos que abastecen de agua a más de un millón de residentes de Lituania no son aptos para el consumo humano por la presencia de una gran variedad de contaminantes, entre los que figuran plaguicidas y compuestos nitrogenados.

Las concentraciones de nitratos en el agua subterránea en Long Island, New York, se han incrementado marcadamente en un lapso de 30 años. Una cantidad significativa de ese incremento ha sido atribuida a los fertilizantes utilizados en céspedes y jardines, además de las descargas de tanques sépticos. El incremento de las concentraciones de nitratos es de particular importancia en la parte central y este de la isla, ya que el agua subterránea es la única fuente de agua para beber. El agua subterránea fue muestreada en catorce pozos adomados cerca del nivel freático en un desarrollo habitacional construido en 1970. Las muestras fueron colectadas durante 1972 – 1979 y analizadas para determinar nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico y nitratos. Los análisis estadísticos indicaron que la concentración de nitratos en los pozos incremento significativamente. Las cargas de nitrógeno fueron estimadas de 2300 kg año<sup>-1</sup> provenientes de los fertilizantes, 80 kg año<sup>-1</sup> del agua de irrigación, 200 kg año<sup>-1</sup> de animales y menos de 67 kg año<sup>-1</sup> de la precipitación, las descargas de tanques sépticos se supusieron despreciables. La relación de los isótopos del nitrógeno sugirió que la fuente más importante fue la deriva de actividades agrícolas más que la de desechos humanos o animales (Flipse *et al.*, 1984).

La contaminación de las aguas causada, en determinadas circunstancias, por la producción agrícola intensiva es un fenómeno cada vez más acusado que se manifiesta, especialmente, en un aumento de la concentración de nitratos en las aguas superficiales y subterráneas, así como a la eutrofización de los embalses, estuarios y aguas litorales. Entre las fuentes difusas que contribuyen a la contaminación de las aguas, la más importante actualmente es la aplicación excesiva o inadecuada de los fertilizantes nitrogenados en la agricultura (Directiva 91/676/CEE, 1991).

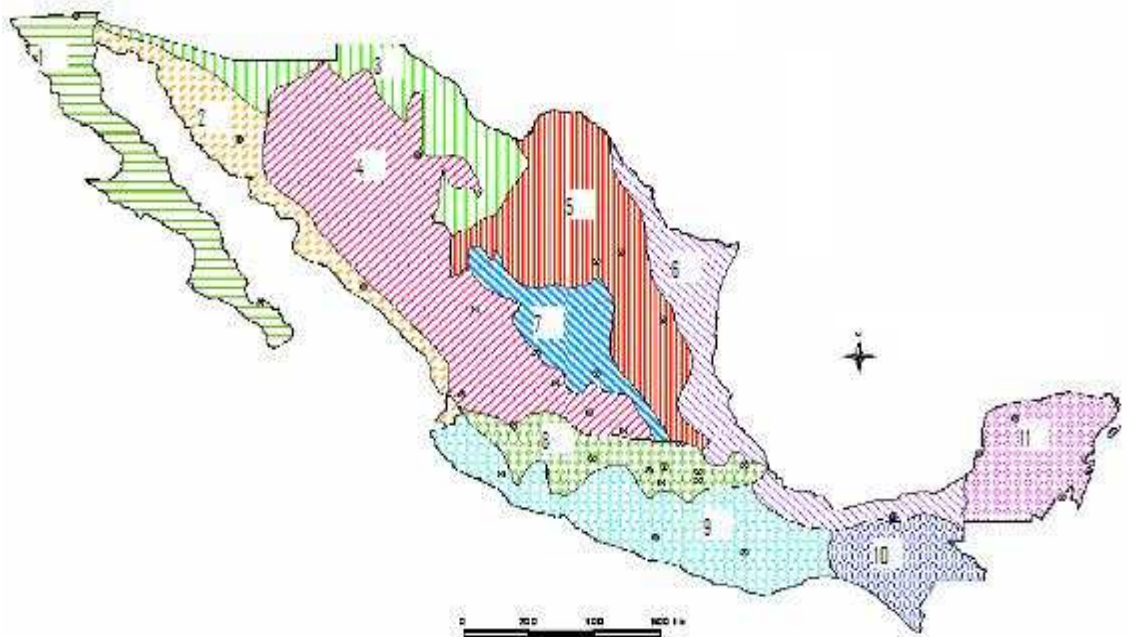
El nitrógeno tiene dos isótopos estables  $^{14}\text{N}$  (99.63 % de átomos en el aire) y  $^{15}\text{N}$  (0.37 % de átomos en el aire). La abundancia relativa de  $^{15}\text{N}$  (relación de  $^{15}\text{N} / ^{14}\text{N}$ ) en los nitratos del agua subterránea pueden ser usadas para distinguir los nitratos originados de desechos animales de aquellos originados por otras fuentes (Flipse *et al.*, 1984).

### **Situación en la República Mexicana**

En las zonas semiáridas de México, la agricultura de riego intensiva se caracteriza por una alta inversión de recursos para poder mantener un aceptable margen de producción, competitividad y calidad de los productos generados. Con el propósito de valorar y asegurar en el largo plazo la integridad ecológica de los recursos naturales, durante las últimas dos décadas se ha puesto un mayor énfasis en el costo ambiental que esto representa, ya que en diversas zonas del planeta se registran problemas severos de contaminación. En todos los países el agua subterránea es una reserva importante de agua potable; sin embargo, en varias regiones del planeta este recurso hídrico está contaminado hasta el punto en que ya no reúne las condiciones establecidas en las normas actuales para su consumo humano (Ongley, 1997).

La superficie del territorio nacional es 2 millones de  $\text{km}^2$ , con una población de 103 millones de habitantes, donde la disponibilidad de agua *per cápita* es de  $4,547 \text{ m}^3$  habitante-año $^{-1}$  y la precipitación media anual es de  $771 \text{ mm año}^{-1}$ . El país cuenta además con 11 provincias hidrogeológicas, ubicadas como se muestra en la figura 1 (Chávez, 2006).

**Figura 1.** Provincias Hidrogeológicas de la República Mexicana.



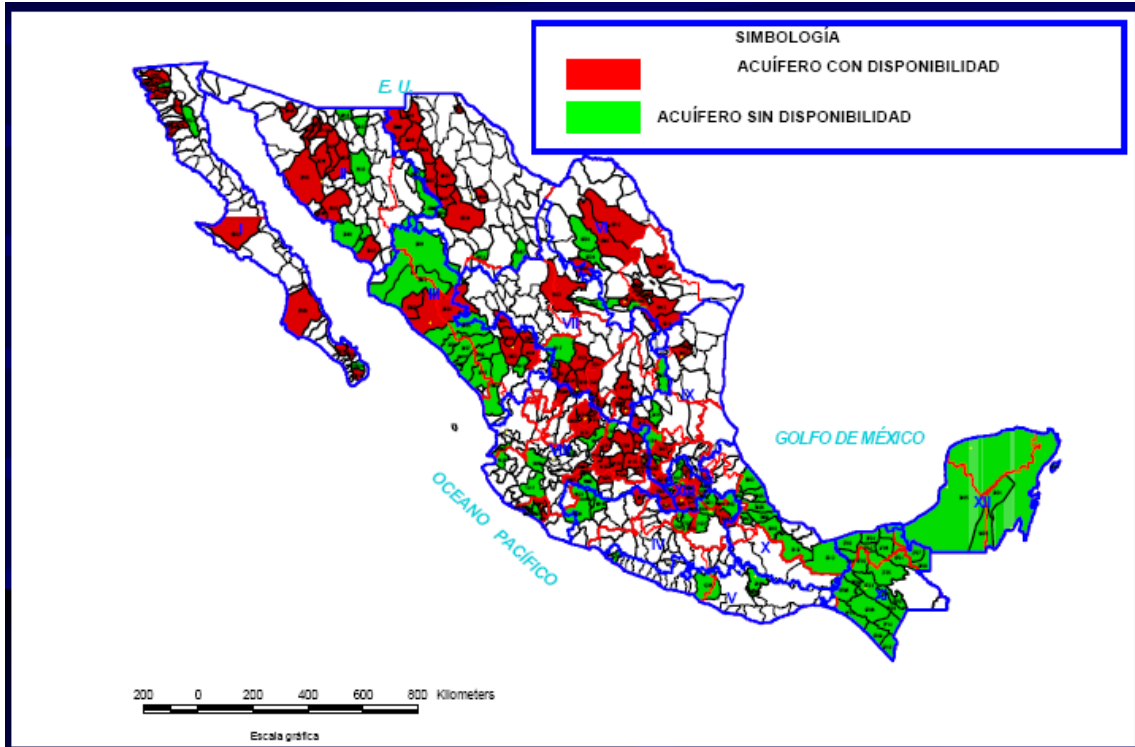
Fuente: CONAGUA, 2006.

En México, el uso de fertilizantes químicos se inició a principios del siglo pasado y la producción de los mismos en 1915 (Reyes, 1981). En los últimos 40 años, el consumo de fertilizantes N-P-K se ha incrementado de  $5 \times 10^4$  mg a más de  $5.5 \times 10^6$  mg. Sin embargo, el uso de este insumo no ha sido el más adecuado y se han presentado problemas de contaminación ambiental (Peña *et al.*, 2002). La utilización de fertilizantes sólidos es mayor que el uso de líquidos y gases (Fertilizantes Nacionales, 1994); estas últimas fuentes se utilizan en zonas más tecnificadas, como el Bajío-Guanajuato, valle de Sinaloa y valle del Yaqui-Sonora. Los 4 estados de la República con mayor consumo de fertilizantes son Sinaloa, Guanajuato, Jalisco y Veracruz (Herrera, 2002).

El uso del agua subterránea en México es de vital importancia, pues del subsuelo, la única fuente permanente en 50% del territorio nacional, se abastecen los sectores urbano, industrial y rural, aun en las regiones lluviosas, sustentando el riego de dos millones de hectáreas (un tercio de superficie total), suministra un 70% del agua requerida en ciudades (55 mh). Se extrae un total de  $\pm 28\,000\,000\,000$  mm<sup>3</sup> de agua, representando el 100%, de la cual el 3% se destina al uso doméstico y abrevadero, el

6% al sector industrial, 20% al público urbano y el 71% restante al uso agrícola (Chávez, 2006).

**Figura 2.** Acuíferos Disponibles y no Disponibles en la República Mexicana.



Fuente: CONAGUA, 2006.

A la fecha la Comisión Nacional del Agua ha publicado en el Diario Oficial de la Federación, la disponibilidad de agua de 202 de los acuíferos más importantes a los que corresponde cerca del 85% del agua subterránea extraída a nivel nacional (Chávez, 2006). En México sólo se conocen los volúmenes disponibles de 153 acuíferos; hay intrusión salina en 18 de ellos y las políticas son inadecuadas en cuanto al manejo de residuos peligrosos (Cabanillas, 2003).

En el caso del Distrito Federal, 1,366 pozos captan agua de los acuíferos del Valle de México y de la cuenca del Lerma, aportando 85% del total consumido en la capital mexicana. Los del Valle de México contribuyen con  $28 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$  y los del Lerma con  $10.5 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ . Se ha incorporado al abastecimiento metropolitano el agua de la cuenca del Cutzamala, con lo cual el abastecimiento total a la zona metropolitana se estima en  $60 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ , volumen que no alcanza a satisfacer las necesidades metropolitanas, agrícolas e industriales de la zona. La población de la zona metropolitana de la ciudad



de México supera los 18 millones de habitantes, lo cual implica, suponiendo un consumo mínimo de 200 lt persona-día<sup>-1</sup>, que el actual suministro es insuficiente aun para cubrir las necesidades de abastecimiento domiciliario. Por otra parte, el ritmo de extracción supera ampliamente el de recarga (Fernández, 2007).

En México se ha detectado la presencia de diversos contaminantes en los acuíferos, donde destaca básicamente el problema de arsénico y nitratos. Estudios relacionados con excesos de nitratos en el agua subterránea del sector rural para el estado de Yucatán son señalados por Pacheco (1992), donde las concentraciones varían desde cero hasta 223 mg lt<sup>-1</sup>, con un promedio y desviación estándar de 60 ± 46 mg lt<sup>-1</sup>. Estas concentraciones son superiores al LMP establecido para consumo potable que es 10 mg lt<sup>-1</sup> (Heredia, 2000; Arciniega y Palomo, 1998).

Para la Comarca Lagunera se presentan muy altas concentraciones de nitratos de acuerdo con Castellanos (1989), donde destaca un rango de 0.06 a 207 mg lt<sup>-1</sup>, con un promedio de 23 mg lt<sup>-1</sup>, así también se identifican las áreas de mayor vulnerabilidad espacial por la alta concentración de nitratos localizadas en El Colorado, El Polvo y Salamanca del municipio de Villa Juárez y que exceden los 200 mg lt<sup>-1</sup> (Martínez *et al.*, 2005). Estudios complementarios a este problema permiten definir áreas potenciales de contaminación, debido al volumen de nitrógeno excretado por el ganado bovino, dada la importancia que registra la cuenca lechera de la Comarca Lagunera y donde los municipios Lerdo, Gómez Palacio, Matamoros y Torreón registran los mayores niveles de nitrógeno excretado (Martínez *et al.*, 2005a).

### **Normatividad para Control de Nitratos en Agua Subterránea**

En materia de regulación, los biosólidos son los únicos que reciben supervisión para su aprovechamiento, aunque la norma establece los límites máximos permisibles (LMP) para metales pesados y no especifica las dosis de nitrógeno que deben aplicarse al suelo (Figuroa *et al.*, 2003). A este respecto Figuroa *et al.*, (2006) justifica plenamente la necesidad de regular las dosis de fertilizantes utilizados en el sector agrícola, toda vez que se presentan riesgos de contaminación al acuífero.

La Comisión Nacional del Agua informa que sólo 10 por ciento del agua superficial cumple con las normas oficiales para que pueda ser utilizada sin tratamiento alguno (Cabanillas, 2003).

En México se cuenta con las normas siguientes para los fines tratados en el presente trabajo:

Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Donde algunos de los límites permisibles son:

Cloruros  $250 \text{ mg lt}^{-1}$

Nitratos  $10 \text{ mg lt}^{-1}$

pH 6.5 – 8.5

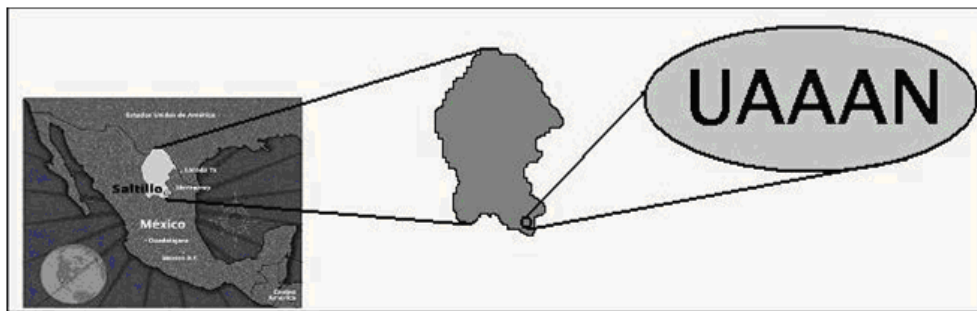
Sulfatos  $400 \text{ mg lt}^{-1}$

## MATERIALES Y METODOS

La presente investigación se llevó a cabo durante el mes de julio de 2006, dentro del Área Experimental del Departamento de Ciencias del Suelo, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, en las coordenadas 25° 23' 42" Latitud Norte y 101° 50' 57" Longitud Oeste, y con una altura media sobre el nivel del mar de 1742 metros.

El suelo utilizado proviene de la región Navidad, municipio de Galeana, Nuevo León, que se localiza en las coordenadas geográficas 25° 21' 23" Latitud Norte y 100° 21' 26" Longitud Oeste, a una altitud aproximada de 1700 metros sobre el nivel del mar.

**Figura 3.** Ubicación del sitio experimental



**Figura 4.** Ubicación del sitio donde procede el suelo en estudio



### Características del Sitio Experimental

De acuerdo con la clasificación de Koppen modificada por García (1973), la UAAAN se encuentra dentro de la clasificación del tipo  $B_{S1}Kx^1$  que corresponde a clima seco,

semiseco templado con lluvias escasas durante todo el año, con mas de 18% de precipitación invernal, con respecto al anual total de 350 – 500 mm.

La región de Navidad, municipio de Galeana, Nuevo León, de acuerdo con la clasificación de Koppen modificada por García (1973), corresponde al tipo BS<sub>1</sub>Kx(e'), lo cual indica, clima seco, templado, muy extremo, con lluvias todo el año, Mendoza (1983) menciona que la temperatura promedio anual es de 14.3 °C, con máximas extremas de 40 °C y mínimas de -15 °C en el mes de enero.

La precipitación media anual es de 516 mm distribuidos entre los meses de abril a octubre donde ocurre el 79% del total anual. La evaporación media anual es de 1,116.7 mm, siendo el mes de agosto el de mayor evaporación.

Los suelos se caracterizan por ser de textura migajón limoso, profundos, localizados en valles a extensas llanuras. Poseen bajo contenido de materia orgánica, pH medianamente alcalino. Medianamente ricos en fósforo asimilable y extremadamente ricos en potasio intercambiable, sin embargo son pobres en nitrógeno.

## **Materiales utilizados**

### **Suelo**

Se trabajo con suelo proveniente de la región Navidad municipio de Galeana, Nuevo León, presentando las siguientes características:

|                                    |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Clase Textural                     | Migajón Arenoso             |
| Densidad Aparente                  | 0.9795 g cc <sup>-1</sup>   |
| Densidad de Sólidos                | 2.27 g cc <sup>-1</sup>     |
| pH                                 | 8.2                         |
| Materia Orgánica                   | 2.38%                       |
| Conductividad Eléctrica            | 2.94 mmhos cm <sup>-1</sup> |
| Capacidad de Intercambio Catiónico | 0.24 meg 100g <sup>-1</sup> |
| Capacidad de Campo                 | 32.37                       |
| Punto de Marchites Permanente      | 17.59                       |

## **Zeolita**

Un aluminosilicato con cavidades de dimensiones moleculares de 3 a 10 angstrom. Se constituye de aluminio, silicio, hidrógeno y oxígeno y un número variable de iones grandes y moléculas de agua con libertad de movimiento que permiten el intercambio iónico. Su estructura cristalina está formada por tetraedros que se reúnen dando lugar a una red tridimensional, en la que cada oxígeno es compartido por dos átomos de silicio, formando así parte de los minerales tectosilicatos. Debido a sus poros altamente cristalinos, se considera un tamiz molecular, de modo que al paso del agua, las moléculas más pequeñas se quedan y las más grandes siguen su curso, lo cual permite que salga un líquido más limpio y cristalino.

## **Ácidos húmicos H-85.**

Al 85% de alta concentración y suspendibilidad. Son moléculas complejas orgánicas, se derivan del mineral leonardita, una forma oxidada de lignito, y son los constituyentes principales de materia orgánica vegetal en un estado avanzado de descomposición. En el suelo presentan la capacidad de retener agua, y facilitan la adición de materia orgánica.

## **Fertigro N**

Fertilizante líquido orgánico, de la empresa COSMOCEL, su concentración es de 30.2% de nitrógeno. Contiene 73% de humus, el pH es de 6.5 y densidad de 1.21 gr cc<sup>-1</sup>

## **Nitrato de Amonio (NO<sub>3</sub> NH<sub>4</sub>)**

Fertilizante sólido, granulado, es una sal neutra de color blanco cremoso, altamente higroscópico (20 °C = 33.1; a 30 °C = 40.6 y a 40 °C = 47.5), su concentración es de 33.5% de N (50% amoniacal y 50% nítrico), es muy soluble en agua. Tiene residualidad ácida, con un índice de 60, y la más alta residualidad salina de todos los fertilizantes nitrogenados, el índice de salinidad es de 105. Densidad aparente: 1.1 más o menos (94 litros por 100 Kg.). Solubilidad: A 20 °C, en 100 litros de agua pueden disolverse 192.3 kg de nitrato amónico.

### **Columnas de Suelo**

En Material PVC de 3" de diámetro, peso de suelo: 7.36 kg, a 40 cm de altura. Dichas columnas se colocaron sobre columnas de grava y dentro de recipientes contenedores para obtener los lixiviados.

### **Columnas de grava**

Se colocaron en la base de las columnas de suelo, forradas con tela de tul (muy porosa), y se sujetaron con alambre.

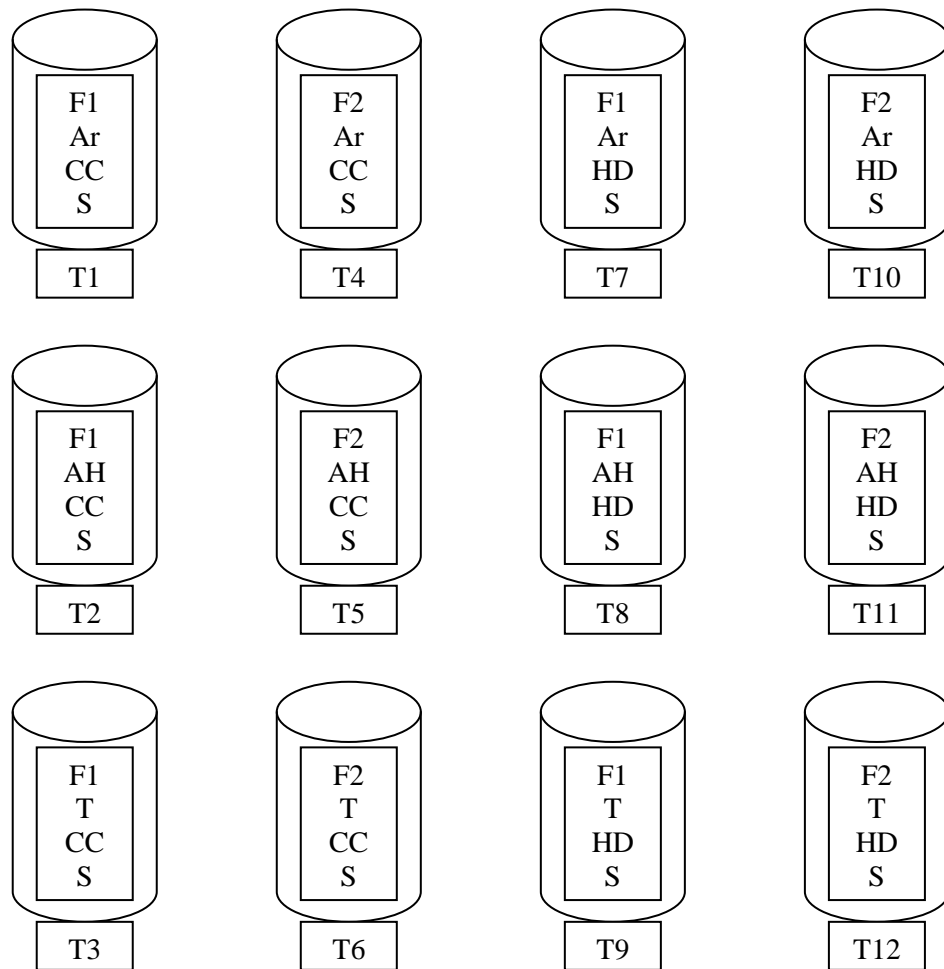
### **Agua destilada**

Con pH = 7.0 y conductividad eléctrica = 0.00 ms cc<sup>-1</sup>, el motivo por el cual se utilizó este tipo de agua es para no influir en la cantidad de sales e impurezas y obtener resultados confiables.

### **Caracterización de las Unidades Experimentales**

Se trabajo con 12 unidades experimentales y 3 repeticiones dando un total de 36 unidades experimentales, distribuidas como se muestra en la figura 5.

**Figura 5.** Distribución de las unidades experimentales



Donde

F1 = Nitrato de Amonio (sólido)

9.257 gr en CC y 4.218 gr en HD

F2 = Fertigro N (líquido)

9.96 ml en CC y 4.54 ml en HD

Ar = Zeolita

8 gr

AH = Ácidos húmicos H-85

0.8 gr

CC = Capacidad de campo

HD = Humedad disponible

S = Suelo

7.36 kg

T = Testigo

**Cuadro 3.** Descripción de solución y dosis de fertilizantes utilizados.

| <b>Total Nitratos<br/>(mg kg<sup>-1</sup>)</b> | <b>Condición</b>   | <b>Producto</b>   | <b>Cantidad de<br/>Fertilizante</b> |
|--|--------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 600  | Capacidad de Campo | Nitrato de Amonio | 404.43 kg                           |
| 600  | Humedad Disponible | Nitrato de Amonio | 404.43 kg                           |
| 600  | Capacidad de Campo | Fertigro N        | 448.62 lt                           |
| 600  | Humedad Disponible | Fertigro N        | 448.62 lt                           |

**Descripción de Tratamientos**

El cuadro 4 muestra en que consiste cada uno de los tratamientos utilizados.

**Cuadro 4.** Descripción de los tratamientos

| <b>Tratamiento</b> | <b>Descripción</b>   |
|--------------------|--|
| T1                 | 9.257 gr de Nitrato de Amonio + 8 gr zeolita + 7.36 kg suelo; bajo condiciones de capacidad de campo.          |
| T2                 | 9.257 gr de Nitrato de Amonio + 0.8 gr ácidos húmicos +7.36 kg suelo; bajo condiciones de capacidad de campo.  |
| T3                 | 9.257 gr de Nitrato de Amonio + 7.36 kg suelo; bajo condiciones de capacidad de campo.                         |
| T4                 | 9.96 ml de Fertigro N + 8 gr zeolita + 7.36 kg suelo; bajo condiciones de capacidad de campo.                  |
| T5                 | 9.96 ml de Fertigro N + 0.8 gr ácidos húmicos + 7.36 kg suelo; bajo condiciones de capacidad de campo.         |
| T6                 | 9.96 ml de Fertigro N + 7.36 kg suelo; bajo condiciones de capacidad de campo.                                 |
| T7                 | 4.218 gr de Nitrato de Amonio + 8 gr zeolita + 7.36 kg suelo; bajo condiciones de humedad disponible.          |
| T8                 | 4.218 gr de Nitrato de Amonio + 0.8 gr ácidos húmicos + 7.36 kg suelo; bajo condiciones de humedad disponible. |
| T9                 | 4.218 gr de Nitrato de Amonio + 7.36 kg suelo; condiciones de humedad disponible.                              |
| T10                | 4.54 ml de Fertigro N + 8 gr zeolita + 7.36 kg suelo; bajo condiciones   |



---

|     |  |
|-----|--|
|     | de humedad disponible.   |
| T11 | 4.54 ml de Fertigro N + 0.8 gr ácidos húmicos + 7.36 kg suelo; bajo condiciones de humedad disponible. |
| T12 | 4.54 ml de Fertigro N + 7.36 kg suelo; bajo condiciones de humedad disponible.                         |

---

### **Diseño Experimental**

Se utilizó el Diseño Experimental Completamente al Azar con Arreglo Factorial 2x2x3x3.

El diseño completamente al azar es un diseño en el cual los tratamientos son asignados completamente al azar a las unidades experimentales o viceversa. Este diseño es usado ampliamente.

### **Características principales**

1. Aplicable sólo cuando las unidades experimentales son homogéneas (verificar si existe tal homogeneidad).
2. Los tratamientos pueden tener igual o diferente número de unidades experimentales.
3. La distribución de los tratamientos es al azar en las unidades experimentales.

El número de tratamientos esta en función del número de unidades experimentales que se dispone. Es conveniente tener pocos tratamientos y más unidades experimentales que muchos tratamientos con pocas unidades experimentales.

Cada tratamiento ( $i=1,\dots,t$ ), dispone de un número de unidades igual a  $r_i$ , cada unidad experimental es una repetición y el valor observado en la u.e. es  $Y_{ij}$ .

Cada observación es expresada en términos de una ecuación según el modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij}$$

Corresponde al modelo del diseño experimental y es una expresión aditivo lineal del valor observado  $Y_{ij}$  como la suma de tres elementos:

$\mu$  = Factor constante (parámetro).

$\tau_i$  = Efecto del tratamiento (parámetro) en la unidad experimental.

$e_{ij}$  = Error, valor de la variable aleatoria Error experimental.

Cada observación es expresada de la misma forma; el conjunto de ecuaciones constituye el modelo, son "r." ecuaciones.

El modelo lineal general para el diseño completamente al azar es entonces:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij} \quad \begin{array}{l} i=1,2,\dots, t \\ j=1,2,\dots, r_i \end{array}$$

La descripción de este modelo se complementa con los supuestos de los efectos de tratamiento según:

1)  $\sum r_i \tau_i = 0$ .

2) Los  $E_{ij}$  están distribuidos normal e independiente con media cero y varianza  $\sigma^2_{\epsilon}$ .

Cuando el Investigador fija los tratamientos en estudio y se interesa en los resultados de estos tratamientos, el modelo se denomina de efectos fijos, conocido como modelo I (Montgomery, 1990).

Los factoriales son combinaciones para formar tratamientos, los cuales se aplican en los diseños experimentales (DCA, DBCA, DCL). La información obtenida de estos experimentos es amplia, ya que permiten comparar los niveles de cada factor entre si y evaluar las interacciones que resulten como combinaciones de los factores, así como la comparación de niveles de un factor bajo un nivel de otro factor (Snedecor, 1994).

En un experimento con factoriales, si todos los niveles de un factor se combinan con todos los niveles de otro factor, entonces se dice que estos factores están cruzados. Si los niveles de un factor se combinan con ciertos niveles de otro factor se dice que estos factores están anidados.

**Factor.** Es sinónimo de tratamiento e involucra diferentes niveles. Por ejemplo el Nitrógeno en la formación del abono, este puede contener diferentes porcentajes, cada uno constituye un nivel que también representa un tratamiento.

**Factorial.** Es una combinación de factores para formar tratamientos.

**Nivel.** Es la dosis o cantidad del ingrediente (Factor) empleado en el tratamiento.

**Efecto Principal.** Es el efecto promedio del factor sobre los otros niveles del mismo factor independiente de los otros factores.

**Efecto Interacción.** Es el efecto adicional debido a la influencia combinada de dos o más factores.

**Efecto Simple.** Es el efecto de los niveles del factor en un nivel de otro factor.

**Efecto Simple.** Es el efecto de los niveles del factor a una combinación de los otros factores (Snedecor, 1994).

## **Tipos de Factores**

**Factores Cuantitativos.** Si sus niveles son cantidades cuantificables.

**Factores Cualitativos.** Si sus niveles no tienen orden natural y corresponden a clases o categorías.

Los factoriales son expresados mediante la siguiente notación:

$2A2B = 2 \times 2 = 2^2$ :                      2 niveles de A por 2 niveles de B.

$2A3B = 2 \times 3$ :                              2 niveles de A por 3 niveles de B.

$2A2B2C = 2 \times 2 \times 2 = 2^3$ :              3 factores a 2 niveles cada uno.

$2A3B3C = 2 \times 3^2$ :                        2 niveles de A por 3 niveles de B y 3 niveles de C.

## **Formación de Factoriales**

En la formación de factoriales, se debe tener presente lo siguiente:

- 1.- Que factores deben incluirse.
- 2.- Que factores son fijos (modelo I) y que factores son al Azar (modelo II).
- 3.- Cuantos niveles por factor
- 4.- Si son factores cuantitativos, cual debe ser el espaciado entre los niveles del factor.

Walpole y Myers (1990) mencionan las ventajas y desventajas de los Experimentos con Factoriales.

## **Ventajas en Experimentos con Factoriales**

Los experimentos con factoriales tienen las siguientes ventajas:

1. Permiten el estudio de los niveles de cada factor y las interacciones entre ellos.
2. Permiten el estudio de los niveles de un factor en la combinación de un solo nivel de otro factor (estudio de efectos simples).
3. Todas las unidades experimentales intervienen en el estudio de todos los efectos del factor (principales e interacción),

## **Desventajas en Experimentos con Factoriales**

1. El número de unidades experimentales utilizadas es mayor que en experimentos simples y es más difícil contar con un número suficiente de unidades que requiere el experimento.
2. El análisis se complica, a medida que el número de factores y niveles aumenta.
3. Algunas combinaciones pueda que no sean de importancia, pero deben incluirse para completar el factorial, esto obliga a usar mas unidades experimentales.

## **Análisis Estadístico de los Factoriales**

Los factoriales son los tratamientos en los diseños experimentales, esto significa que la fuente de variación debida al efecto de tratamientos comprende los efectos derivados de la combinación de los factores. Así, por ejemplo:

Factor A, con 3 niveles, factor B con 2 niveles. El numero de tratamientos son  $3 \times 2 = 6$ , con grados de libertad igual a  $(6-1) = 5$ .

Esta fuente (tratamientos) esta descompuesta en:

Efecto de A con  $(3-1) = 2$  gl.

Efecto de B con  $(2-1) = 1$  gl.

Efecto de AB con  $(3-1)(2-1) = 2$  gl.

La suma de los grados de libertad  $2+1+2 = 5$ , es igual a los gl. de tratamientos.

La descomposición es ortogonal, esto significa que los tratamientos deben tener igual numero de repeticiones, de lo contrario no será posible descomponer en forma ortogonal la suma de cuadrados de tratamientos. La suma de cuadrados de tratamiento cumple la siguiente relación:

$$SC(\text{Tratamientos}) = SC(A) + SC(B) + SC(AB)$$

En el caso de tres factores combinados (A, B y C), por ejemplo, 2 niveles de A, 3 niveles de B y 2 niveles de C resulta:

$2 \times 3 \times 2 = 12$  tratamientos, los gl. para tratamientos es 11

Las fuentes de variación deducidas son:

De lo efectos principales:

A con  $(2-1) = 1$  gl.

B  $(3-1) = 2$  gl.

C  $(2-1) = 1$  gl.

De los efectos de la interacción:

AB  $(2-1)(3-1) = 2$  gl.

AC  $(2-1)(2-1) = 1$  gl.

BC  $(3-1)(2-1) = 2$  gl.

De los efectos de Doble interacción:

ABC  $(2-1)(3-1)(2-1) = 2$  gl.

La suma de grados de libertad son:  $1+2+1+2+1+2+2 = 11$ ; que son los correspondientes grados de libertad de tratamientos.

y  $SC(\text{tratamientos}) = SC(A)+SC(B)+SC(C)+SC(AB)+SC(AC)+SC(BC) +SC(ABC)$

Los cuadrados medios de estas fuentes se obtienen dividiendo la suma de cuadrados entre los grados de libertad, y para la prueba de F, se divide cada CM con el CM del error, solo cuando se tiene factores aleatorios o anidados, es necesario hallar los esperados cuadrados medios (Snedecor, 1994).

### **Parámetros de Evaluación**

Los parámetros que se evaluaron para determinar el grado de contaminación de suelo y agua, son los mencionados en los Cuadros 5 y 6.

**Cuadro 5.** Parámetros de Evaluación en Agua, metodología y lugar donde se realizó el Análisis

| <b>Parámetro de Evaluación</b> | <b>Metodología</b>                           | <b>Lugar</b>  |
|--------------------------------|--|---|
| Nitratos                       | Método espectométrico ultravioleta selectivo | A & L Southern Agricultural Laboratories, Inc., Florida, EUA. |
| Cloruros                       | Método de Mohr                               | A & L Southern Agricultural Laboratories, Inc., Florida, EUA. |
| Sulfatos                       | Espectroscopía visible                       | A & L Southern Agricultural Laboratories, Inc., Florida, EUA. |
| Carbonatos                     | Método Nitrato de Mercurio                   | A & L Southern Agricultural Laboratories, Inc., Florida, EUA. |
| Bicarbonatos                   | Método 2320 B - 1995                         | A & L Southern Agricultural Laboratories, Inc., Florida, EUA. |

**Cuadro 6.** Parámetros de Evaluación en Suelo, metodología y lugar donde se realizó el Análisis

| <b>Parámetro de Evaluación</b> | <b>Metodología</b>               | <b>Lugar</b>   |
|--------------------------------|----------------------------------|--|
| pH                             | En Potenciómetro Hanna           | Laboratorio de Física de Suelos del Departamento de Ciencias del Suelo |
| Conductividad Eléctrica        | En Conductivímetro Hanna HI 9033 | Laboratorio de Física de Suelos del Departamento de Ciencias del Suelo |

### **Cronología del Experimento**

La realización del presente experimento se llevo a cabo en tres etapas:

#### **Planeación**

En el mes de Junio de 2006, se diseño la planeación del experimento antes de establecer en campo, realizando los cálculos correspondientes; cantidad de suelo, arcilla, ácidos

húmicos, agua y dosis de fertilizantes, además de establecer el número de tratamientos, unidades experimentales y repeticiones necesarias. De acuerdo a las características del experimento se tomo la decisión de trabajar con el diseño experimental Completamente al Azar con Arreglo Factorial 2x2x3x3.

### **Trabajo de Campo**

Una vez planeado el experimento se procedió a instalar el material de trabajo en el Área de Investigación, se colocaron las columnas de material PVC, (3" de diámetro) en recipientes de plástico con una columna de grava en la base la cual se cubrió con tela de tul, con la finalidad de coleccionar los lixiviados en el recipiente. Se agregó el suelo y los tratamientos anteriormente descritos.

### **Análisis**

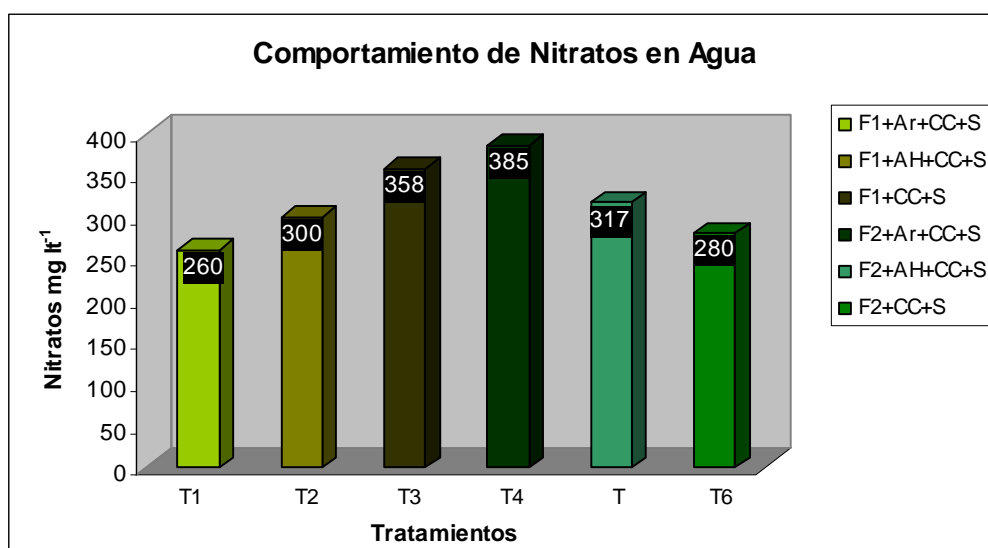
Finalmente se realizaron los análisis de suelo y agua (lixiviados), en el Laboratorio de Física de Suelos del Departamento de Ciencias del Suelo y en A & L Southern Agricultural Laboratories, Inc., Florida, EUA, respectivamente como se muestra con anterioridad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados en Agua

La cantidad de agua drenada en los tratamientos bajo condiciones de humedad disponible no fue suficiente. Por lo anterior, los análisis de agua solo se realizaron en seis tratamientos, específicamente los que se trabajaron a capacidad de campo, razón por la cual no fue posible analizarlos estadísticamente, sin embargo se compararon los resultados de manera grafica, para las variables: Nitratos, Sulfatos, Cloruros, Bicarbonatos, Conductividad Eléctrica y pH.

**Gráfica 1.** Análisis de Nitratos en agua, en los seis tratamientos



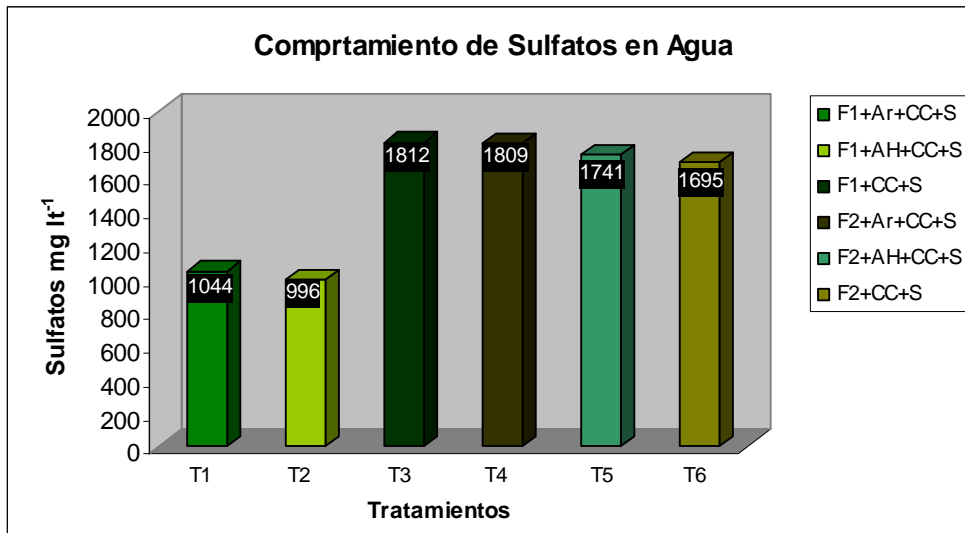
La figura 6 muestra la concentración de nitratos en agua, donde el tratamiento 4 con la combinación de fertilizante orgánico y arcilla, arroja el valor mas alto, dando un total de 385 mg lt<sup>-1</sup> de nitratos, seguido por el tratamiento 3, que representa al testigo donde se aplico únicamente el fertilizante químico, presentando 358 mg lt<sup>-1</sup> de nitratos. El tratamiento que presenta menor cantidad de nitratos en agua es T1 con 260 mg lt<sup>-1</sup>, en este se utilizó fertilizante químico, y arcilla. T2 y T5 muestran valores de 300 y 317 mg lt<sup>-1</sup> respectivamente. Sin embargo todos los resultados rebasan en más del 250% el límite permisible, el cual es de 10 mg lt<sup>-1</sup>.

Para la variable sulfatos, se observa en la figura 7, que a excepción de T1 y T2, la presencia de ellos es muy alta, con valores mayores a 1650 mg lt<sup>-1</sup>.

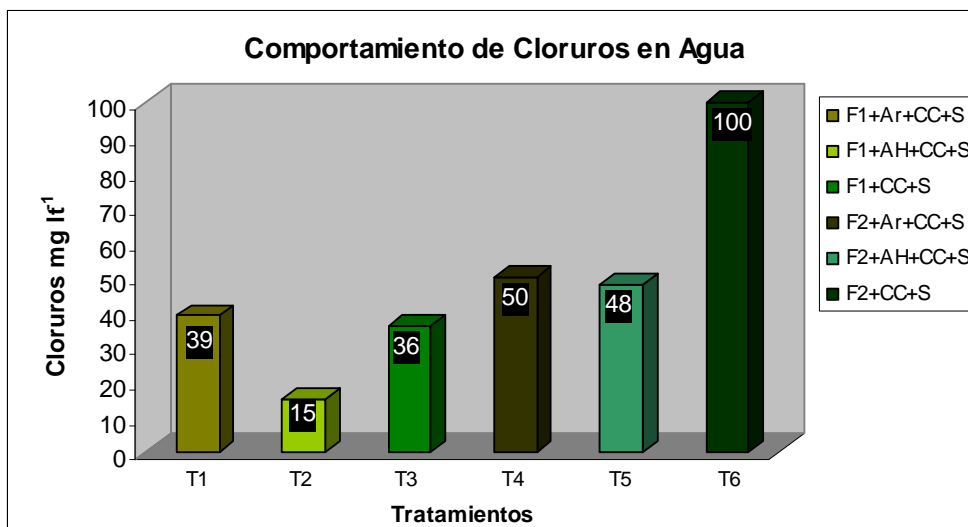


Sin embargo, tanto T1 como T2 presentan muy altas cantidades de sulfatos en agua, el primero 1044 mg lt<sup>-1</sup> y el segundo 996 mg lt<sup>-1</sup> siendo este el mas bajo entre todos. Los tratamientos restantes arrojan valores desde 1695 hasta 1812 mg lt<sup>-1</sup> de sulfatos, cantidades exageradamente altas, pues todos los tratamientos rebasan 400 mg lt<sup>-1</sup>, que es el límite permisible según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

**Gráfica 2.** Comparación de contenido de Sulfatos en Agua, para los seis tratamientos.



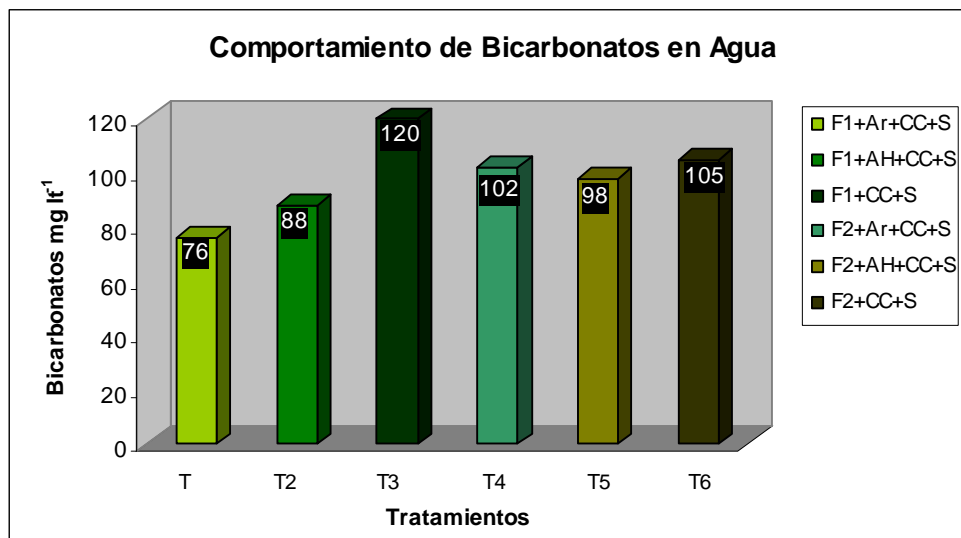
**Gráfica 3.** Resultados obtenidos para la variable Cloruros en Agua, en seis tratamientos.



Como se aprecia en la figura 8, la diferencia entre cantidad de cloruros presentes varía entre los seis tratamientos siendo T6 donde se encontró mayor cantidad; 100 mg lt<sup>-1</sup>, que

comparado con T2 existe una diferencia de 85 ppm. Para T1, T3, T4 y T5 el comportamiento es similar, presentando un rango de 36 a 50 mg lt<sup>-1</sup> de cloruros en agua. La norma establece como limite permisible de cloruros 250 mg lt<sup>-1</sup> por lo tanto los resultados de los seis tratamientos cumplen lo establecido.

**Gráfica 4.** Presencia de Bicarbonatos en los seis tratamientos.

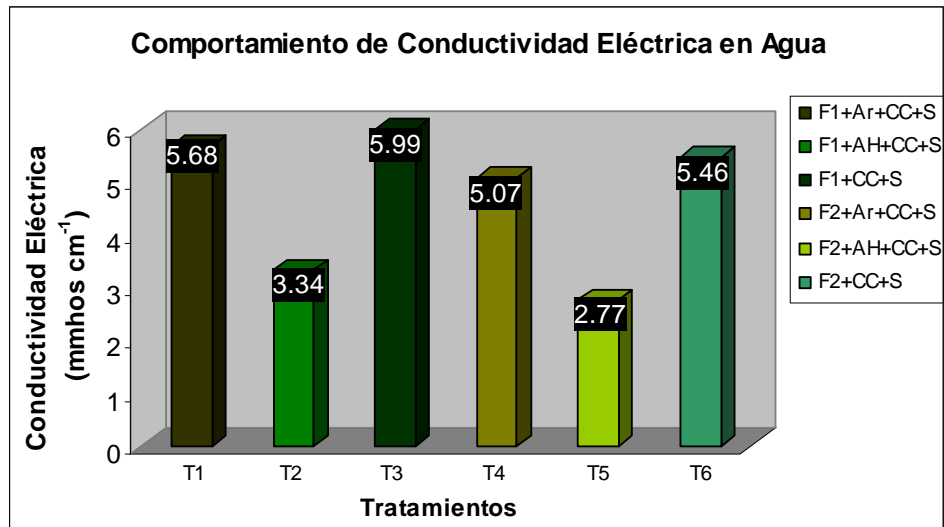


El tratamiento 3 compuesto por fertilizante químico, es el que presenta mayor cantidad de Bicarbonatos, 120 mg lt<sup>-1</sup> seguido por T6 compuesto por fertilizante orgánico, con una diferencia de 15 mg lt<sup>-1</sup>. T1 muestra menor presencia de Bicarbonatos en agua. T4, T5 y T6 presentan un comportamiento similar con 102, 98 y 105 mg lt<sup>-1</sup> respectivamente. Lo anterior se muestra en la figura 9. Cabe mencionar que esta variable no esta considerada dentro de las normas mexicanas.

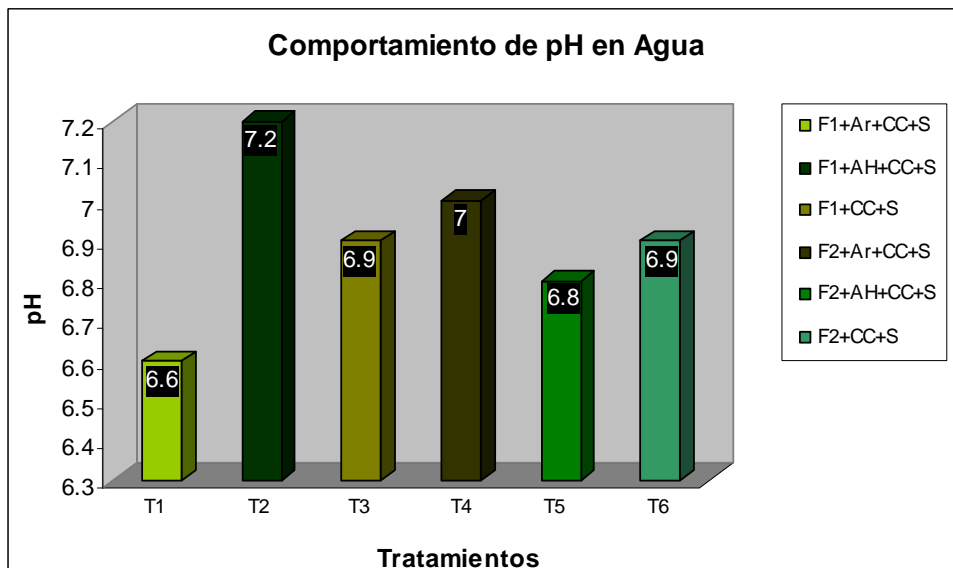
La figura 10 muestra los resultados obtenidos para la variable Conductividad Eléctrica, donde se observa que el mayor contenido de sales lo tiene T3 donde se utilizo fertilizante químico, y en T1 que consta de fertilizante químico y arcilla.

Si comparamos los tratamientos donde se utilizó fertilizante químico, con los tratamientos compuestos con fertilizante orgánico, el contenido de sales es mayor en los primeros. T1 contiene mas sales comparado con T4, al igual que T2 con T5 y T3 con T6.

**Gráfica 5.** Conductividad Eléctrica en Agua obtenida de los seis tratamientos.



**Gráfica 6.** Comparación entre resultados obtenidos de pH en agua, en seis tratamientos.



Los resultados obtenidos para la variable pH presentan mayor diferencias entre tratamientos, como la muestra la figura 11.

T2 muestra mayor alcalinidad, T4 alcanza la neutralidad, T3 y T6 (testigos) presentan pH de 6.9, mientras el resto muestra valores por debajo de los mencionados.

Esta variable al igual que Cloruros en agua, cumplen con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

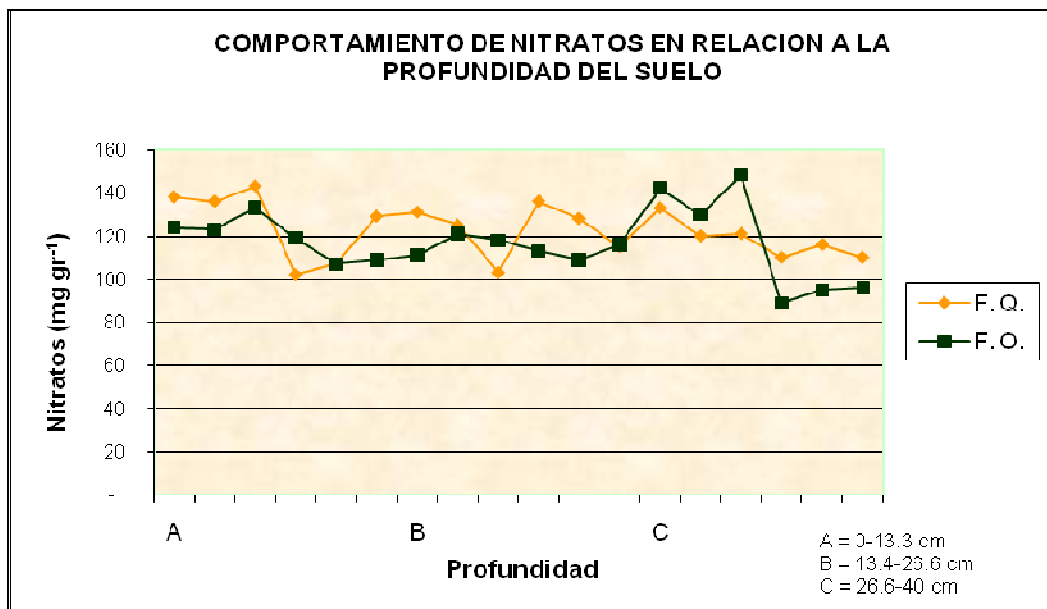
Los resultados para carbonatos son nulos por lo tanto no se realizó gráfica.

## Resultados en Suelo

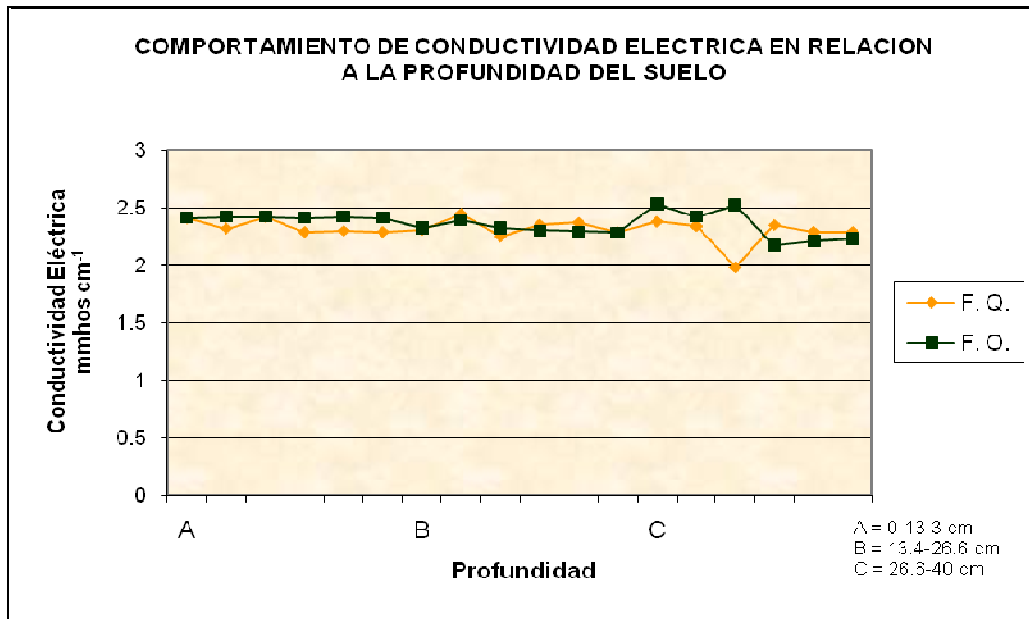
En las siguientes figuras se muestra el comportamiento de las variables: nitratos, conductividad eléctrica y pH, tomando a consideración el promedio de las tres repeticiones para cada tratamiento y horizonte.

La figura 12 muestra el comportamiento de la variable nitratos en los horizontes A, B y C, en relación a los dos tipos de fertilizantes utilizados. En el horizonte A se observa un comportamiento similar de los nitratos con los fertilizantes químico y orgánico aunque este último se encuentra en menor concentración, para el horizonte B la concentración de nitratos se distribuye de manera similar para ambos fertilizantes, sin embargo en el horizonte C la concentración recae en el fertilizante orgánico, no obstante, en comparación con el fertilizante químico la diferencia es mínima. Si comparamos el horizonte B con el horizonte A, éste contiene la mayor concentración de nitratos en ambos fertilizantes, contrario al horizonte C que muestra mas contenido de nitratos que los horizontes A y B. De lo anterior se deduce que por la clase textural del suelo la lixiviación es mayor por lo tanto los nitratos se acumulan en el horizonte C.

**Gráfica 7.** Comportamiento de la variable Nitratos, en tres profundidades del suelo.

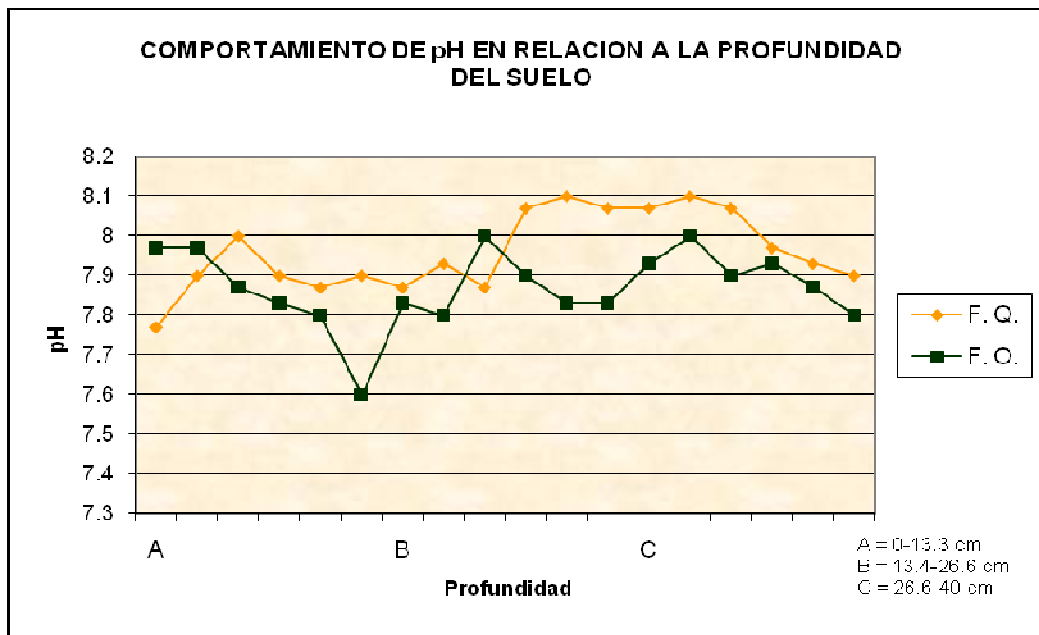


**Gráfica 8.** Comportamiento de la variable Conductividad Eléctrica, en tres profundidades del suelo.



En cuanto a Conductividad Eléctrica no se observan variaciones, en promedio se mantiene entre los 2 y 2.5 mmhos cm<sup>-1</sup> en los tres horizontes, para el horizonte A y B el comportamiento es similar tanto en horizontes como en ambos fertilizantes, a excepción del horizonte C que muestra ligera disminución con el fertilizante químico (Figura 13).

**Gráfica 9.** Comportamiento de la variable pH en tres profundidades del suelo.



En la figura 14 se observan las diferencias que existen en cuanto a la variable pH, en relación a la profundidad y tipo de fertilizante, para el comportamiento de ambos fertilizantes se observa un descenso mínimo en el pH del suelo, el nivel mas bajo es de 7.6. En el horizonte A el fertilizante orgánico provoca en el suelo un pH cercano al 8.0, mientras que con el fertilizante químico es menor a 7.8. El horizonte B muestra disminución de pH sobre todo con el fertilizante orgánico, a diferencia del horizonte C que muestra mayor tendencia a la alcalinidad en comparación con los horizontes A y B, principalmente por el fertilizante químico. Los resultados obtenidos coinciden con los de la figura 12, pues la concentración de sales produce alcalinidad en el suelo. Aunque ambos fertilizantes muestran alcalinidad al suelo, se observa que el fertilizante químico aumenta en mayor medida el pH, comparado con el fertilizante orgánico.

### **Análisis de Varianza**

Se realizaron Análisis de Varianza para las variables de Nitratos y Conductividad Eléctrica en suelo, arrojando lo siguiente:

#### Análisis de Varianza para la variable Nitratos - Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente                      | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|-----------------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| <b>EFFECTOS PRINCIPALES</b> |                   |    |                |            |         |
| A: Fertilizante             | 1653.13           | 1  | 1653.13        | 6.16       | 0.0156  |
| B: Humedad                  | 378.125           | 1  | 378.125        | 1.41       | 0.2394  |
| C: Mejoradores              | 127.194           | 2  | 63.5972        | 0.24       | 0.7896  |
| D: Profundidad              | 5868.03           | 2  | 2934.01        | 10.94      | 0.0001  |
| RESIDUOS                    | 17435.8           | 65 | 268.244        |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)           | 25462.3           | 71 |                |            |         |

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Se encuentran diferencias significativas para la variable Nitratos únicamente en relación a los mejoradores.

Análisis de Varianza para Conductividad Eléctrica - Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente                     | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|----------------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| <b>EFECTOS PRINCIPALES</b> |                   |    |                |            |         |
| A: Fertilizante            | 1.04401           | 1  | 1.04401        | 3.24       | 0.0765  |
| B: Humedad                 | 10.2831           | 1  | 10.2831        | 31.91      | 0.0000  |
| C: Mejoradores             | 0.149003          | 2  | 0.0745014      | 0.23       | 0.7942  |
| D: Profundidad             | 6.33525           | 2  | 3.16763        | 9.83       | 0.0002  |
| RESIDUOS                   | 20.9475           | 65 | 0.322269       |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)          | 38.7589           | 71 |                |            |         |

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Dentro de la variable Conductividad Eléctrica la diferencia significativa se encuentra en relación con los mejoradores.

## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

De acuerdo a los resultados obtenidos en los análisis de lixiviados, el agua drenada presentó un alto contenido de Nitratos y Sulfatos, a excepción de los Cloruros que se encuentran dentro de los límites permitidos por la norma NOM-127-SSA1-1994, y los bicarbonatos que no están reglamentados, sin embargo los Nitratos y Sulfatos se encuentran muy por encima de los límites establecidos en la misma norma, provocando con ello la contaminación del agua, originando una eutrofización, la alteración de las aguas subterráneas, y los riesgos que desencadenan en perjuicio de la actividad biótica incluyendo al hombre.

Cabe hacer hincapié que en la investigación realizada no se contempló el establecimiento de algún cultivo ya que interfiere en la absorción de los nutrientes que contienen los fertilizantes utilizados.

Para el caso del estudio realizado en el suelo, no se encuentran diferencias significativas que indiquen cual material fertilizante es el que contamina más, pues ambos materiales empleados muestran un comportamiento similar.

En relación al efecto de los fertilizantes sobre las propiedades del suelo la hipótesis contemplada para tal efecto se rechaza ya que no existen diferencias significativas, como se observa de en las gráficas 7, 8 y 9 donde se establece el comportamiento de ambos materiales fertilizantes siendo éste similar.

En relación a los resultados de los análisis de agua se acepta la hipótesis, y se sugiere continuar con dichas evaluaciones de éstos y otros materiales correlacionando el comportamiento químico de los fertilizantes orgánicos e inorgánicos y otros parámetros físicos como son la textura, contenidos de humedad, estructura, etc.



## LITERATURA CITADA

- Appelgren B. G. 1994. Agricultural and Environmental Legislation – Lithuania. TCP/LIT/2352, FAO, Rome.
- Arciniega A. A., y M. Palomo R. 1998. Concentración de Nitratos, Nitritos y Salinidad en Agua Potable del Valle de Juárez. Memorias XXIX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Tapachula, Chis. México. p. 62
- Bear F. E. 1969. Los Suelos en Relación con el Crecimiento de los Cultivos. 1ª edición. Editorial Omega, S. A. Barcelona España.
- Buckman H. O. y Brady N. C. 1985. Naturaleza y Propiedades de los Suelos. 3ª reimpresión. Editorial Hispano Americana, S. A. De C. V. México D. F.
- Cabanillas T. N. 2003. El Agua Subterránea y su Importancia. Asamblea General del IAP. México.
- Canter L. W. 1997. Nitrate in Groundwater. Lewis Publishers, Boca Raton Florida.
- Carrasco M. I. 2002. Nuevas Tecnologías en Fertilización para el Respeto del Medio Ambiente. Phytoma España. Artículo Núm. 135. España.
- Castellanos R. J. Z. 1989. La contaminación por nitratos en el acuífero de la Comarca Lagunera. Problemas de contaminación en México. Comisión Interinstitucional para el desarrollo e investigación sobre contaminación ambiental por plaguicidas. 3(16): 5-10, México.
- Chávez G. R. 2006. Disponibilidad del Agua Subterránea en México. Comisión Nacional del Agua. IV Foro Mundial del Agua. México, D. F.
- Directiva del Consejo 91/676/CEE de 12 de diciembre de 1991, Relativa a la Protección de las Aguas Contra la Contaminación Producida por Nitratos Utilizados en la Agricultura.

- Fernández M. L. 2007. Las Aguas Subterráneas en América Latina: El Caso de México. Centro Virtual de Información del Agua, Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A. C. México, D. F.
- Fertilizantes Nacionales (FERTINAL), 1994. Información General sobre la Producción de Fertilizantes NPK. México, DF.
- Figueroa V. U., M. Flores O., y M. Palomo R. 2003. Uso de Biosólidos en Suelos Agrícolas. Folleto técnico No. 3. INIFAP-Campo Experimental Valle de Juárez. 17 p.
- Figueroa V. U., Márquez R. J., Faz C. R., Cueto W. A., y Palomo G. A. 2006. Uso Eficiente de Estiércol como Fertilizante Orgánico en Cultivos Forrajeros. Memoria de la XVIII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. Venecia Durango México. 7-13 p.
- Flipse W. J., Katz B. G., Lindner J. B., Markel R. 1984. Sources of Nitrate in Ground Water in a Sewered Housing Development, Central Long Island, New York. Ground Water, Vol. 22. No. 4, pp 418-426
- Freeze R.A. y Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, Inc. pp. 367-389.
- García E. 1973. Modificación al Sistema Climático de Koppen (Para Adoptarlo a la República Mexicana). UNAM. México
- García I. y Dorronsoro F. C. F. 2007. Contaminación por Fertilizantes. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada España, Unidad Docente e Investigadora de la Facultad de Ciencia. España
- García R. M., García M. M. y Cañas P. R. 1994. Nitratos, Nitritos y Compuestos de N-nitroso. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. Serie Vigilancia 13. pp. 19-27

- Garcidueñas R. M. 1994. De la Vida de las Plantas y de los Hombres. 1ª reimpresión. Editorial Fondo de Cultura Económica S. A. de C. V. México D. F.
- Heaton T. 1985. Isotopic and Chemical Aspects of Nitrate in the Ground Water of the Springbook Falts. Water S. A. Vol 11. Núm 4 pp. 199-208.
- Hendry J. 1988. The Nitrate Problem. Water Well Journal. Vol. 42, Núm 8, pp. 4-5
- Heredía C. S. 2000. Calidad del Agua. Memorias Semana Internacional de Sanidad Agropecuaria. CONACOFI México, pp. 78-84
- Herrera N. 2002. Fertilizando la Crisis. Teorema Ambiental 2000 Agro. Artículo Núm 35. Editorial 3W México.
- Hurlburt S. 1988. Water Well Journal. Vol. 42 Num. 8, pp. 37-42
- Hussein Z. H. 1999. Rhizobium-Legume Symbiosis and Nitrogen Fixation Under Severe Conditions and in an Arid Climate. Microbial. Mol. Biol. Rev. 63:968-989.
- Instituto de Salud Pública y el Ambiente de Holanda (RIVM), 1992. The Environment in Europa. A Global Perspective. National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM). Netherlands.
- Lavado R. S. 2001. Aguas y Sustratos para la Producción Ornamental. Ediciones New Plan.
- Martínez R. J. G., M. Rivera G. y R. Faz C. 2005. Determinación Espacial de la Vulnerabilidad de un Acuífero a ser Contaminado por Nitratos. AGROFAZ 5 (3): 77-84
- Martínez R. J. G., M. Rivera G. y P. Andrade S. 2005a. Balance de Nutrientes como una Herramienta para Establecer Áreas Potenciales de Contaminación no Puntual. AGROFAZ 5 (3): 85-94

- Medina M. C. y P. Cano R. 2001. Contaminación por Nitratos en Agua, Suelo y Cultivos de la Comarca Lagunera. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas. 2(1): 9-14
- Mendoza H. 1983. Diagnostico Climático para las Zonas de Influencia Inmediata de la UAAAN. Departamento de Agrometeorología.
- Montgomery D. C. 1990. Diseño y Análisis de Experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica, México
- Muñoz H., M. Armenta A., A. Vera y N. Ceniceros. 2004. Nitrato en el Agua Subterránea del Valle de Huamantla Tlaxcala México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 20 (03):91-97
- Nolan B. T. 1999. Nitrate Behavior in Ground Waters of the Southeastern USA, Reston. J. Environ. Qual. 28: 1518-1527
- Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Ongley E. D. 1997. Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 55. Roma. p 41-58.
- Ordóñez R., González P., Giráldez J.V., 1997. Deterioro de la Calidad Nítrica de los Acuíferos de una Cuenca Agrícola en el Valle del Guadalquivir. XV Congreso Nacional de Riegos. 25-27 junio de 1997. Lleida.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 1991. Legislation and Measures for the Solving of Environmental Problems

- Resulting for Agricultural Practices. FAO/United Nations. Ginebra. Report No. 7
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2002. Los Fertilizantes y su Uso. 4ª edición. Editorial Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. Roma. ISBN 92-5-304414-4
- Organización Panamericana de la Salud (OPS) Organización Mundial de la Salud, (OMS). 1980. Nitratos, Nitritos y Compuestos de N-nitroso. Criterios de Salud Ambiental 5 pp 21-25
- Ortiz V. B., Ortiz S. C. A. 1990. Edafología. 7ª edición. Editorial Universidad Autónoma de Chapingo.
- Ostle B. 1974. Estadística Aplicada. Técnicas de la Estadística Moderna Cuando y Donde Aplicarlas. 4ª reimpresión. Editorial Limusa, México.
- Pacheco A. J. 1992. Nitratos en Agua Subterránea. Ciencia y desarrollo 17 (102):98-104
- Patrick R. 1974. Biological Surveys and Biological Monitoring in Fresh Waters. Cont. Dept. Limnol. Acad. Nat. Sci. Phil. 5. Philadelphia.
- Pauwels H., P. Lachassagne, P. Bordenave, C. Foucher J., and A. Martelat. 2001. Temporal Variability of Nitrate Concentration in a Schist Aquifer and Transfer to Surface Water. Appl. Geochemical 16:583-596
- Peña C. J. J., Grageda C. O. A., Vera N. J. A., 2002. Manejo de los Fertilizantes Nitrogenados en México: Uso de las Técnicas Isotópicas ( $^{15}\text{N}$ )
- Reyes C. P. 1981. Historia de la Agricultura. Información y Síntesis. AGT. México, DF.
- Rodier J. 1998. L'analyse Chimique et Physico-Chimique de l'eau. Dunod. Paris.

- Rodríguez S. F. 1982. Fertilizantes Nutrición Vegetal. A. G. T. Editor, S. A. México D. F.
- Seoáñez C. M. 1999. Ingeniería del Medio Ambiente Aplicada al Medio Natural Continental. 2º Edición, Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, Barcelona México.
- Snedecor G. W. 1994. Métodos Estadísticos Aplicados a la Investigación Agrícola y Biología. Editorial Continental México.
- Tamhane Motiramani, Bali, Donahue., 1986. Suelos su Química y Fertilidad en Zonas Tropicales. 4ª impresión. Editorial Diana, México D. F.
- Toledo M., Carabias J., Toledo C., González P. 1989. La Producción Rural en México: Alternativas Ecológicas. México D. F. Fundación Universo Veintiuno.
- Walpole R., Myers R. 1990. Probabilidad y Estadística. Editorial McGraw Hill, Mexico.
- Worthen and Aldrich. 1980. Suelos Agrícolas, su Conservación y Fertilización. 2ª edición. Editorial Hispano Americana S. A. de C. V. México D. F.
- Yañes V. C. 1993. Como Viven las Plantas. 4ª reimpresión. Editorial Fondo de Cultura Económica S. A. de C. V. México D. F.

## APÉNDICE

### Análisis de Varianza de la Variable Nitratos

| Source of variation level | Sum of Squares | d.f. | Mean square | F-ratio | Sig.   |
|---------------------------|----------------|------|-------------|---------|--------|
| <b>MAIN EFFECTS</b>       |                |      |             |         |        |
| A:TESIS.HUM               | 378.1250       | 1    | 378.1250    | 1.333   | 0.2560 |
| B:TESIS.FER               | 1653.1250      | 1    | 1653.1250   | 5.826   | 0.0210 |
| C:TESIS.MEJ               | 127.1944       | 2    | 63.5972     | 0.224   | 0.8003 |
| D:TESIS.PROF              | 5868.0278      | 2    | 2934.0139   | 10.340  | 0.0003 |
| <b>INTERACTIONS</b>       |                |      |             |         |        |
| AB                        | 159.0139       | 1    | 159.01389   | 0.560   | 0.4669 |
| AC                        | 235.0833       | 2    | 117.54167   | 0.414   | 0.6640 |
| AD                        | 463.0833       | 2    | 231.54167   | 0.816   | 0.4502 |
| BC                        | 647.5833       | 2    | 323.79167   | 1.141   | 0.3308 |
| BD                        | 847.5833       | 2    | 423.79167   | 1.493   | 0.2382 |
| CD                        | 1302.2222      | 4    | 325.55556   | 1.147   | 0.3501 |
| ABC                       | 673.0278       | 2    | 336.51389   | 1.186   | 0.3171 |
| ABD                       | 63.5278        | 2    | 31.76389    | 0.112   | 0.8944 |
| ACD                       | 1453.8333      | 4    | 363.45833   | 1.281   | 0.2956 |
| BCD                       | 648.8333       | 4    | 162.20833   | 0.572   | 0.6849 |
| ABCD                      | 726.5556       | 4    | 181.63889   | 0.640   | 0.6373 |
| RESIDUAL                  | 10215.500      | 36   | 283.76389   |         |        |
| TOTAL (CORRECTED)         | 25462.319      | 71   |             |         |        |

### Tabla de Comparación de Medias de la Variable Nitratos

Table of Least Squares Means for TESIS.NIT

| Level        | Count | Average   | Std. Error | 95% Confidence for mean |
|--------------|-------|-----------|------------|-------------------------|
| GRAND MEAN   | 72    | 124.90278 | 1.9852368  | 120.87560               |
| 128.92996    |       |           |            |                         |
| A:TESIS.HUM  |       |           |            |                         |
| 1            | 36    | 127.19444 | 2.8075488  | 121.49915               |
| 132.88974    |       |           |            |                         |
| 2            | 36    | 122.61111 | 2.8075488  | 116.91582               |
| 128.30640    |       |           |            |                         |
| B:TESIS.FER  |       |           |            |                         |
| 1            | 36    | 129.69444 | 2.8075488  | 123.99915               |
| 135.38974    |       |           |            |                         |
| 2            | 36    | 120.11111 | 2.8075488  | 114.41582               |
| 125.80640    |       |           |            |                         |
| C:TESIS.MEJ  |       |           |            |                         |
| 1            | 24    | 126.58333 | 3.4385310  | 119.60805               |
| 133.55861    |       |           |            |                         |
| 2            | 24    | 123.33333 | 3.4385310  | 116.35805               |
| 130.30861    |       |           |            |                         |
| 3            | 24    | 124.79167 | 3.4385310  | 117.81639               |
| 131.76695    |       |           |            |                         |
| D:TESIS.PROF |       |           |            |                         |
| 1            | 24    | 137.25000 | 3.4385310  | 130.27472               |
| 144.22528    |       |           |            |                         |
| 2            | 24    | 121.54167 | 3.4385310  | 114.56639               |
| 128.51695    |       |           |            |                         |
| 3            | 24    | 115.91667 | 3.4385310  | 108.94139               |
| 122.89195    |       |           |            |                         |

Tabla de

Table of Least Squares Means for TESIS.NIT

| Level     | Count | Average   | Std. Error | 95% Confidence<br>for mean |           |
|-----------|-------|-----------|------------|----------------------------|-----------|
| AB        |       |           |            |                            |           |
| 1 1       | 18    | 130.50000 | 3.9704736  | 122.44564                  |           |
| 138.55436 |       |           |            |                            |           |
| 1 2       | 18    | 123.88889 | 3.9704736  | 115.83453                  |           |
| 131.94325 |       |           |            |                            |           |
| 2 1       | 18    | 128.88889 | 3.9704736  | 120.83453                  |           |
| 136.94325 |       |           |            |                            |           |
| 2 2       | 18    | 116.33333 | 3.9704736  | 108.27897                  |           |
| 124.38769 |       |           |            |                            |           |
| AC        |       |           |            |                            |           |
| 1 1       | 12    | 130.58333 | 4.8628172  | 120.71880                  |           |
| 140.44787 |       |           |            |                            |           |
| 1 2       | 12    | 126.41667 | 4.8628172  | 116.55213                  |           |
| 136.28120 |       |           |            |                            |           |
| 1 3       | 12    | 124.58333 | 4.8628172  | 114.71880                  |           |
| 134.44787 |       |           |            |                            |           |
| 2 1       | 12    | 122.58333 | 4.8628172  | 112.71880                  |           |
| 132.44787 |       |           |            |                            |           |
| 2 2       | 12    | 120.25000 | 4.8628172  | 110.38546                  |           |
| 130.11454 |       |           |            |                            |           |
| 2 3       | 12    | 125.00000 | 4.8628172  | 115.13546                  |           |
| 134.86454 |       |           |            |                            |           |
| AD        |       |           |            |                            |           |
| 1 1       | 12    | 139.66667 | 4.8628172  | 129.80213                  |           |
| 149.53120 |       |           |            |                            |           |
| 1 2       | 12    | 120.66667 | 4.8628172  | 110.80213                  |           |
| 130.53120 |       |           |            |                            |           |
| 1 3       | 12    | 121.25000 | 4.8628172  | 111.38546                  |           |
| 131.11454 |       |           |            |                            |           |
| 2 1       | 12    | 134.83333 | 4.8628172  | 124.96880                  |           |
| 144.69787 |       |           |            |                            |           |
| 2 2       | 12    | 122.41667 | 4.8628172  | 112.55213                  |           |
| 132.28120 |       |           |            |                            |           |
| 2 3       | 12    | 110.58333 | 4.8628172  | 100.71880                  |           |
| 120.44787 |       |           |            |                            |           |
| BC        |       |           |            |                            |           |
| 1 1       | 12    | 130.16667 | 4.8628172  | 120.30213                  |           |
| 140.03120 |       |           |            |                            |           |
| 1 2       | 12    | 132.25000 | 4.8628172  | 122.38546                  |           |
| 142.11454 |       |           |            |                            |           |
| 1 3       | 12    | 126.66667 | 4.8628172  | 116.80213                  |           |
| 136.53120 |       |           |            |                            |           |
| 2 1       | 12    | 123.00000 | 4.8628172  | 113.13546                  |           |
| 132.86454 |       |           |            |                            |           |
| 2 2       | 12    | 114.41667 | 4.8628172  | 104.55213                  |           |
| 124.28120 |       |           |            |                            |           |
| 2 3       | 12    | 122.91667 | 4.8628172  | 113.05213                  |           |
| 132.78120 |       |           |            |                            |           |
| BD        |       |           |            |                            |           |
| 1 1       | 12    | 137.50000 | 4.8628172  | 127.63546                  |           |
| 147.36454 |       |           |            |                            |           |
| 1 2       | 12    | 130.08333 | 4.8628172  | 120.21880                  |           |
| 139.94787 |       |           |            |                            |           |
| 1         |       |           |            |                            |           |
| 3         | 12    | 121.50000 | 4.8628172  | 111.63546                  | 131.36454 |

Table of Least Squares Means for TESIS.NIT



| Level            | Count | Average   | Std. Error | 95% Confidence for mean |
|------------------|-------|-----------|------------|-------------------------|
| 2 1<br>146.86454 | 12    | 137.00000 | 4.8628172  | 127.13546               |
| 2 2<br>122.86454 | 12    | 113.00000 | 4.8628172  | 103.13546               |
| 2 3<br>120.19787 | 12    | 110.33333 | 4.8628172  | 100.46880               |
| CD               |       |           |            |                         |
| 1 1<br>144.95654 | 8     | 132.87500 | 5.9557104  | 120.79346               |
| 1 2<br>134.83154 | 8     | 122.75000 | 5.9557104  | 110.66846               |
| 1 3<br>136.20654 | 8     | 124.12500 | 5.9557104  | 112.04346               |
| 2 1<br>154.58154 | 8     | 142.50000 | 5.9557104  | 130.41846               |
| 2 2<br>130.08154 | 8     | 118.00000 | 5.9557104  | 105.91846               |
| 2 3<br>121.58154 | 8     | 109.50000 | 5.9557104  | 97.41846                |
| 3 1<br>148.45654 | 8     | 136.37500 | 5.9557104  | 124.29346               |
| 3 2<br>135.95654 | 8     | 123.87500 | 5.9557104  | 111.79346               |
| 3 3<br>126.20654 | 8     | 114.12500 | 5.9557104  | 102.04346               |

### Análisis de Rangos Múltiples de la relación entre la variable Nitratos y Humedad

| Method: 95 Percent Tukey HSD |       |           |                    |
|------------------------------|-------|-----------|--------------------|
| Level                        | Count | LS Mean   | Homogeneous Groups |
| 2                            | 36    | 122.61111 | X                  |
| 1                            | 36    | 127.19444 | X                  |

| contrast | difference | +/- | limits  |
|----------|------------|-----|---------|
| 1 - 2    | 4.58333    |     | 8.05451 |

\* denotes a statistically significant difference.

### Análisis de Rangos Múltiples de la relación entre la variable Nitratos y Fertilizantes

| Method: 95 Percent Tukey HSD |       |           |                    |
|------------------------------|-------|-----------|--------------------|
| Level                        | Count | LS Mean   | Homogeneous Groups |
| 2                            | 36    | 120.11111 | X                  |
| 1                            | 36    | 129.69444 | X                  |

| contrast | difference | +/- | limits    |
|----------|------------|-----|-----------|
| 1 - 2    | 9.58333    |     | 8.05451 * |

\* denotes a statistically significant difference.

### Análisis de Rangos Múltiples de la relación entre la variable Nitratos y Mejoradores

| Method: 95 Percent Tukey HSD |       |           |                    |
|------------------------------|-------|-----------|--------------------|
| Level                        | Count | LS Mean   | Homogeneous Groups |
| 2                            | 24    | 123.33333 | X                  |
| 3                            | 24    | 124.79167 | X                  |
| 1                            | 24    | 126.58333 | X                  |

| contrast | difference | +/- | limits  |
|----------|------------|-----|---------|
| 1 - 2    | 3.25000    |     | 11.8883 |
| 1 - 3    | 1.79167    |     | 11.8883 |
| 2 - 3    | -1.45833   |     | 11.8883 |

\* denotes a statistically significant difference.

### **Análisis de Rangos Múltiples de la relación entre la variable Nitratos y Profundidad**

Multiple range analysis for TESIS.NIT by TESIS.PROF

| Method: 95 Percent Tukey HSD |       |           |                    |
|------------------------------|-------|-----------|--------------------|
| Level                        | Count | LS Mean   | Homogeneous Groups |
| 3                            | 24    | 115.91667 | X                  |
| 2                            | 24    | 121.54167 | X                  |
| 1                            | 24    | 137.25000 | X                  |

| contrast | difference | +/- | limits    |
|----------|------------|-----|-----------|
| 1 - 2    | 15.7083    |     | 11.8883 * |
| 1 - 3    | 21.3333    |     | 11.8883 * |
| 2 - 3    | 5.62500    |     | 11.8883   |

\* denotes a statistically significant difference.