

## LIXIVIACIÓN DE NITRÓGENO INORGÁNICO EN UN SUELO AGRÍCOLA BAJO DIFERENTES TIPOS DE DRENAJE EN EL TRÓPICO HÚMEDO

### Inorganic nitrogen leaching in agricultural soil with different types of drainage in humid tropic

MA Estrada-Botello ✉, I Nikolskii-Gavrilov, JD Mendoza-Palacios, D Cristóbal-Acevedo, E de La Cruz-Lázaro, NP Brito-Manzano, A Gómez-Vázquez y O Bakhlaeva-Egorova

(MAEB) (JDMP) (ECL) (NPBM) (AGV) División Académica de Ciencias Agropecuarias Universidad Juárez Autónoma de Tabasco Km 25 Carretera Villahermosa - Teapa, Centro, Tabasco, México. maximiano.estrada@daca.ujat.mx (ING) (OBE) Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México, (DCA) Universidad Autónoma Chapingo.

**Artículo recibido:** 05 de abril de 2006, **aceptado:** 07 de marzo de 2007

**RESUMEN.** La implementación del drenaje agrícola en las regiones tropicales húmedas puede contribuir a la lixiviación de los fertilizantes. Con el objetivo de cuantificar la lixiviación de nitrógeno inorgánico se realizó un estudio en la región de la Chontalpa Tabasco, México, en diferentes tipos de drenaje parcelario: drenaje combinado (con drenaje topo, drenaje superficial y drenaje subterráneo con trincheras rellenas con arena) drenaje topo con drenaje superficial y drenaje superficial, y en un lisímetro. Se realizaron muestreos de agua para conocer las concentraciones de nitrógeno inorgánico (amonio y nitratos). La máxima lixiviación que podrían alcanzar las parcelas drenadas se determinó en el lisímetro. Las pérdidas de nitrógeno por lixiviación fueron  $3.57 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en la parcela con drenaje superficial. En las parcelas de drenaje topo con superficial y la de drenaje combinado las pérdidas de nitrógeno fueron superiores en 120 y 320 %, respectivamente, en comparación con las observadas en el drenaje superficial. De acuerdo a los resultados obtenidos en el lisímetro, la cantidad de nitrógeno que se puede lixiviar es hasta  $16.53 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  sin aplicar drenaje superficial. Las concentraciones máximas de nitratos ( $26.4 \text{ mg L}^{-1}$ ) y de amonio ( $22.0 \text{ mg L}^{-1}$ ) se observaron en las aguas freáticas de la parcela con drenaje combinado y fueron superiores a las permisibles. Esto indica que el tipo de drenaje debe seleccionarse considerando efecto que causa por el lavado del suelo y de la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas y aguas superficiales con fertilizantes nitrogenados.

**Palabras clave:** Nitratos, amonio, agua, drenaje, lisímetro

**ABSTRACT.** The application of agricultural drainage in the humid tropics may contribute to leaching of fertilizers. A quantification of inorganic nitrogen leaching was carried out in the Chontalpa, Tabasco, Mexico, for different drainage types: combined drainage (mole drainage, surface drainage and subsurface drainage with sand-filled trenches), mole with surface drainage, and surface drainage, as well as in one lysimeter. Water was sampled to determine inorganic nitrogen (ammonia and nitrates) concentrations. Maximum leaching possible in the drained plots was determined in the lysimeter. A nitrogen loss through leaching of  $3.57 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  was recorded in the plot with surface drainage. Nitrogen losses in the plots with mole with surface drainage, and those with combined drainage, were greater by 120 and 320 % respectively, in comparison with the values recorded for surface drainage. According to the results obtained in the lysimeter, the amount of nitrogen that may be leached can reach  $16.53 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  before applying surface drainage. Maximum concentrations of nitrates ( $26.4 \text{ mg L}^{-1}$ ) and ammonia ( $22.0 \text{ mg L}^{-1}$ ) were recorded in the water table of the plot with combined drainage, and were above the allowed level. This indicates that the type of drainage should be selected considering the effect that soil leaching causes and the possibility of surface and underground water pollution with nitrogen fertilizers.

**Key words:** Nitrates, amonio, water, drainage, lisimeter.

### INTRODUCCIÓN

La aplicación indiscriminada de los fertilizantes nitrogenados en los campos agrícolas de las zo-

nas tropicales puede ser eventualmente una fuente potencial de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas cuando se superan las concentraciones de nitratos ( $10 \text{ mg L}^{-1}$ ) permitidas por la

EPA y de amonio ( $0.39 \text{ mg L}^{-1}$ , Malleville & Chambole 1990). Por esta situación el drenaje agrícola juega un papel fundamental en el proceso de remoción del exceso de agua y lamentablemente influye en el transporte de los fertilizantes nitrogenados que contaminan el medio ambiente. La ruta de remoción del nitrógeno (por la superficie o por lixiviación a través de perfil del suelo) depende del tipo de drenaje y de las prácticas de aplicación de fertilizantes. Para las zonas húmedas se han recomendado dos tipos de drenaje parcelario o sus combinaciones (Ritzema 1994):

- superficial en forma de surcos, camas, etc. y
- subterráneo, ya sea drenes topo o drenes entubados colocados en las trincheras rellenas con el material de excavación o un material permeable.

Se sabe que este puede tener varias ventajas por ejemplo, como protección de la zona radical de los cultivos agrícolas por la asfixia cuando el nivel freático sube después de las lluvias intensas, mejoramiento de la aireación del suelo, el incremento de los rendimientos de los cultivos, etc. (CP-CNA 1998). Sin embargo el drenaje subterráneo también puede causar lavado intenso del suelo y lixiviación de fertilizantes principalmente nitrogenados (Ritzema 1994). En las zonas tropicales de México se aplica ampliamente el drenaje superficial, y la experiencia de aplicación del drenaje subterráneo es escasa (CP-CNA 1998).

De acuerdo a diferentes investigaciones, las pérdidas de nitrógeno por lixiviación varían de  $4$  a  $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en suelos con drenaje entubado a  $90 \text{ cm}$  de profundidad (Smith *et al.* 2000) y de  $31$  a  $77 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  con drenaje a  $25 \text{ cm}$  de profundidad (Smith *et al.* 1998). Mientras, Sainz *et al.* (2004) mencionan que en suelos no drenados las pérdidas por lixiviación pueden variar en función de la dosis de fertilizante aplicado. de Vos *et al.* (2000) reportaron pérdidas de nitrógeno de  $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  a través del drenaje subterráneo. Con respecto a la remoción del nitrógeno por el drenaje topo Scholefield *et al.* (1993), observaron pérdidas de  $38 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de nitrógeno y a través del drenaje entubado  $138 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , cuando se aplicó una dosis de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrógeno. Mientras que Smith *et al.* (2000) señalan que en un suelo drenado con drenaje topo y una separación de  $2 \text{ m}$  entre drenes se perdieron  $12$

$\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de nitrógeno al aplicar  $110 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrógeno.

Los estudios de lixiviación *in situ* en las zonas tropicales cuando el nivel freático se encuentra cerca de la superficie del suelo se hacen difíciles, para ello el uso de lisímetros con nivel freático controlado resuelve este problema al proporcionar información confiable al simular la dinámica de flujo y determinar la cantidad del nitrógeno que puede lixiviarse potencialmente hacia el manto freático en los campos agrícolas (Nkrumah *et al.* 1989), situación que se presenta en la región tropical húmeda de México.

En Tabasco, México, los estudios de lixiviación de fertilizantes en suelos drenados son escasos, lo que impide definir las dosis y régimen de aplicación de fertilizantes nitrogenados idóneos para los diferentes cultivos con la condición de prevenir o disminuir la contaminación ambiental. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de varios tipos y combinaciones del drenaje agrícola parcelario en la lixiviación de nitrógeno a través del perfil de suelo en un campo agrícola cultivado con caña de azúcar, donde se aplican dosis superiores a los  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrógeno a una superficie de  $27\ 628 \text{ ha}$  (INEGI 2004) en la región del Plan Chontalpa, Tabasco México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó del primero de noviembre de 1999 al 31 de octubre de 2000, en el campo experimental el Trapecio del Colegio de Postgraduados, en la región del Plan Chontalpa, Tabasco, México. El suelo es un Vertisol Crómico arcilloso, según FAO-UNESCO (1988). El clima se caracteriza por presentar dos períodos en el año: húmedo y seco. En el período, las precipitaciones se observan de junio a enero y el período relativamente seco tiene lugar de febrero a mayo. La precipitación promedio anual es de  $2\ 163 \text{ mm}$ , la evaporación de la superficie libre de agua es de  $1\ 234 \text{ mm}$  al año y la temperatura promedio anual es de  $26.5 \text{ °C}$  (Trujillo & Palma 1988). Según los estudios preliminares el perfil del suelo es relativamente homogéneo de la superficie hasta la profundidad de  $4 \text{ m}$ . El suelo se caracteriza con pH neutro, con buena disponibilidad de nutrimentos, encharcamientos durante las épocas húmedas debido a la poca pendiente superficial (menor de

0.1 %), baja conductividad hidráulica (menor de  $0.3 \text{ m d}^{-1}$ ) y a la gran capacidad de retención de humedad de la arcilla dominante (montmorillonita). Por debajo del estrato arcilloso se encuentra un estrato arenoso, donde se forma un acuífero semiconfinado (SARH 1977).

### Tratamiento de los experimentos

Se evaluaron tres parcelas agrícolas con los siguientes tipos de drenaje: una combinación del drenaje topo con superficial conjuntamente con subterráneo, con trincheras rellenas con arena (*dc*), topo con superficial (*dt*) y superficial (*ds*); y un lisímetro (*lis*). En el drenaje superficial (*ds*) se construyeron surcos de 50 m de longitud espaciados a 1.3 m, al final de ellos se construyó una cuneta de sección trapezoidal con una profundidad de 80 cm. Los surcos funcionaron como drenaje superficial durante las lluvias. En la parcela *dt*, el drenaje topo se instaló a una profundidad de 60 cm, el diámetro del túnel al momento de la construcción fue de 10 cm, la separación entre túneles fue de 2 m y se construyeron en forma perpendicular a los surcos. Los surcos presentaron las mismas características al tipo de drenaje anterior. En la parcela del *dc* el drenaje subterráneo entubado con trincheras rellenas con arena, fue construido en 1993, a una profundidad promedio de 1.2 m, con espaciamiento de 30 m entre las líneas de tubos (de 0.1 m de diámetro) y una longitud de 150 m; y los drenes topo presentaron las mismas características al tipo de drenaje anterior. Estos se colocaron perpendicularmente a las líneas del drenaje entubado. Los surcos, presentaron una longitud de 50 m, se ubicaron a lo largo del drenaje topo con las mismas características que las otras parcelas experimentales. Los drenes topo desalojaron el agua a las trincheras rellenas con arena, la cual llegó a los tubos perforados del drenaje subterráneo y a través de estos se descargó el agua a los colectores parcelarios. Los tubos perforados también recibieron el agua freática cuando la profundidad del nivel freático era menor de 1.2 m y el agua superficial fluye a través de los surcos (Estrada *et al.* 2004). El tamaño de las parcelas *ds* y *dt* fue de  $50 \times 50 \text{ m}^2$  (0.25 ha) cada una, y para la parcela *dc* fue de  $120 \times 150 \text{ m}^2$  (1.8 ha).

El lisímetro (*lis*) consiste de las siguientes partes: cama del cultivo, tanque regulador, tanque ali-

mentador y tanque de excedencias. El cuerpo del suelo esta contenido en un tanque de acero (cama de cultivo) con dimensiones de  $3 \times 2 \text{ m}^2$  y 1.8 m de profundidad, este no cuenta con salida de escurrimiento superficial, en la base presenta un sistema de drenaje controlado por el tanque regulador, por lo que el agua que proviene de la lluvia se percola y/o es utilizada por el cultivo. El tanque regulador permite la salida o la entrada del agua a la cama del cultivo mediante un sistema automático que mantiene el nivel freático constante a 0.9 m de profundidad, la cual es adecuada para el desarrollo de la caña de azúcar (Alfonso *et al.* 1981). Este sistema funciona de la siguiente manera: cuando la cama del cultivo recibe una recarga de agua por lluvia, el tanque regulador permite la descarga de agua al tanque de excedencias. En los períodos relativamente secos, cuando el nivel freático empieza a descender, el tanque regulador permite la entrada del agua que proviene del tanque alimentador a la cama del cultivo. En comparación con las parcelas experimentales, donde la lixiviación profunda de nitrógeno se detiene durante períodos de subida del nivel freático después de las lluvias intensas, en el lisímetro con el nivel freático permanente el nitrógeno se lixivia más fácilmente a través de perfil del suelo. Entonces, los datos de lixiviación de nitrógeno medidos en el lisímetro se pueden considerar como límite máximo potencial, correspondiente al funcionamiento del drenaje subterráneo "ideal" para comparar y verificar los datos observados en las parcelas (Ritzema 1994).

En las parcelas experimentales se sembró caña de azúcar, variedad Mex. 69-290. La siembra se efectuó el 22 de agosto de 1999. La fertilización se realizó el 19 de noviembre en la parcela *dc* y en el lisímetro, y el 9 de diciembre en las parcelas *ds* y *dt*. El complejo 20-10-10 se utilizó como fertilizante, con las siguientes dosis:  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrógeno,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de fósforo y  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de potasio, respectivamente. En todas las parcelas y en el lisímetro se realizaron mediciones de los componentes del balance de agua de algunos estratos de perfil del suelo. La cantidad de nitrógeno inorgánico (nitratos y amonio) lixiviado a las aguas freáticas y al acuífero semiconfinado, así como el removido a través de drenaje se calculó con los datos de los flujos verticales de agua en el perfil del suelo y con los flujos horizontales en la tubería de drenaje multiplicados

por las concentraciones de nitrógeno en el agua en estos flujos.

Para analizar el balance de agua se consideraron tres zonas en el perfil del suelo: superficial, insaturada y saturada. En la zona superficial se determinaron los flujos de agua sobre la superficie del suelo. La zona insaturada corresponde por lo general al estrato de la superficie hasta el nivel freático, el que varía, según los datos preliminares, de 0 a 1.5 m de profundidad durante las épocas húmedas (SARH 1977). La zona saturada corresponde al estrato debajo del nivel freático. Existen dos principales enfoques para analizar el balance de agua en perfiles de suelo (Ritzema 1994):

- considerando la profundidad de la zona insaturada variable de acuerdo con la variación del nivel freático y
- considerando convencionalmente la profundidad de la zona insaturada permanente.

El primer enfoque es más correcto metodológicamente porque la zona insaturada realmente corresponde a las condiciones insaturadas del suelo. Pero en este caso es difícil comparar los componentes del balance hídrico por variación del grosor de esta zona. Por esta razón en la práctica se aplica frecuentemente el segundo enfoque considerando la profundidad de la zona insaturada correspondiente a una profundidad (Ritzema 1994). En la investigación actual para analizar los balances de agua y de nitrógeno mineral en las parcelas experimentales se ha aplicado el segundo enfoque considerando la profundidad de la zona insaturada constante igual a 1.2 m (Mendoza *et al.* 2003). Según los datos bibliográficos este espesor corresponde a la profundidad óptima del nivel freático, a la que debería mantenerse en promedio durante ciclos de desarrollo de la mayoría de los cultivos agrícolas (Ritzema 1994), y a la ubicación más frecuente del nivel freático en las parcelas con el drenaje subterráneo durante los períodos húmedos (SARH 1977). En el lisímetro, por particularidades de su construcción, el nivel freático se mantuvo a una profundidad constante de 0.9 m que previene el ascenso del nivel freático periódico en el lisímetro y protege la zona radical de la caña de azúcar contra ahogamiento, esta profundidad frecuentemente se acepta como análogo de la profundidad media de 1.2 m en las parcelas

agrícolas, donde la profundidad del nivel freático varía con el tiempo (Ritzema 1994). La zona saturada para las parcelas comprende desde 1.2 m hasta 4 m de profundidad y en el lisímetro de 0.9 m hasta 1.8 m.

En las parcelas experimentales se instalaron pozos piezométricos a 1.2, 3 y 5 m de profundidad. Esto es para conocer las concentraciones de nitrógeno mineral en el agua freática de los estratos 0-1.20, 1.2-4.0 m y el estrato debajo de 4 m. Los valores de las concentraciones de nitrógeno mineral del agua para los flujos descendentes en el estrato 0-1.20 m fueron tomadas del pozo de 1.2 m de profundidad y para los flujos ascendentes del pozo de 3 m de profundidad, y para el estrato 1.2 a 4 m las entradas del flujo vertical por abajo del estrato se consideraron las concentraciones de nitrógeno mineral del agua del pozo a 5 m de profundidad y las salidas fueron tomadas del pozo de 3 m. En los pozos piezométricos se muestreó agua del acuífero libre y semiconfinado con una bomba manual cada tercer día. También se tomaron muestras de suelo en los estratos con espesor de 30 cm en la zona insaturada hasta 1.2 m de profundidad. Los muestreos de agua en los drenajes subterráneos (entubado y topo) y del agua lixiviada en el lisímetro se realizaron cada vez que se presentó el evento. El agua en los drenajes se tomó en las descargas y en el lisímetro fue en el tanque de excedencias.

Las concentraciones de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ -N) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ -N) del agua se determinaron con la técnica FIAS (Flow Injection Analysis System), para nitratos por el método de reducción de columna de cadmio y para amonio por difusión de gas (Müller *et al.* 1992).

### Balance de agua

En las parcelas  $dc$ ,  $dt$  y  $ds$  el balance de agua (en mm) para los períodos de 2 a 3 días fue calculado con la metodología descrita por Mendoza *et al.* (1998; 2003), en la que se considera:

Balance de agua en la zona superficial:

$$\Delta W_{sup} = Pr - I - S \quad (1)$$

donde  $\Delta W_{sup}$  = cambio de la cantidad de agua almacenada en la superficie del suelo (en charcos). En las parcelas experimentales no se han formado los charcos. Por esta razón  $\Delta W_{sup} = 0$ .  $Pr$  = pre-

precipitación;  $S$  = escurrimiento superficial;  $I$  = Infiltración al suelo.

El balance de agua para la zona insaturada:

$$\Delta W_{za} = I - ETR + (G - R) \quad (2)$$

donde  $\Delta W_{za}$  = cambio de las reservas de agua en la zona insaturada;  $ETR$  = evapotranspiración;  $R$  = percolación del agua de la zona insaturada a la saturada,  $G$  = ascenso capilar de la zona saturada a la zona insaturada.

El balance de agua para la zona saturada:

$$\Delta W_{zs} = (R - G) - PP - (Q_{dr} + Q_{col}) \quad (3)$$

donde:  $\Delta W_{zs}$  = cambio de las reservas de agua en la zona saturada;  $Q_{dr}$  y  $Q_{col}$  = descarga de agua freática a través de los drenes subterráneos y a través del dren colector a cielo abierto, respectivamente;  $PP$  = flujo descendente de las aguas freáticas hacia el acuífero semiconfinado.

Con las ecuaciones 1, 2 y 3 se llega al balance integral de agua, esto es:

$$\Delta W_{za} + \Delta W_{zs} = Pr - ETR - S - PP - (Q_{dr} + Q_{col}) \quad (4)$$

La precipitación ( $Pr$ ), se midió con un pluviómetro. El escurrimiento superficial ( $S$ ) corresponde al escurrimiento medido en cada tratamiento en dos surcos de longitud de 50 m con separación de 1.3 m. Para cuantificar la evapotranspiración se utilizó el valor de la evapotranspiración potencial medido en el lisímetro y los coeficientes de cultivos reportados por la literatura (Ritzema 1994). Para el movimiento vertical del flujo subterráneo  $PP$  se empleó la ley de Darcy, con base en la conductividad hidráulica media estimada por el método del pozo, así como el gradiente de la carga hidráulica medido a través de los piezómetros instalados a 5 m y los pozos de observación de 3 m de profundidad, respectivamente (Mendoza *et al.* 2003). Las profundidades de 3 y 5 m de estos pozos se explican por razón de la existencia en la profundidad de 4 m de la frontera entre dos estratos (estrato superior arcilloso y estrato inferior arenoso) con diferentes permeabilidades. Los pozos permiten medir los niveles freáticos o piezométricos en ambos lados de la frontera (superior e inferior).

Para determinar las descargas del drenaje subterráneo (entubado y topo) ( $Q_{dr}$ ) se cuantificó el

gasto medio, cada vez que ocurrió el evento. La salida del agua subterránea a través del colector abierto ( $Q_{col}$ ) se calculó con la metodología descrita por Mendoza *et al.* (1998). La infiltración ( $I$ ) se estimó con la ecuación 1, en la cual se consideró la condición  $\Delta W_{za} = 0$  y los datos medidos de  $Pr$  y  $S$ . Los cambios de las reservas de agua en la zona insaturada ( $\Delta W_{za}$ ), se determinaron a través de medición de la humedad volumétrica del suelo en los estratos con grosor de 30 cm con el método TDR (Mendoza *et al.* 2003) y a través de medición de los niveles freáticos en los pozos de observación instalados en cada parcela experimental. Los datos sobre las profundidades del nivel freático se utilizaron también para calcular los cambios de las reservas de agua en la zona saturada ( $\Delta W_{zs}$ ) en el estrato 1.2-3 m. En casos cuando al final y al inicio de los períodos de análisis del balance hídrico, el nivel freático fue ubicado dentro de la zona insaturada (es decir con la profundidad menor de 1.20 m) se consideró que ( $\Delta W_{zs}$ ) = 0. El valor ( $G - R$ ) se estimó a través de la ecuación 2, en la cual se utilizaron los resultados de determinación de los componentes restantes. Este valor después fue verificado sustituyéndolo a la ecuación 3. Además los valores  $G$  y  $R$  se determinaron por separado a través del análisis de la dinámica de la profundidad del nivel freático medido con mayor frecuencia (hasta los datos diarios) utilizando la metodología descrita por Nikolskii *et al.* (2005), este trabajo indica que los valores de  $G$  y  $R$  se determinan con errores menores de 5%.

### Determinación de cantidad de nitrógeno lixiviado

La cantidad de nitrógeno inorgánico ( $\text{NO}_3^-$ -N +  $\text{NH}_4^+$ -N) que se lixivia de la zona insaturada ( $N_{lix}$ ) a la saturada (en  $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) fue calculada por la siguiente ecuación:

$$N_{lix} = \frac{R * C_{lix}}{100} \quad (5)$$

donde:  $R$  (en  $\text{mm d}^{-1}$ ) es la percolación profunda del agua y  $C_{lix}$  (en  $\text{mg L}^{-1}$ ) la concentración de nitrógeno inorgánico en el agua del pozo instalado a 1.2 m de profundidad en las parcelas experimentales; 100 = factor de conversión.

En casos cuando el nivel freático fue ubicado a una profundidad mayor de 1.2 m la concentración

$C_{lix}$  fue determinada a través de los análisis químicos de agua del suelo en estrato 0.9 a 1.2 m. Para el lisímetro  $C_{lix}$  es la concentración de nitrógeno inorgánico ( $\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) en el agua del tanque de excedencias.

La cantidad de nitrógeno  $N_{as}$  ( $\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) de ascenso capilar de la zona saturada a la insaturada (en  $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) fue calculada para las parcelas de la siguiente manera:

$$N_{as} = \frac{G * C_{as}}{100} \quad (6)$$

donde:  $C_{as}$  (en  $\text{mg L}^{-1}$ ) = concentración de nitrógeno ( $\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) en el agua del pozo piezométrico de la profundidad de 3 m en las parcelas experimentales, y para el lisímetro del agua del tubo alimentador. 100 = factor de conversión.  $G$  (en  $\text{mm d}^{-1}$ ) para las parcelas se determinó con las ecuaciones 2 y 3 del balance de agua y para el lisímetro corresponde a la cantidad de agua agregada al tanque alimentador.

La cantidad de nitrógeno ( $\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) que lixivia de la zona saturada hacia el acuífero semiconfinado  $N_{pp}$  (en  $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) fue calculado con la fórmula siguiente:

$$N_{pp} = \frac{PP * C_{pp}}{100} \quad (7)$$

Donde:  $PP$  = lámina de agua (en mm) que se percola de la zona saturada al acuífero semiconfinado y determinada a través del balance hídrico.  $C_{pp}$  es la concentración de nitrógeno ( $\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) (en  $\text{mg L}^{-1}$ ) en el agua del pozo de observación a 3 m de profundidad. 100 = factor de conversión. Para el caso de ascenso de agua del acuífero semiconfinado hacia la zona saturada (si  $PP < 0$ )  $C_{pp}$  corresponde a la concentración del nitrógeno inorgánico en el agua del pozo piezométrico de 5 m de profundidad.

## RESULTADOS

En el estudio se identificaron dos períodos húmedos de noviembre de 1999 a enero de 2000 y de mayo a noviembre de 2000, y un período seco de enero a abril de 2000 (Figura 1). En todo el período de noviembre de 1999 a noviembre de 2000 la precipitación fue 2 666 mm, valor mayor al promedio anual (2 163 mm) de años anteriores.

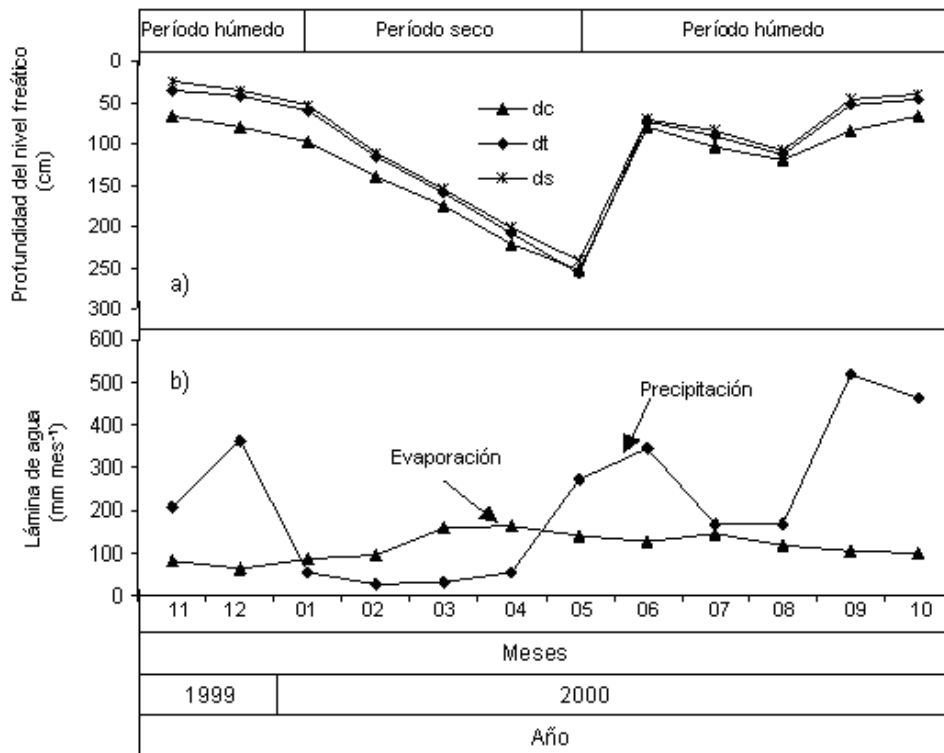
En los períodos húmedos los niveles freáticos en todas las parcelas experimentales se encontraron a una profundidad menor de 1 m y en el lisímetro se mantuvo constante a una profundidad de 0.9 m. El drenaje combinado ( $dc$ ) en comparación a los otros dos tipos de drenaje permitió mantener el nivel freático en una profundidad mayor de 0.7 m y para prevenir ahogamiento de la zona radical de las plantas. La profundidad del nivel freático promedio máximo observado fue de 2.54 m en el período seco. En la Tabla 1 se presentan algunos componentes del balance hídrico que intervienen en los cálculos de nitrógeno que se lixivia a través de perfil del suelo y se remueve con el drenaje en los diferentes tratamientos experimentales. Todos los componentes de las ecuaciones 1, 2 y 3 se presentan y analizan en la publicación Mendoza et al. (2003).

Según los datos presentados en la Tabla 1, el valor menor de la percolación del agua ( $R$ ) fue de 576 mm en la parcela con drenaje superficial, mientras que en la parcela con drenaje combinado  $R=1\ 029$  mm. En el lisímetro donde no se formó el escurrimiento superficial se observó la máxima percolación ( $R=2\ 027$  mm), en comparación a las parcelas drenadas.

## Lixiviación del nitrógeno de la zona insaturada a la zona saturada

Las cantidades de nitrógeno inorgánico lixiviadas de la zona insaturada a la zona saturada de las parcelas experimentales  $dc$ ,  $dt$  y  $ds$ , y del  $lis$  se muestran en la Tabla 2, así como la cantidad de nitrógeno que entra a la zona insaturada por ascenso capilar. La pérdida neta de nitrógeno por lixiviación a la zona saturada ( $N_{lix} - N_{as}$ ) durante un año fue de  $13.51 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en el lisímetro y  $9.35$ ,  $4.74$  y  $2.97 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en las parcelas  $dc$ ,  $dt$  y  $ds$ , respectivamente. Esto corresponde a  $7.79$ ,  $3.95$  y  $2.48\%$  de la dosis de aplicación de los fertilizantes nitrogenados para las parcelas  $dc$ ,  $dt$  y  $ds$ , respectivamente.

En la Figura 2 se observa que la lixiviación neta de nitrógeno a la profundidad de 1.2 m para las parcelas  $ds$ ,  $dt$  y  $dc$ , fue mayor en el primer período húmedo (del 1 de noviembre de 1999 al 31 de diciembre del 1999) cuando se aplicó la fertilización, siendo ésta la causa principal de la lixiviación de nitrógeno y no la lámina de agua percolada (Ta-



**Figura 1.** Dinámica del cambio: (a) del nivel freático en las parcelas con drenaje combinado (*dc*), topo con superficial (*dt*) y superficial (*ds*) y (b) de las láminas de precipitación y evaporación de la superficie libre de agua.

**Figure 1.** Dynamics of change: (a) of the water table level in the plots with combined drainage (*dc*), mole with surface (*dt*) and surface (*ds*) drainage, as well as in the lysimeter (*lis*).

**Tabla 1.** Componentes del balance hídrico (en mm) de las parcelas con drenaje combinado (*dc*), topo con superficial (*dt*), y superficial (*ds*), y del lisímetro (*lis*).

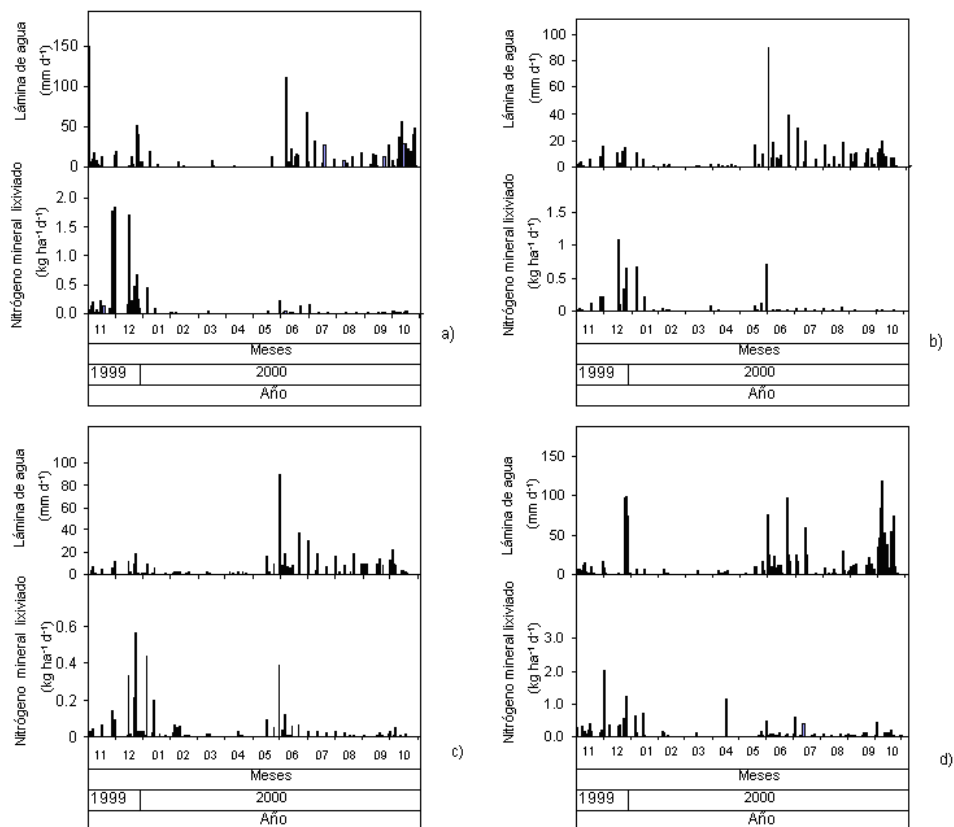
**Table 1.** Water balance components (in mm) in the plots with combined (*dc*), mole with surface (*dt*) and surface (*ds*) drainage, as well as in the lysimeter (*lis*).

Componente del balance	01/11/99 al 31/12/99				01/01/00 al 30/04/00				01/05/00 al 31/10/00				01/11/99 al 31/10/00			
	<i>dc</i>	<i>dt</i>	<i>ds</i>	<i>lis</i>	<i>dc</i>	<i>dt</i>	<i>ds</i>	<i>lis</i>	<i>dc</i>	<i>dt</i>	<i>ds</i>	<i>lis</i>	<i>dc</i>	<i>dt</i>	<i>ds</i>	<i>lis</i>
Precipitación ( <i>P<sub>r</sub></i> )	572	163	1 932	2 667	572	163	1 932	2 667	572	163	1 932	2 667	572	163	1 932	2 667
Ascenso capilar ( <i>G</i> )	5	98	122	225	18	83	80	181	12	70	80	162	9	350	273	632
Percolación de la zona insaturada a la saturada ( <i>R</i> )	221	44	766	1 029	77	32	453	562	77	44	455	576	442	51	1 534	2 027
Descarga del drenaje entubado ( <i>Q<sub>dr</sub></i> )	307	26	721	105 467	4	197	268	119	8	318	445					
Descarga del drenaje topo ( <i>Q<sub>to</sub></i> )	67	4	197	268	119	8	318	445								
Flujo hacia acuífero semiconfinado ( <i>P<sub>P</sub></i> )	22	32	79	133	72	123	219	414	81	139	239	459				

bla 2). En cambio en el segundo período húmedo el factor principal de lixiviación de nitrógeno fue por las láminas de agua percoladas. Además, en la Figura 2 se observa que la lixiviación de nitrógeno es más intensa durante las primeras lluvias de los períodos húmedos. Esto por el incremento de los flujos descendentes de agua que aceleran el proceso de lixiviación de nitrógeno (principalmente el ión de ni-

trato, el cual es altamente soluble y prácticamente no se adsorbe por las partículas del suelo).

El evento de máxima lixiviación de nitrógeno en el primer período húmedo fue  $0.56 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  en la parcela *ds*,  $1.07 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  en el *dt*,  $1.82 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  en el *dc* y  $3.1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  en el *lis*. Esto está relacionado con la aplicación del fertilizante y con las intensas lluvias presentadas. En el segundo



**Figura 2.** Dinámica del cambio de la lámina de agua que se percola y nitrógeno mineral ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) que se lixivia de la zona insaturada a la zona saturada en las parcelas con drenaje: (a) combinado (dc), (b) topo con superficial (dt) y (c) superficial (ds), y (d) del lisímetro (lis).

**Figure 2.** Dynamics of change of the water that is percolated and the mineral nitrogen ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) that is leached from the unsaturated to the saturated area in the plots with drainage: (a) combined (dc), (b) mole with surface (dt) and (c) surface (ds), and (d) of lysimeter (lis).

**Tabla 2.** Nitrógeno mineral ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) que se lixivia (en  $\text{kg ha}^{-1}$ ) de la zona insaturada a la zona saturada y entra de la zona saturada a la insaturada, en las parcelas experimentales con drenaje combinado (dc), topo con superficial (dt), y superficial (ds), y en el lisímetro (lis).

**Table 2.** Vertical descending or rising leaching (in  $\text{kg ha}^{-1}$ ) of mineral nitrogen ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) between unsaturated and saturated areas of the soil profile, in the experimental plots with combined (dc), mole with surface (dt) and surface (ds), as well as in lysimeter (lis).

Parcela	Nitrógeno lixiviado ( $N_{lix}$ )			Nitrógeno de ascenso capilar ( $N_{as}$ )			Lixiviación neta ( $N_{lix} - N_{as}$ )			
	Períodos (en meses)						01/11/99 al 31/12/99	01/01/00 al 30/04/00	01/05/00 al 31/10/00	01/11/99 al 31/10/00
	01/11/99 al 31/12/99	01/01/00 al 30/04/00	01/05/00 al 31/10/00	01/11/99 al 31/12/99	01/01/00 al 30/04/00	01/05/00 al 31/10/00				
dc	8.08	0.67	1.18	0.17	0.24	0.17	7.91	0.43	1.01	9.35
dt	2.82	1.10	1.34	0.11	0.36	0.04	2.71	0.74	1.30	4.74
ds	1.53	0.97	1.07	0.18	0.38	0.04	1035	0.59	1.03	2.97
lis	10.99	1.17	4.37	0.10	2.19	0.72	10.88	-1.02*	3.65	13.51

periodo húmedo la lixiviación de nitrógeno fue menor, pero la distribución relativa de los valores de lixiviación de nitrógeno en las parcelas fue la misma que en el primer período húmedo:  $ds < dt < dc < lis$ . Por lo que se puede inferir que la lixiviación de los fertilizantes nitrogenados depende de la época del

año, fecha de aplicación del fertilizante y del tipo de drenaje. De lo anterior se observa que el tipo de drenaje parcelario que lixivió una mayor proporción de nitrógeno fue el dc con  $9.35 \text{ kg de ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Tabla 2).

En el lisímetro se lixivió  $16.53 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$



de nitrógeno, valor superior a las parcelas *ds*, *dt* y *dc*, causada por el incremento de la lámina de agua percolada que llega al tanque de excedencias (Tablas 1 y 2). Este valor se consideró como la máxima cantidad de nitrógeno que se puede lixiviar del suelo en estudio, cuando se implementa el drenaje parcelario en suelos cañeros al aplicar una dosis de 120 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno. Ya que la profundidad mínima a la que se debe poner el drenaje subterráneo depende de la profundidad radical de la caña de azúcar de 0.9 m (Alfonso *et al.* 1981), valor que corresponde al nivel freático del lisímetro.

#### Lixiviación asociada por el drenaje subterráneo

En la parcela *dc*, el drenaje subterráneo entubado descargó 5.96 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de nitrógeno y 3.39 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de nitrógeno se lixivió a la zona saturada. Mientras que el drenaje topo descargó 1.54 a 7.8 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de nitrógeno en las parcelas *dc* y *dt*, respectivamente, estos sistemas de drenaje aceleran la lixiviación de nitrógeno a través del tiempo y pueden lavar el nitrógeno inorgánico (principalmente en forma de nitratos) de los primeros 30 cm del perfil del suelo, donde se encuentra alrededor del 80 % de las raíces del cultivo de la caña de azúcar (Alfonso *et al.* 1981).

La aplicación del drenaje superficial redujo la cantidad de agua y del nitrógeno disuelto que se percola al acuífero libre y semiconfinado. La aplicación del drenaje subterráneo además de causar la pérdida del fertilizante nitrogenado, a través de lixiviación y remoción, provocó la contaminación de las aguas freáticas y de los cuerpos de las aguas superficiales.

#### Ascenso capilar de nitrógeno de la zona saturada a la zona insaturada

En la Figura 3 se muestra la dinámica de ascenso capilar de nitrógeno en las parcelas *ds*, *dt* y *dc*, así como la dinámica de cambio de los flujos de agua de ascenso capilar en la zona insaturada. El nitrógeno que entra a la zona insaturada por ascenso capilar, en cada sistema de drenaje, varía de 6 a 17 % (Tabla 2) con respecto al que se lixivía de la zona saturada. Esto indica que el ascenso capilar del agua, es una forma natural de contrarrestar los procesos de lixiviación de la zona insaturada.

#### Lixiviación del nitrógeno de la zona saturada al

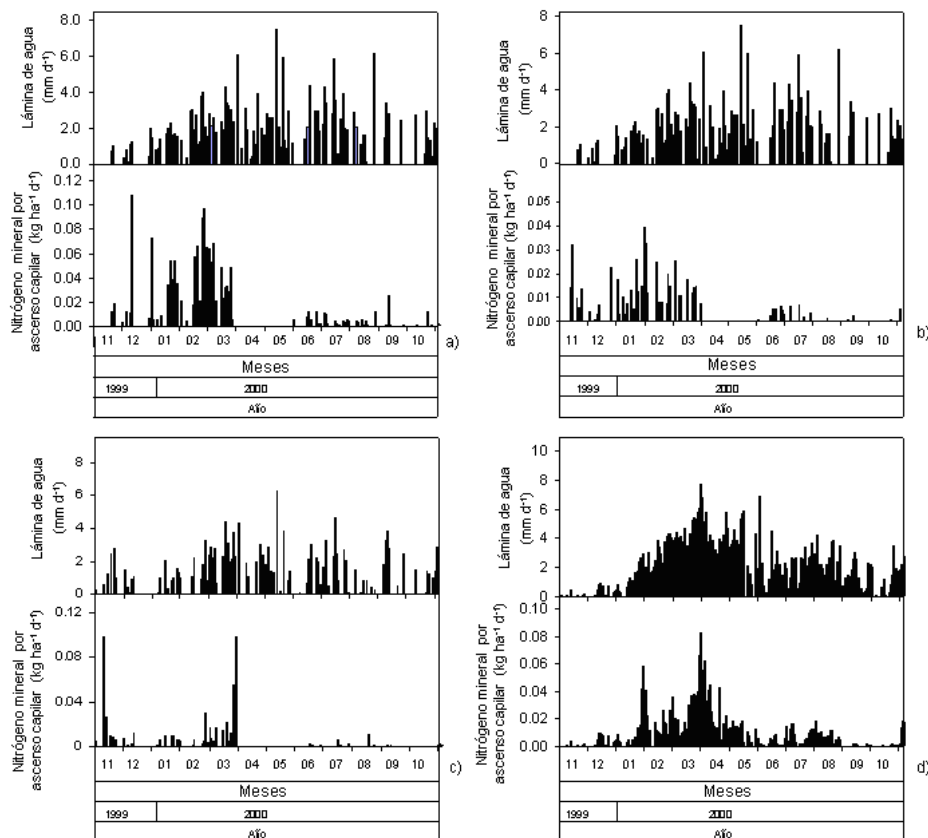
#### acuífero semiconfinado

La pérdida de nitrógeno de la zona saturada por percolación profunda al acuífero semiconfinado fue de 97 % en la parcela *ds*, 70 % en la parcela *dt* y 10 % en la parcela *dc* con respecto a las pérdidas netas por lixiviación de nitrógeno de la zona insaturada (Tablas 2 y 4). Esto significa que en caso de aplicación del drenaje superficial (*ds*) o topo con superficial (*dt*) prácticamente toda la cantidad de nitrógeno que se lixivía de la zona insaturada a la zona saturada se descargará al acuífero semiconfinado, lo cual es típico de la región del Plan Chontalpa. En el caso de la aplicación del drenaje combinado (*dc*) una parte principal del nitrógeno lixiviado de la zona insaturada se descargó a través de los drenes entubados (alrededor de 90 %) a los drenes colectores a cielo abierto (Tablas 2 y 3).

La máxima cantidad de nitrógeno percolado a la profundidad de 4 m fue de 0.10 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para la parcela *ds*, 0.21 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para la parcela *dt*, y 0.19 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para la parcela *dc* (Figura 4). Estas recargas de nitrógeno al acuífero semiconfinado estuvieron influenciadas por la lámina de agua percolada y por las concentraciones de nitrógeno en el agua que se presentaron en el primer periodo húmedo (Figura 3). Durante el periodo de estudio no se presentó flujo ascendente de agua a la zona saturada, debido a la presencia de intensas lluvias.

#### Concentraciones de nitratos y amonio en el agua

Las máximas concentraciones de nitratos y amonio registradas en el agua freática en las parcelas *dc*, *dt* y *ds* fueron 26.4 y 22.0, 3.2 y 9.4, y 3.3 y 6.0 mg L<sup>-1</sup> respectivamente. Estas concentraciones superaron las permisibles, por lo que es evidente que las concentraciones de amonio y nitratos en las descargas del drenaje entubado (nitratos de 10.3 mg L<sup>-1</sup> y amonio de 1.4 mg L<sup>-1</sup>) y topo (nitratos de 18.3 mg L<sup>-1</sup> y amonio de 7.9 mg L<sup>-1</sup>) de la parcela *dc* pueden dañar al medio ambiente. Estas concentraciones se presentaron en el momento de la aplicación del fertilizante, por lo que puede existir una posible contaminación a los cuerpos superficiales por las descargas del agua a través del drenaje subterráneo. Aunque las concentraciones eran menores del nivel permisible en el mayor tiempo del experimento, se puede imaginar que en caso de



**Figura 3.** Dinámica del cambio de la lámina de agua de ascenso capilar y del nitrógeno mineral ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) de ascenso capilar de la zona saturada a la zona insaturada en las parcelas con drenaje: (a) combinado (*dc*), (b) topo con superficial (*dt*) y (c) superficial (*ds*), y (d) del lisímetro (*lis*).  
**Figure 3.** Dynamics of change of the water head with capillary ascent and of the mineral nitrogen ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) of capillary ascent from the saturated to the unsaturated area in the plots with drainage: (a) combined (*dc*), (b) mole with surface (*dt*) and (c) surface (*ds*), and (d) of lysimeter (*lis*).

**Tabla 3.** Nitrógeno mineral ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) removido (en  $\text{kg ha}^{-1}$ ) al colector parcelario a través del drenaje combinado (*dc*) y topo con superficial (*dt*).

**Table 3.** Mineral nitrogen ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) removed (in  $\text{kg ha}^{-1}$ ) to the plots' drainage collector trough the combined (*dc*) and mole with surface (*dt*) drainage.

Parcela	Drenaje subterráneo				Drenaje topo			
	Períodos (en meses)							
	01/11/99 al 31/12/99	01/01/00 al 30/04/00	01/05/00 al 31/10/00	01/11/99 al 31/10/00	01/11/99 al 31/12/99	01/01/00 al 30/04/00	01/05/00 al 31/10/00	01/11/99 al 31/10/00
<i>dc</i>	4.85	0.26	0.85	5.96	1.01	0.07	0.46	1.54
<i>dt</i>					5.47	1.89	0.44	7.80

aplicación de los mismos tipos de drenaje para los cultivos con mayores dosis de aplicación de los fertilizantes nitrogenados las concentraciones de nitratos pudieran superar las concentraciones permisibles. Esto indica que el tipo de drenaje debe seleccionarse considerando no solamente los requerimientos de los cultivos agrícolas en el régimen hídrico del

suelo sino tomando en cuenta también la posibilidad de pérdida de fertilidad del suelo por su lavado intenso y además posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas y aguas superficiales con los fertilizantes nitrogenados.

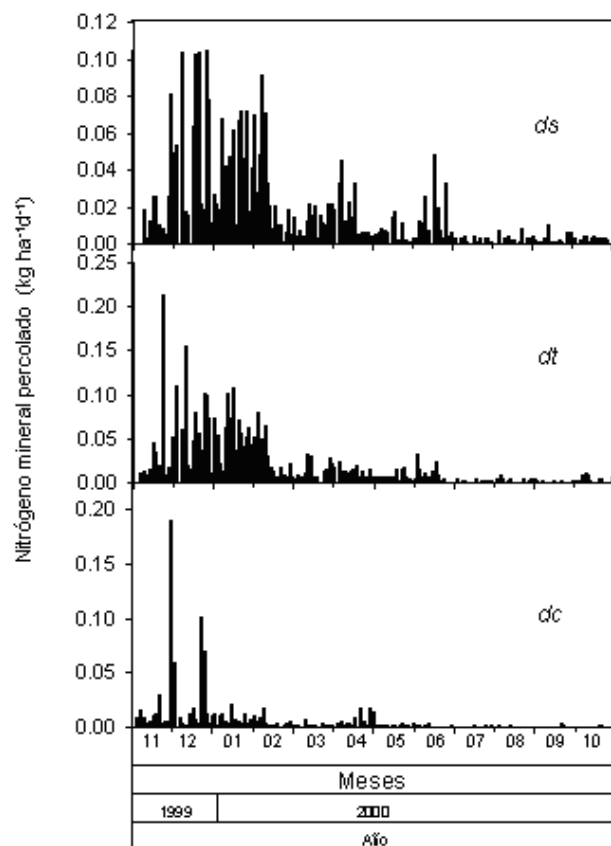
## DISCUSIÓN

Los flujos de agua (balance de aguas) fueron diferentes en cada sistema de drenaje y en el lisímetro, en particular en la parcela *dc* la influencia del sistema de drenaje subterráneo instalado, como se muestra en la Tabla 1, modificó los flujos ascendentes y descendentes, como lo indican Mendoza *et al.* (2003). Los flujos de agua en el lisímetro con respecto a las parcelas experimentales presentaron discrepancia entre los datos, la percolación fue mayor en el lisímetro con respecto a las parcelas con drenaje, esto se debe que en el lisímetro no existió escurrimiento superficial y originó un incremento en la percolación del agua.

Con respecto a los flujos de agua y procesos de lixiviación de los fertilizantes nitrogenados en las parcelas agrícolas drenadas dependieron del tipo de drenaje agrícola como lo indica Ritzema (1994) y Nkruman *et al.* (1989). Además, la instalación del drenaje subterráneo incrementó la aceleración de los flujos descendentes de agua y de lixiviación del nitrógeno (Skaggs & Gilliam 1981), y la velocidad de movimiento del agua a través de perfil de suelo, factor determinante en la cantidad de nitrógeno mineral lixiviado.

El tipo de drenaje implementado en cada parcela afectó la lixiviación del nitrógeno como lo reporta Skaggs & Gilliam (1981), quienes mencionan que a menor separación de las líneas de drenaje se incrementa la lixiviación, así como la profundidad de este es un elemento importante en los procesos de lixiviación del nitrógeno (Smith *et al.* 1998; Smith *et al.* 2000). Lo anterior se explica con los datos obtenidos en el lisímetro al presentarse la máxima lixiviación en este sistema, debido a que el agua que proviene de la lluvia la mayor parte se percola y lavó al suelo, al no existir escurrimiento superficial por la forma de la construcción del mismo. Esto, indica que si el drenaje subterráneo se instalara a una profundidad de 0.9 m, la máxima lixiviación de nitrógeno sería  $16.53 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Por lo tanto, a menor profundidad el drenaje subterráneo lixiviará una mayor cantidad de nitrógeno (Smith *et al.* 1998; Smith *et al.* 2000), de acuerdo a la información obtenida en el lisímetro. De ahí que este valor se considera como la máxima cantidad que puede lixivarse de la zona insaturada donde se encuentra la zona radical

del cultivo de caña de azúcar.



**Figura 4.** Nitrógeno mineral ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) percolado de la zona saturada al acuífero semiconfinado en las parcelas con drenaje combinado (*dc*), topo con superficial (*dt*) y superficial (*ds*), durante el período de estudio (01/11/99 al 31/10/00).

**Figure 4.** Mineral nitrogen ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) percolated from the saturated area to the semi-confined aquifer in the plots with combined (*dc*), mole with surface (*dt*) and surface (*ds*), during the study period (01/11/99 to 31/10/00).

En la parcela *dc*, el drenaje subterráneo entubado descargó  $5.96 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de nitrógeno, valor similar a los reportados por Cristóbal *et al.* (2002) y Estrada *et al.* (2002) en áreas cercanas a las parcelas de estudio, y  $3.39 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de nitrógeno se lixivió a la zona saturada. Mientras que el drenaje topo descargó  $1.54$  a  $7.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de nitrógeno en las parcelas *dc* y *dt*, respectivamente, esto indica que este tipo de drenaje acelera la lixiviación de nitrógeno. La máxima cantidad de nitrógeno percolado a la profundidad de 5 m fue de  $0.10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  para la parcela *ds*,  $0.21 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  para la parcela *dt*, y  $0.19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  para la parcela *dc*, estos valores fueron inferiores a los reportados por Estrada *et al.* (2002).

**Tabla 4.** Nitrógeno mineral ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) percolado (en  $\text{kg ha}^{-1}$ ) de la zona saturada al acuífero semiconfinado en las parcelas experimentales con drenaje combinado (*dc*), topo con superficial (*dt*) y superficial (*ds*).

**Table 4.** Mineral nitrogen ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) percolated (in  $\text{kg ha}^{-1}$ ) from saturated area to semi-confined aquifer in the experimental plots with combined (*dc*), mole with surface (*dt*) and surface (*ds*) drainage.

Parcela	Período			
	01/11/99 al 31/12/99	01/01/01 al 30/04/00	01/05/00 al 31/10/00	01/11/99 al 31/10/00
	<i>dc</i>	0.61	0.30	0.06
<i>dt</i>	1.39	1.60	0.36	3.35
<i>ds</i>	0.99	1.46	0.41	2.86

La lixiviación de nitrógeno fue mayor en la parcela con drenaje combinado en comparación a los otros tipos de drenaje, por la presencia del drenaje subterráneo en la zona saturada que acelera los flujos de agua tanto en forma vertical como horizontal, esto es fundamentado por Turtola & Paajanen (1995) y Ramasamy *et al.* (1997). Además, porque este sistema de drenaje recolecta el agua y nitrógeno disuelto que se mueve horizontalmente en la capa arable así como el que se infiltra de la superficie del suelo directamente a las trincheras rellenas con arena y captura el agua freática debajo del nivel freático (Turtola & Paajanen 1995; Ramasamy *et al.* 1997; Randall & Vestsch 2005). Por lo que se puede decir que la lixiviación de nitrógeno y las

descargas de nitrógeno por el drenaje subterráneo (entubado y no entubado) son controladas por el drenaje parcelario (Ramasamy *et al.* 1997). Por otro lado, la implementación del drenaje agrícola en las zonas tropicales incrementa la lixiviación neta de nitrógeno de 160 a 315 %, en comparación al drenaje típico para el Plan Chontalpa. El cual puede ser hasta 455 %, al considerar la máxima lixiviación neta de nitrógeno del lisímetro, cantidades similares a las registradas por Goss *et al.* (1993), Turtola & Paajanen (1995) y Stoddard *et al.* (2005) en suelos arcillosos. El drenaje parcelario subterráneo, ya sea entubado o topo, aceleró la lixiviación del nitrógeno inorgánico en un suelo Vertisol (Skaggs & Gilliam 1981; Smith 1999; Smith 2000), cuando se aplicó una dosis de  $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$  al cultivo de caña de azúcar. Sin embargo, al implementar otros cultivos con dosis de fertilizantes inferiores a las que se aplica a la caña de azúcar, se puede presentar lixiviación de nitrógeno en forma natural. Por lo que es necesario evaluar con trazadores las descargas de nitrógeno provenientes de los fertilizantes y del suelo que se mineraliza.

Con respecto a las concentraciones de  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_4$  observadas en el agua freática así como en las descargas a través de los drenes (entubado y topo) y del escurrimiento superficial fueron en algunos casos mayores a las concentraciones permisibles de  $\text{NO}_3$  ( $10.0 \text{ mgL}^{-1}$ ) y  $\text{NH}_4$  ( $0.39 \text{ mgL}^{-1}$ ), esto coincide con los datos reportados por Estrada *et al.* (2002).

## LITERATURA CITADA

- Alfonso CA, González B, Ovcherenko M (1981) Estudio del sistema radicular de la caña de azúcar por el método de cilindros. *Ciencia Técnica Agrícola. Suelos y Agroquímicos* 4(3): 45-57.
- Cristóbal AD, Palacios VOL, Nikolskii GI, Gavi RF, Palma LDJ, Carrillo ÁE, Peña CJJ (2002) Lixiviación de nitrógeno en función del espaciamiento entre drenes subterráneos en Tabasco. *Agrociencia* 36: 291-304.
- CP-CNA (1998) El drenaje subterráneo: una alternativa agrotecnológica para el trópico húmedo. Boletín técnico. Ed CP, 42 pp.
- de Vos JA, Hesterberg D, Raats PAC (2000) Nitrate leaching in the tile-drained silt loam soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 517-527.
- Estrada BMA, Nikolskii GI, Gavi RF, Etchevers BJD, Palacios VOL (2002) Balance de nitrógeno inorgánico en una parcela con drenaje subterráneo en el trópico húmedo. *Terra* 20 (2): 189-198.
- Estrada BMA, Nikolskii GI, Etchevers BJD, Gavi RF, Palacios VOL, Palma LJD, Mendoza PJD (2004) Influencia del tipo de drenaje en el aprovechamiento de nitrógeno por la caña de azúcar. *Terra* 22(1): 81-89.
- FAO-UNESCO (1988) Soil map of the world. Revised legend word soil resources report 60. FAO. Roma, Italia 200 pp.

- Goss MJ, Howse KR, Lane PW, Christian DG, Harris GL (1993) Losses of nitrate-nitrogen in water draining from under autumn-sown crops established by direct drilling or mouldboard ploughing. *J. Soil Sci.* 44: 35-48.
- INEGI (2004) Anuario estadístico de Tabasco. Gobierno del Estado de Tabasco. Aguascalientes México 548 pp.
- Malleville J, Chambolle T (1990) Calidad del agua. *Mundo Científico* 10: 768-778.
- Mendoza PJD, Nikolskii GI, Palacios VOL (1998) Evaluación del funcionamiento hidráulico de un drenaje subterráneo en la Chontalpa, Tabasco. *Agrociencia* 32(3): 217-223.
- Mendoza PJD, Nikolskii GI, Palacios VOL, Landeros SC, Palma LDJ, Carrillo ÁE, Estrada BMA (2003) Análisis del funcionamiento hidráulico de diferentes tipos de drenaje agrícola en Tabasco, México. *Ingeniería Hidráulica en México* 28(2): 107-119.
- Müller H, Frey B, Schweiser B (1992) Technique for flow injection analysis in UV/VIS spectroscopy. Perkin Elmer. Publicación: B2304.30E. Número de parte: B050-7757. Republica Federal de Alemania, pp 12-24.
- Nikolskii YN, Mendoza-Palacios JD, Estrada-Botello M, Palacios-Vélez O, Landeros-Sánchez C, Bakhlaeva OS, Maslov BS (2005) Water regime of alluvial clayey soil in humid tropics under different drainage strategies. *Eurasian Soil Science.* 38: 685-691.
- Nkrumah M, Griffith SH, Ahmad N, Gumbs FA (1989) Lysimeter and field studies on  $^{15}\text{N}$  in a tropical soil. I. Applied  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ - $^{15}\text{N}$  and the movement of  $\text{NO}_3$ - $^{15}\text{N}$  in a loam soil: The effect of initial soil moisture content on infiltration rate. *Plant and Soil* 114: 3-12.
- Randall GW, Vestusch JA (2005) Nitrate losses in subsurface drainage from a corn-soybean rotation as affected by fall and spring application of nitrogen and nitrapyrin. *J. Environ. Qual.* 34: 590-597.
- Ramasamy S, ten Berge HFM, Porushothaman S (1997) Yield formation in rice in response to drainage and nitrogen application. *Field Crops Research* 51: 65-82.
- Ritzema, H. P. (Ed.) (1994) *Drainage Principles and Applications*, Second edition, ILRI Publ. 16, The Netherlands, 1994, 1066 pp.
- Sainz RRH, Echeverría HE, Barbieri PA (2004) Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in Irrigated No-tillage Maize. *Agron. J.* 96: 1622-1631.
- SARH (1977) Estudio Agrológico y agronómico detallado para establecimientos de cultivos y frutales en las áreas de riego de la primera fase del Plan Chontalpa, Tabasco, México: Comisión del Río Grijalva. 105 pp.
- Scholefield D, Tyson KC, Garwood EA, Armstrong AC, Hawkins J, Stone AC (1993) Nitrate leaching from grazed grassland lysimeters: effects of fertilizer input, field drainage, age of sward and patterns of weather. *J. Soil Sci.* 44: 601-613.
- Skaggs RW, Gilliam JW (1981) Effect of drainage system design and operation on nitrate transport. *Transactions of the ASAE* 24: 929-940.
- Smith CJ, Dunin FX, Zegelin SJ, Poss R (1998) Nitrate leaching from a Riverine clay soil under cereal rotation. *Australian Journal Agricultural Research* 49: 379-389.
- Smith CJ, Dunin FX, Poss R, Angus JF (2000) Nitrogen budget of wheat growing on a Riverine clay soil. *Aust. J. Agric. Res.* 51: 867-876.
- Stoddard CS, Grove JH, Coyne MS, Thom WO (2005) Fertilizer, tillage, and dairy manure contributions to nitrate and herbicide leaching. *J. Environ Qual.* 34: 1354-1362.
- Trujillo NA, Palma LDJ (1988) Estudio agroecológico detallado del CECAIDES-CP. Área del Trapecio Km 21. Colegio de Postgraduados. H. Cárdenas, Tabasco. pp. 57-68.
- Turtola E, Paajanen A (1995) Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil. *Agricultural Water Management* 28: 295-310.

