

BALANCE DE NITRÓGENO EN MAÍZ FORRAJERO CON DIFERENTE FERTILIZACIÓN Y FASE DE ROTACIÓN CON PRADERAS

NITROGEN BALANCE IN FORAGE MAIZE WITH DIFFERENT FERTILIZATION AND PHASE OF CROP ROTATION WITH PASTURES

Ricardo Améndola-Massiotti^{1*}, Irack Cach-Gómez¹, Edna Álvarez-Sánchez¹, Irineo López-Cruz², Juan Burgueño-Ferreira³, Pedro Martínez-Hernández¹, David Cristóbal-Acevedo¹

¹Posgrado en Producción Animal, PUIS Forrajes, ²Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México-Texcoco. 56230. Texcoco, Estado de México. ³Estadística, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (r_amendola@yahoo.com).

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar el balance de nitrógeno (N) en el suelo durante un ciclo de cultivo de maíz forrajero (*Zea mays* L.), en diferentes fases de una rotación con praderas (UP) y con diferentes dosis de fertilización con N (FN). Se evaluaron nueve tratamientos producto de la combinación de dos factores con tres niveles cada uno: 1) FN: 0 (N₀), 100 (N₁₀₀) y 200 (N₂₀₀) kg N ha⁻¹; y 2) UP: tres y medio años de alfalfa (*Medicago sativa* L.) asociada con ovillo (*Dactylis glomerata* L.) (P); tres años de alfalfa asociada con ovillo y un ciclo de avena (*Avena sativa* L.) asociada con ballico (*Lolium multiflorum* Lam.) (PA); y dos y medio años de alfalfa asociada con ovillo, un ciclo de maíz y uno de avena asociada con ballico (PMA). El diseño experimental fue parcelas divididas en bloques al azar con tres repeticiones con UP como parcela grande y FN parcela chica. Se midió extracción de N por el cultivo, lixiviación de N y contenido de N en suelo. El UP no afectó ($p > 0.05$) ninguna de las variables; FN tuvo efecto lineal ($p \leq 0.05$) sobre extracción de N (en N₀ 274 ± 15 kg N ha⁻¹, 44.9 % menor que N₂₀₀) y lixiviación de N (98 ± 19 kg N ha⁻¹ en N₁₀₀, 73 % menor que N₂₀₀). Los niveles de efecto aparente de la fertilización y eficiencia de utilización del fertilizante fueron aceptables, pero la fertilización no fue económicamente recomendable. La fertilización aumentó la cantidad de N lixiviado, lo cual es ecológicamente desfavorable. Durante el ciclo de cultivo de maíz se redujo la cantidad de N en el suelo, lo que destaca la importancia de las praderas de leguminosas asociadas con gramíneas, para conservar altos niveles de productividad en esta rotación.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the nitrogen (N) balance in soil during a crop cycle of forage maize (*Zea mays* L.), in different phases of a rotation with pastures (PU) and with different rates of N fertilization (NF). Nine treatments derived from the combination of two factors with three levels each were evaluated: 1) NF: 0 (N₀), 100 (N₁₀₀) and 200 (N₂₀₀) kg N ha⁻¹; and 2) PU: three and a half years of alfalfa (*Medicago sativa* L.) associated with orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) (P); three years of alfalfa associated with orchardgrass and a cycle of oats (*Avena sativa* L.) associated with ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) (PA); and two and a half years of alfalfa associated with orchardgrass, a cycle of maize and a cycle of oats associated with ryegrass (PMA). The experimental design was split-plots in a randomized block design with three repetitions with UP as a large plot and NF as a small plot. Measurements included N extraction by the crop, N leaching and soil content. PU did not affect ($p > 0.05$) any of the variables; NF had a linear effect ($p \leq 0.05$) on the extraction of N (in N₀ 274 ± 15 kg N ha⁻¹, 44.9 % less than N₂₀₀) and leaching of N (98 ± 19 kg N ha⁻¹ in N₁₀₀, 73 % less than N₂₀₀). The levels of apparent effect of fertilization and fertilizer use efficiency were acceptable, but fertilization was not economically advisable. Fertilization increased the amount of N leached, which is ecologically unfavorable. During the growing season of maize the amount of N in the soil was reduced, emphasizing the importance of legume pastures associated with grasses, to maintain high levels of productivity in this rotation.

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: Julio, 2010. Aprobado: Diciembre, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 45: 177-193. 2011.

Key words: *Zea mays* L., crop rotation, nitrogen balance, forage maize.

Palabras clave: *Zea mays* L., rotación de cultivos, balance de nitrógeno, maíz forrajero.

INTRODUCCIÓN

En zonas templadas de México, el maíz (*Zea mays* L.) forrajero se cultiva en rotación con otras especies para producir una mayor cantidad de forraje en el año (Carpenter-Boggs *et al.*, 2000); en el sistema de producción intensiva de leche en pastoreo, se le rota con praderas anuales de invierno y plurianuales (Améndola y Castro, 2004). Las praderas plurianuales se componen de alfalfa (*Medicago sativa* L.) asociada con ovilla (*Dactylis glomerata* L.); las anuales de invierno, de avena (*Avena sativa* L.) con ballico anual (*Lolium multiflorum* Lam.). La duración de las praderas plurianuales es de tres a cuatro años y la de los ciclos de praderas anuales con maíz es de dos años. Tomando en cuenta la variación en duración de las praderas perennes y la inclusión de dos años de cultivos anuales, el cultivo de maíz puede tener lugar en diferentes fases de la rotación, y por tanto estar antecedido por distintos usos previos (UP), con un posible aprovechamiento potencial de nitrógeno (N) disponible en el suelo por parte del cultivo. Las praderas anuales y el maíz reciben la fertilización nitrogenada (FN) necesaria para un alto rendimiento (Whitehead, 2000; Sainz *et al.*, 2004), pero se requieren estrategias para optimizar la eficiencia de utilización de N (Devereux *et al.*, 2008).

En las rotaciones de maíz con praderas anuales y plurianuales, el contenido de N en el suelo puede reducirse por efecto de la extracción por las plantas de maíz, lixiviación, desnitrificación y volatilización del N (Carpenter-Boggs *et al.*, 2000). Así, se requiere cuantificar los procesos de ganancias y pérdidas de N en estas rotaciones para mejorar el manejo de los recursos forrajeros y la sostenibilidad del sistema de producción (Kumar y Goh, 2000; Domingo-Olivé *et al.*, 2005).

El presente estudio se hizo con un sistema de rotación de praderas y cultivos donde las duraciones de ambas fases pueden variar, generando diferencias en el balance de N. Se inició con una misma pradera sometida a rotaciones con diferente duración e identificadas como usos previos de suelo (UP). El objetivo del estudio fue evaluar el balance de N en el suelo durante el período del cultivo de maíz forrajero, con distintas dosis de fertilización nitrogenada (FN) y

INTRODUCTION

In temperate zones of México, forage maize (*Zea mays* L.) is grown in rotation with other species to produce more forage in the year (Carpenter-Boggs *et al.*, 2000); in the intensive system of milk production under grazing, it is rotated with annual winter pastures and multi-annual pastures (Améndola and Castro, 2004). The multi-annual pastures are composed of alfalfa (*Medicago sativa* L.) associated with orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.); the annual winter pastures of oats (*Avena sativa* L.) with annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.). The duration of multi-annual pastures is three to four years and that of the cycle of annual pastures with maize is two years. Taking into account the variation in duration of perennial pastures and the inclusion of two years of annual crops, the maize crop can take place in different phases of the rotation, and therefore be preceded by several previous uses (PU), with a possible potential use of nitrogen (N) available on the soil by the crop. Annual pastures and maize receive nitrogen fertilization (NF) needed for a high yield (Whitehead, 2000; Sainz *et al.*, 2004), but strategies are required to optimize the efficiency of N utilization (Devereux *et al.*, 2008).

In the rotations of maize with annual and multi-annual pastures, the N content in soil can be reduced due to the extraction by maize plants, leaching, denitrification and volatilization of N (Carpenter-Boggs *et al.*, 2000). Thus, it is necessary to quantify the processes of gains and losses of N in these rotations in order to improve the management of forage resources and the sustainability of the production system (Kumar and Goh, 2000; Domingo-Olivé *et al.*, 2005).

This study was carried out with a rotation system of pastures and crops where the duration of both phases can vary, generating differences in the N balance. It began with a single pasture subjected to rotations with different duration and identified as previous uses of land (PU). The aim of this study was to evaluate the N balance in soil during the period of the forage maize growing, with different rates of nitrogen fertilization (NF) and PU, to identify crop management alternatives to increase their profitability and sustainability. The experimental site was subjected to management since fall 2002 to

UP, para identificar alternativas de manejo del cultivo que aumenten su rentabilidad y sostenibilidad. El sitio experimental fue sometido a manejo desde el otoño del 2002 al otoño del 2006 (cuatro años), pero la información de este artículo comprende el período más relevante para los objetivos (la fase cultivo de maíz 2006).

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó de mayo de 2005 a octubre de 2006 en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Estado de México, México, a 19° 29' N, 98° 54' O y una altitud de 2250 m. El clima del área de estudio es templado subhúmedo, con lluvias en verano y niveles de precipitación y temperatura media anual de 636.5 mm y 15.2 °C (García, 1987). El suelo del sitio experimental se clasifica como Argiustol Vértico profundo (Cachón *et al.*, 1974); y según las metodologías indicadas en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAP, 2002), de 0 a 30 cm presenta textura migajón arcilloso (43.8 % arena, 28.4 % limo, 27.8 % arcilla), densidad aparente 1.3 g cm⁻³, 30 % y 15 % de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, pH 6.9 (en agua, relación 1:2), conductividad eléctrica 253 μS (relación 1:5), 2.49 % de materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black; en la profundidad de 30 a 60 cm el suelo es migajón arcilloso (42.2 % arena, 28.0 % limo, 29.8 % arcilla), con densidad aparente 1.2 g cm⁻³, 14 y 29 % de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, pH 7.1 (en agua, relación 1:2), conductividad eléctrica 241 μS (relación 1:5), y 1.58 % de MO (Walkley y Black).

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos resultaron de la combinación de: 1) FN: 0 (N₀), 100 (N₁₀₀) y 200 (N₂₀₀) kg N ha⁻¹ como urea (46 % N); 2) UP: tres y medio años de alfalfa asociada con ovillo (P), tres años de alfalfa asociada con ovillo y un ciclo de avena asociada con ballico (PA), y dos y medio años de alfalfa asociada con ovillo, un ciclo de maíz y uno de avena asociada con ballico (PMA). El diseño experimental fue parcelas divididas en bloques al azar con UP como parcela grande y FN como parcela chica, con tres repeticiones, con unidades experimentales de 54 m².

El experimento se efectuó en un potrero de 0.39 ha con una pradera de alfalfa asociada con ovillo, sembrada en el otoño de 2002. Para implementar los tratamientos de UP como fases en una rotación de praderas y cultivos forrajeros, en 2005, en las parcelas con PMA se sembró maíz en la primavera y en el otoño, avena asociada con ballico; en las parcelas con PA se sembró avena asociada con ballico en el otoño del

fall 2006 (four years), but information in this article covers the most relevant period for the objectives (the maize growing phase 2006).

MATERIALS AND METHODS

The experiment was carried out from May 2005 to October 2006 in the Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Estado de México, México, located at 19° 29' N, 98° 54' W and 2250 m altitude. The study area has a temperate sub-humid climate with summer rains, levels of rainfall and mean annual temperature are 636.5 mm and 15.2 °C (García, 1987). The experimental site soil is classified as deep Vertic Argiustol (Cachón *et al.*, 1974); and according to methodologies indicated in the NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAP, 2002), from 0 to 30 cm presents a clay loam texture (43.8 % sand, 28.4 % silt, 27.8 % clay), bulk density 1.3 g cm⁻³, 30 % and 15 % of field capacity and permanent wilting point, pH 6.9 (in water, ratio 1:2), electric conductivity 253 μS (ratio 1:5), organic matter (OM) 2.49 % by the Walkley and Black method; at the depth of 30 to 60 cm soil is clay loam (42.2 % sand, 28.0 % silt, 29.8 % clay) with bulk density 1.2 g cm⁻³, 14 and 29 % of field capacity and permanent wilting point, pH 7.1 (in water, ratio 1:2), electric conductivity 241 μS (ratio 1:5), and 1.58 % of OM (Walkley and Black).

Treatments and experimental design

The treatments were a combination of: 1) NF: 0 (N₀), 100 (N₁₀₀) and 200 (N₂₀₀) kg N ha⁻¹ as urea (46 % N); 2) PU: three and a half years of alfalfa associated with orchardgrass (P), three years of alfalfa associated with orchardgrass and an oat cycle associated with ryegrass (PA), and two and a half years of alfalfa associated with orchardgrass, a cycle of maize and one of oats associated with ryegrass (PMA). The experimental design was split-plots in a randomized block design with UP as large plot and NF as small plot, with three replicates, with experimental units of 54 m².

The experiment was carried out in a 0.39 ha paddock with a pasture of alfalfa associated with orchardgrass planted in the fall of 2002. To implement the PU treatments as phases in a rotation of pastures and fodder crops, in 2005, in plots with PMA, maize was planted in the spring and in fall oats associated with ryegrass; in plots with PA oats was planted associated with ryegrass in the fall of the same year; where the PU was P, the pasture with orchardgrass was maintained until spring 2006. Upon completion of the previous management allowing to set the PUs as phases of the rotation, the early hybrid maize San Josecito was manually sown on June 11, 2006 with a density of

mismo año; donde el UP fue P, la pradera de alfalfa con ovillo se conservó hasta la primavera de 2006. Una vez realizados los manejos previos que permitieron establecer los UP como fases de la rotación, se sembró manualmente el maíz híbrido precoz San Josecito, el 11 de junio de 2006 con una densidad de 100 000 semillas ha^{-1} y fertilizado acorde a las dosis de FN citadas; la mitad de FN se aplicó al sembrar y el resto cuando las plantas alcanzaron una altura promedio de 0.5 m. El terreno se preparó con barbecho, rastreo cruzado y surcado, con distancia entre líneas de 0.8 m. Se cosechó a los 130 d después de la siembra, en estado del grano entre $\frac{1}{3}$ y $\frac{1}{2}$ de línea de leche.

Se usaron los datos de temperatura diaria media y de evaporación de la Estación Meteorológica de la UACH (a 800 m del sitio experimental) y la precipitación se midió en el sitio experimental.

Variables evaluadas

Nitrógeno en el suelo

La concentración de N total (Nt) y N inorgánico (Ni) en el suelo previo a la siembra, se midió en dos muestras compuestas de suelo por unidad experimental (0 a 30 cm y 30 a 60 cm de profundidad) usando Kjeldahl para Nt, y extracción con KCl 2N para Ni (SEMARNAP, 2002). Al finalizar la cosecha del maíz, se tomaron muestras de suelo compuestas de cada unidad experimental, en las cuales se efectuaron los mismos análisis. Los cambios de concentración de Ni (NO_3^- y NH_4^+) y Nt en el suelo, se calcularon como las diferencias entre las concentraciones al inicio y final del ciclo, considerando el volumen del suelo y su densidad aparente.

Nitrógeno en el suelo en función de UP

Los UP se consideraron como fuente de variación en el contenido de N en el suelo. Para evaluar la contribución de la vegetación residual de praderas y cultivos (UP) al N del suelo, en cada parcela de estos UP se cuantificó la materia seca (MS) de la masa radical y los residuos aéreos aportados al final del ciclo mediante la extracción de monolitos de 0.5 m de ancho, 0.5 m de largo y 0.3 m de profundidad. El contenido de Nt (incluyendo nitratos) en ese material vegetal se determinó por la técnica semimicro-Kjeldahl modificada (Bremmer y Mulvaney, 1982). El producto de la biomasa por el contenido de N se consideró como el aporte de la vegetación residual al contenido de N en el suelo.

Lixiviación de N

Para evaluar la lixiviación de N, en cada unidad experimental se usaron cuatro lisímetros (12.5 cm diámetro; 60 cm largo)

100 000 seeds ha^{-1} and fertilized according to the rates of NF mentioned; half of NF was applied at planting and the remainder when the plants reached an average height of 0.5 m. The field was prepared with plowing, harrowing and furrowing; with row spacing of 0.8 m. Crop was harvested at 130 d after sowing, when the state of the grain was between $\frac{1}{3}$ and $\frac{1}{2}$ of the milk line.

Data of mean daily temperature and evaporation of the Meteorological Station of the UACH (800 m from the experimental site) were used and precipitation was measured at the experimental site.

Evaluated variables

Nitrogen in soil

Total N concentration (Nt) and inorganic N (Ni) in soil before planting, was measured in two composite soil samples per experimental unit (0 to 30 cm and 30 to 60 cm depth) using Kjeldahl for Nt, and extraction with KCl 2N for Ni (SEMARNAP, 2002). After the maize harvest, composite soil samples were taken from each experimental unit to which the same analyses were performed. Concentration changes of Ni (NO_3^- and NH_4^+) and Nt in soil were calculated as differences between the concentrations at the beginning and end of the cycle, considering the soil volume and its bulk density.

Nitrogen in soil as function of PU

PU were considered as source of variation in the N content in soil. To evaluate the contribution of residual vegetation of pastures and crops (PU) to soil N, in each plot of these PUs, the dry matter (DM) of root mass and the aboveground residues provided at the end of the cycle was quantified by removing monoliths of 0.5 m wide, 0.5 m long and 0.3 cm deep. The Nt content (including nitrates) in that plant material was measured with the modified semi-micro-Kjeldahl method (Bremmer and Mulvaney, 1982). The product of biomass by the N content was considered as the contribution of residual vegetation to the N content in soil.

N leaching

To evaluate N leaching, in each experimental unit four lysimeters (12.5 cm diameter, 60 cm long) were used with a container at their base to collect water percolated and filled with soil, minimizing the perturbation of it. The drained water was collected once maize was harvested, its volume and concentration of Ni were measured (SEMARNAP, 2002). The amount of N

con un recipiente en su base para captar el agua percolada y se llenaron con suelo, reduciendo al mínimo la perturbación del mismo. La lámina drenada se recolectó una vez cosechado el maíz, se midió su volumen y se determinó la concentración de Ni (SEMARNAP, 2002). La cantidad de N lixiviado se calculó como el producto del volumen drenado por la concentración de Ni en los lixiviados.

Rendimiento de forraje

El rendimiento de forraje MS de maíz a la cosecha se calculó con la densidad de plantas (plantas ha⁻¹) y el peso de plantas cortadas a 20 cm de altura (kg planta⁻¹) en cuatro muestras de 1 m lineal de surco por unidad experimental. De cada muestra se escogió una planta para conformar una muestra compuesta de cada unidad experimental, en la cual se determinó la concentración de Nt. Para evaluar la biomasa de raíz se extrajo un prisma de suelo de 80 cm de longitud (distancia entre surcos), 12 cm de anchura (distancia entre plantas) y 30 cm de profundidad (Sainju *et al.*, 1998). Las raíces se recuperaron por lavado, se determinó su MS y concentración de Nt. La cantidad de N extraído se calculó como el producto de la masa de forraje y raíz por su concentración de Nt.

Eficiencia de utilización del fertilizante (EUF)

Para evaluar la *EUF* se usó la ecuación: $EUF = (P_F - P_0) / N_F$ (Greenwood y Draycott, 1988); donde, P_F y P_0 son la cantidad de N extraído (kg N ha⁻¹) en la parcela fertilizada y sin fertilizar, y N_F es la cantidad de N aplicado (kg N ha⁻¹). El efecto aparente de la fertilización nitrogenada (*EAFN*, kg MS adicionales kg⁻¹ N aplicado con fertilizante) se calculó con la ecuación de Deenen y Lantinga (1993): $EAFN = (RF_{F2} - RF_1) / (NF_2 - NF_1)$; donde, RF_{F2} es el rendimiento (kg MS ha⁻¹) obtenido con el nivel *F2* de *FN*; RF_1 es el rendimiento (kg MS ha⁻¹) obtenido con el nivel de *F1* de *FN* (menor a *F2*); N_{F1} y N_{F2} son los kg N ha⁻¹ aplicados con *F1* y *F2*.

Balance de nitrógeno (BN)

El BN durante el ciclo del cultivo de maíz forrajero se calculó por los cambios en Nt en suelo, considerando como entradas el N aportado por la fertilización, por los residuos del cultivo anterior y la precipitación pluvial, y como salidas el N removido al cosechar el cultivo (parte aérea y raíces) y el N perdido por lixiviación (Meisinger, 1984). El BN fue la diferencia entre las entradas y las salidas de N.

leached was calculated as the product of the volume drained by the concentration of Ni in the leachates.

Forage yield

The yield of maize forage DM at harvest was calculated with the density of plants (plants ha⁻¹) and weight of plants cut to 20 cm height (kg plant⁻¹) in four samples of 1 linear m of row per experimental unit. From each sample a plant was chosen to form a composite sample of each experimental unit in which the concentration of Nt was determined. To evaluate the root biomass a 80 cm long (distance between rows), 12 cm wide (row spacing) and 30 cm depth soil prism was extracted (Sainju *et al.*, 1998). Roots were recovered by washing, their DM and Nt concentration were measured. The amount of N extracted was calculated as the product of the mass of forage and root by its concentration of Nt.

Fertilizer use efficiency (FUE)

To evaluate the *FUE* the following equation was used: $FUE = (P_F - P_0) / N_F$ (Greenwood and Draycott, 1988); where P_F and P_0 are the amount of N extracted (kg N ha⁻¹) in the fertilized and nonfertilized plot, and N_F is the amount of applied N (kg N ha⁻¹). The apparent effect of nitrogen fertilization (*ANE*, kg DM additional kg⁻¹ N applied with fertilizers) was calculated with the equation of Deenen and Lantinga (1993): $ANE = (FY_{F2} - FY_1) / (NF_2 - NF_1)$; where, FY_{F2} is the yield (kg DM ha⁻¹) obtained with the level *F2* of *NF*; FY_1 is the yield (kg DM ha⁻¹) obtained with the level of *F1* of *NF* (lower than *F2*); N_{F1} and N_{F2} are the kg N ha⁻¹ applied with *F1* and *F2*.

Nitrogen balance (NB)

NB during the cycle of forage maize crop was calculated by changes in Nt in soil, considering as inputs the N supplied by fertilization, by residues of previous crop and precipitation, and as outputs the N removed by harvesting the crop (aboveground parts and roots) and N lost by leaching (Meisinger, 1984). NB was the difference between inputs and outputs of N.

Statistical analysis

For the analysis of variance the statistical model included effects of PU, block, experimental error in large plots, NF, interaction between PU and NF, and experimental error in small plots:

Análisis estadístico

Para el análisis de varianza, el modelo estadístico incluyó efectos de UP, bloque, error experimental en parcelas grandes, FN, interacción entre UP y FN, y error experimental en parcelas chicas:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \rho_j + \gamma_{ij} + \beta_k + (\alpha\beta)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

donde, Y_{ijk} , el valor observado con el i -ésimo UP, j -ésimo bloque y k -ésimo FN; μ , el efecto de la media general; α_i , el efecto de i -ésimo UP; ρ_j , el efecto de j -ésimo bloque; γ_{ij} , el efecto del error experimental en parcela mayor (Error a); β_k , el efecto de k -ésimo FN; $(\alpha\beta)_{ik}$, el efecto de la interacción en el i -ésimo UP y el k -ésimo FN; ε_{ijk} , el efecto del error experimental en parcela menor (Error b); $i = 1, 2$ y 3 (número de UP); $j = 1, 2, 3$ y 4 (número de bloques); $k = 1, 2$ y 3 (número de FN).

El procedimiento MIXED (SAS, 2004) se usó para el análisis de varianza de los datos y las medias se compararon mediante contrastes ortogonales y pruebas de t ($p \leq 0.05$).

Análisis económico

El análisis económico se realizó según la metodología de análisis marginal (CIMMYT, 1988), considerando sólo las diferencias originadas por las distintas tecnologías. Dado que UP no genera diferencias en costos, se tomaron en cuenta sólo los originados por FN (costo del fertilizante y su aplicación) y como beneficio bruto el producto de la venta de maíz picado verde a precios regionales. El nivel de FN_0 se consideró como la tecnología base para comparar la FN. Para efectos de ajuste a condiciones de rendimientos comerciales, se usó el valor de 90 % del rendimiento experimental. Una vez determinado el beneficio neto y el costo de FN, se calculó la tasa marginal de retorno (TMR), se aplicó un análisis de dominancia y se identificaron los niveles de fertilización dominados. El criterio para definir recomendaciones sobre niveles de FN fue la comparación con la tasa de retorno mínima aceptable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura y humedad durante la estación de crecimiento

La estación de crecimiento fue relativamente cálida, la temperatura media mensual entre junio y octubre de 2006 fue 19.1 °C, 2.9 °C más alta que

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \rho_j + \gamma_{ij} + \beta_k + (\alpha\beta)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

where, Y_{ijk} is the value observed with the i^{th} PU, j^{th} block and k^{th} NF; μ , the effect of the overall mean; α_i , the effect of the i^{th} PU; ρ_j , the effect of the j^{th} block; γ_{ij} , the effect of the experimental error in large plot (Error a); β_k , the effect of the k^{th} NF; $(\alpha\beta)_{ik}$, the effect of the interaction in the i^{th} PU and the k^{th} NF; ε_{ijk} , the effect of the experimental error in small plot (Error b); $i = 1, 2$, and 3 (number of PU); $j = 1, 2, 3$, and 4 (number of blocks); $k = 1, 2$ and 3 (number of NF).

The MIXED procedure (SAS, 2004) was used for the analysis of variance and means were compared by orthogonal contrasts and t tests ($p \leq 0.05$).

Economic analysis

The economic analysis was carried out using the method of marginal analysis (CIMMYT, 1988), considering only the differences caused by different technologies. Since PU does not generate differences in costs, only those caused by NF (cost of fertilizer and its application) were taken into account and as gross profit the product from the sale of green, chopped maize at regional prices. The FN_0 level was considered as the basic technology to compare the NF. For purposes of adjustment to conditions of commercial yields, a value of 90 % of the experimental yield was used. Once the net profit and the cost of NF were determined, the marginal rate of return (MRR) was calculated, a dominance analysis was applied and levels of dominated fertilization rates were identified. Criterion for defining recommendations on levels of NF was the comparison with the minimum acceptable rate of return.

RESULTS AND DISCUSSION

Temperature and humidity during the growing season

The growing season was relatively warm; the monthly average temperature from June to October 2006 was 19.1 °C, 2.9 °C higher than the 51-yr average calculated from values reported by García (1987). Precipitation between June and August 2006 (271 mm) was 23 % lower than the 53-yr average calculated with the values reported by García (1987), but September and October were similar to that average. With this evolution of precipitation large differences would not be expected in performance

el promedio de 51 años calculado con los valores reportados por García (1987). La precipitación entre junio y agosto de 2006 (271 mm) fue 23 % menor que el promedio de 53 años calculado con los valores reportados por García (1987), pero la de septiembre y octubre fue similar a ese promedio. Con esta evolución de la precipitación no se esperarían grandes diferencias en rendimiento entre 2006 y un año promedio; pero la menor precipitación entre junio y agosto de 2006 pudo ocasionar que la cantidad de agua percolada, y por consecuencia la de N lixiviado, hayan sido menores que en un año promedio. La evaporación mensual promedio (junio a octubre de 2006) fue 115 ± 20 mm, similar a la de un año promedio.

Rendimiento de forraje y extracción de nitrógeno

La densidad de plantas fue $89\ 453 \pm 5074$ plantas ha^{-1} , sin diferencias ($p > 0.05$) entre tratamientos. El promedio de rendimientos alcanzados en los tratamientos con FN (Cuadro 1) fue similar al promedio de resultados experimentales en México (Núñez *et al.*, 2003) en dos años con diferentes híbridos, una densidad de 80 000 plantas ha^{-1} y FN

between 2006 and an average year; but lower rainfall between June and August 2006 could cause that the amount of percolated water, and consequently that of N leached, would have been lower than in an average year. Average monthly evaporation (June to October 2006) was 115 ± 20 mm, similar to that of an average year.

Forage yield and nitrogen extraction

Plant density was $89\ 453 \pm 5074$ plants ha^{-1} , with no differences ($p > 0.05$) among treatments. The average of yields achieved in the treatments with NF (Table 1) was similar to the average of experimental results in México (Núñez *et al.*, 2003) in two years with different hybrids, a density of 80 000 plants ha^{-1} and NF of 180 kg N ha^{-1} . Besides it was above the average reached in two different years (Cueto *et al.*, 2006), with densities between 90 000 and 210 000 plants ha^{-1} and NF of 125 to 250 kg N ha^{-1} and was similar to the average of data in México (Améndola *et al.*, 2005). This indicates that agricultural practices and growing conditions were adequate and allowed to reach the potential yield of the genotype used in the region.

Cuadro 1. Rendimiento de materia seca de forraje y extracción de nitrógeno por el cultivo de maíz (parte aérea y raíces), con diferente uso previo de suelo y fertilización nitrogenada.

Table 1. Dry matter yield of forage and nitrogen extraction by the maize crop (aboveground and roots), with different previous use of soil and nitrogen fertilization

Fertilización (kg N ha^{-1})	Uso previo de suelo			
	PMA [†]	PA [‡]	p [§]	Promedio ^b
	Rendimiento de materia seca de forraje (kg MS ha^{-1}) \pm EE [□]			
0	15396 \pm 986	16024 \pm 1262	16609 \pm 967	16010 \pm 620c
100	17640 \pm 986	18885 \pm 1262	17622 \pm 967	18049 \pm 620b
200	21212 \pm 986	19613 \pm 1262	19392 \pm 967	20072 \pm 620a
Promedio ^{††}	18083 \pm 890 a	18174 \pm 1153 a	17874 \pm 872 a	
	Extracción de N (kg N ha^{-1}) \pm EE [□]			
0	263 \pm 24	286 \pm 31	274 \pm 24	274 \pm 24c
100	326 \pm 24	346 \pm 31	320 \pm 24	320 \pm 24b
200	424 \pm 24	378 \pm 31	389 \pm 24	389 \pm 24a
Promedio ^{††}	337 \pm 22 a	337 \pm 29 a	328 \pm 22 a	

[†] Dos y medio años de alfalfa con ovillo, un ciclo de maíz y un ciclo de avena con pasto ovillo; [‡] tres años de alfalfa con pasto ovillo y un ciclo de avena con pasto ovillo; [§] tres y medio años de alfalfa con pasto ovillo. ^b Medias con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) en cada variable. [□] Error estándar. ^{††} Medias con diferente letra en una hilera son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) ^{‡‡} Two and a half years of alfalfa with orchardgrass, a cycle of maize and a cycle of oats with annual ryegrass; [§] three years of alfalfa with orchardgrass and a cycle of oats with annual ryegrass; ^b Means with different letter in a column are statistically different ($p \leq 0.05$) in each variable. [□] Standard error. ^{††} Means with different letter in a row are statistically different ($p \leq 0.05$).

de 180 kg N ha⁻¹. Además, fue superior al promedio alcanzado en dos años distintos (Cueto *et al.*, 2006), con densidades de 90 000 a 210 000 plantas ha⁻¹ y FN de 125 a 250 kg N ha⁻¹; y fue similar al promedio de datos en México (Améndola *et al.*, 2005). Esto indica que las prácticas de agronómicas y condiciones de crecimiento fueron adecuadas y permitieron alcanzar el potencial de rendimiento del genotipo utilizado en la región.

El UP no afectó el rendimiento ($p > 0.05$) y sólo el efecto lineal de FN fue significativo ($p \leq 0.05$) (Cuadro 1). No se detectó un efecto cuadrático ($p > 0.05$) de FN en producción de MS, pero sí se alcanzó el máximo potencial de rendimiento del cultivo para la densidad de población ensayada. Soto *et al.* (2002) y Domingo *et al.* (2005) reportan efectos cuadráticos en la respuesta en rendimiento de forraje de maíz a la fertilización nitrogenada; entonces, la ausencia de ese efecto en el presente experimento, aunada a los altos rendimientos alcanzados, implicaría que los demás factores de crecimiento (Soto *et al.*, 2002; Domingo *et al.*, 2005) no fueron limitantes.

La probabilidad de interacción entre UP y FN fue $p = 0.07$, lo cual implica que la respuesta a la fertilización en PMA fue mayor, a pesar que en cada FN no hubo diferencias entre UP. En cada UP la fertilización mostró una respuesta lineal; los coeficientes de regresión de rendimiento sobre N para P y PA (18 y 14 kg MS kg⁻¹ N) fueron similares ($p > 0.05$), en tanto que para PMA (29 kg MS kg⁻¹ N) fue mayor que para P ($p \leq 0.05$). Estos resultados se relacionan con un EAFN promedio de 20.3 ± 11 kg MS kg⁻¹ N, no influido por FN ($p > 0.05$); en concordancia con la ausencia de efecto cuadrático de FN, tampoco fue afectado por UP ($p > 0.05$) debido a que en todos los UP los niveles de N inorgánico en el suelo fueron elevados. Este EAFN coincidió con el observado por Núñez *et al.* (2003) en el intervalo de 100 a 200 kg N ha⁻¹ y fue 92 % mayor que el EAFN promedio reportado por Cueto *et al.* (2006). Los altos valores de rendimiento y EAFN confirman que no hubo limitaciones de otros factores de crecimiento.

En el Cuadro 1 se observa que la extracción de N por el cultivo (parte aérea + raíces) no fue afectada por UP ($p > 0.05$), pero FN provocó un efecto lineal significativo ($p \leq 0.05$). La extracción del cultivo en N₀ fue 44.9 % menor que en N₂₀₀, diferencia debida

The PU did not affect the yield ($p > 0.05$) and only the NF linear effect was significant ($p \leq 0.05$) (Table 1). A quadratic effect ($p > 0.05$) of NF on DM production was not detected, but the maximum yield potential of the crop was reached for the population density tested. Soto *et al.* (2002) and Domingo *et al.* (2005) reported quadratic effects in the response in maize forage yield to nitrogen fertilization; then, the absence of this effect in this experiment, together with the higher yields achieved, would imply that other growth factors (Soto *et al.*, 2002; Domingo *et al.*, 2005) were not limiting.

The probability of interaction between PU and NF was $p = 0.07$, implying that the response to fertilization in PMA was higher, although in each NF there were no differences between PUs. In each PU fertilization showed a linear response; regression coefficients of yield on N for P and PA (18 and 14 kg DM kg⁻¹ N) were similar ($p > 0.05$), while for PMA (29 kg DM kg⁻¹ N) was higher than for P ($p \leq 0.05$). These results are related to an average ANE of 20.3 ± 11 kg DM kg⁻¹ N, uninfluenced by NF ($p > 0.05$); in accordance with the absence of quadratic effect of NF, it was neither affected by PU ($p > 0.05$) because in all PU levels of inorganic N in soil were high. This ANE coincided with that observed by Núñez *et al.* (2003) in the range of 100 to 200 kg N ha⁻¹ and was 92 % higher than the average ANE reported by Cueto *et al.* (2006). The higher values of yield and ANE confirm that there were no restrictions of other growth factors.

In Table 1 it is shown that N extraction by the crop (aboveground parts + roots) was not affected by PU ($p > 0.05$), but NF caused a significant linear effect ($p \leq 0.05$). The extraction of the crop in N₀ was 44.9 % lower than in N₂₀₀, difference due to a higher DM production (Table 1) and N concentration in the crop in the highest levels of fertilization. Similar responses were observed by Ma *et al.* (1999) and Sainz *et al.* (2004), although with lower extractions for the same levels of fertilization used in this study. FUE (average 0.6 ± 0.2) was not affected by NF ($p > 0.05$) or by PU ($p > 0.05$) and is within the range of values found by Kumar and Goh (2000) and Urquiaga (2000). The FUE result was due to good agricultural practices and responded to the conditions of low risk of N losses (Kumar and Goh, 2000; Urquiaga, 2000) in this experiment.

a una mayor producción de MS (Cuadro 1) y mayor concentración de N en el cultivo en los niveles más altos de fertilización. Respuestas similares fueron observadas por Ma *et al.* (1999) y Sainz *et al.* (2004), aunque con extracciones menores para los mismos niveles de fertilización usados en el presente estudio. La EUF (promedio 0.6 ± 0.2) no fue afectada por FN ($p > 0.05$) ni por UP ($p > 0.05$) y está dentro del intervalo de valores hallados por Kumar y Goh (2000) y Urquiaga (2000). El resultado de EUF se debió al buen manejo agronómico y respondió a las condiciones de bajo riesgo de pérdidas de N (Kumar y Goh, 2000; Urquiaga, 2000) de este experimento. Valores mayores de EUF se pueden alcanzar sólo al usar fertirrigación.

Lixiviación de nitrógeno

La concentración de Ni en los lixiviados y la lixiviación de N durante el ciclo del cultivo de maíz se presentan en el Cuadro 2. El UP y la FN no afectaron ($p > 0.05$) el volumen promedio de agua percolada ($1103 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), comportamiento similar al reportado por Zhu y Fox (2003). Este resultado era esperable, ya que al estar las parcelas en condiciones similares de precipitación, escorrentía y evapotranspiración (debido a relativamente bajas diferencias en biomasa entre tratamientos), no deberían generarse

FUE higher values can be achieved only when using fertirrigation.

Nitrogen leaching

Ni concentration in the leachate and N leaching during the crop cycle of maize is presented in Table 2. PU and NF did not affect ($p > 0.05$) the average volume of percolated water ($1103 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), a similar response to that reported by Zhu and Fox (2003). This result was expected, since the plots being in similar conditions of precipitation, runoff and evapotranspiration (due to relatively low differences in biomass among treatments), no differences should be generated in the volume of percolated water. UP did not affect ($p > 0.05$) the concentration of Ni in the leachate, whereas NF caused an increase ($p \leq 0.05$) of 57 %, from N_{100} to N_{200} (no leaching was measured in treatments with N_0), which was due to major differences in Ni concentrations that were associated with NF and not with PU (Table 2). Ni concentrations in leachates ranged from 92 to 144 mg L^{-1} for N_{100} and N_{200} , higher than those quantified by Owens (1900) and Nyamangara *et al.* (2003), and also exceeded the maximum permissible limit of nitrates in the percolation water which is 50 mg L^{-1} (De Clercq *et al.*, 2001). These results indicate that the set of measures of the forage maize

Cuadro 2. Influencia del uso previo y la fertilización nitrogenada en la concentración de N inorgánico en lixiviados y lixiviación de N durante el ciclo del cultivo de maíz.

Table 2. Influence of the previous use and the nitrogen fertilization on the concentration of inorganic N in leachates and N leaching during the crop cycle of maize.

Fertilización (kg N ha^{-1})	Uso previo [†]			Promedio [‡]
	PMA	PA	P	
	Concentración de Ni (mg Ni L^{-1}) \pm EE [§]			
100	$105 \pm 19^{\S}$	92 ± 19	78 ± 19	$92 \pm 11\text{b}$
200	158 ± 19	118 ± 19	155 ± 19	$144 \pm 11\text{a}$
Promedio ^b	$131 \pm 13\text{a}$	$105 \pm 13^{\text{a}}$	$117 \pm 13\text{a}$	
	Lixiviación de N (kg N ha^{-1}) \pm EE [§]			
100	$116 \pm 34^{\S}$	105 ± 34	72 ± 34	$98 \pm 19\text{b}$
200	230 ± 34	130 ± 34	150 ± 34	$170 \pm 19\text{a}$
Promedio ^b	$173 \pm 24\text{a}$	$118 \pm 24^{\text{a}}$	$111 \pm 24\text{a}$	

[†] Como se especificó en el Cuadro 1. [‡] Medias en una columna y con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) en cada variable. [§] Error estándar. ^b Medias en una hilera y con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) en cada variable. [‡] As it was specified in Table 1. [‡] Means in a column with different letter are statistically different ($p \leq 0.05$) in each variable. [§] Standard error. ^b Means in a row with different letter are statistically different ($p \leq 0.05$) in each variable.

diferencias en el volumen de agua percolada. El UP no afectó ($p > 0.05$) la concentración de Ni en los lixiviados; en cambio, la FN causó un aumento ($p \leq 0.05$) de 57 %, al pasar de N_{100} a N_{200} (no se midió lixiviación en los tratamientos con N_0), lo cual se debió a que las principales diferencias en concentraciones de Ni se asociaron a FN y no a UP (Cuadro 2). Las concentraciones de Ni en los lixiviados fueron de 92 a 144 mg L^{-1} , para N_{100} y N_{200} , mayores que las cuantificadas por Owens (1990) y Nyamangara *et al.* (2003), y además excedieron el límite máximo permisible de nitratos en el agua de percolación que es 50 mg L^{-1} (De Clercq *et al.*, 2001). Estos resultados indican que el conjunto de medidas de manejo agronómico del maíz forrajero condujeron a niveles excesivamente elevados de Ni en el suelo, situación que se debe a la inclusión de praderas con leguminosas manejadas en pastoreo (retorno de N con orina y heces) y el uso de altos niveles de fertilización química (Whitehead, 2000).

La cantidad de Ni lixiviado no fue afectada por UP ($p > 0.05$), pero aumentó 73 % entre N_{100} y N_{200} FN ($p \leq 0.05$), en correspondencia con diferencias en las concentraciones de Ni. Las pérdidas de N por lixiviación fueron mayores que las encontradas por Zhu y Fox (2003) de 11, 41 y 135 kg N ha^{-1} para niveles de fertilización de 0, 100 y 200 kg N ha^{-1} (resultado que indica pérdidas por lixiviación con el uso de leguminosas), y por Nyamangara *et al.* (2003), quienes reportan 56 kg N ha^{-1} con una dosis de 120 kg N ha^{-1} . Las altas pérdidas por lixiviación en este estudio pueden deberse a los altos niveles de fertilidad inicial y a la elevada cantidad de agua percolada.

Nitrógeno en el suelo

Nitrógeno inorgánico

Antes de la siembra de maíz, la cantidad de Ni en el estrato 0 a 30 cm ($172 \pm 14 \text{ kg N ha}^{-1}$) fue mayor ($p \leq 0.05$) que la encontrada en el estrato 30 a 60 cm ($120 \pm 14 \text{ kg N ha}^{-1}$), y en ambos no hubo efecto ($p > 0.05$) de UP. La mayor cantidad de Ni en el estrato superior se debió a las mayores cantidades de materia orgánica y aportes de residuos de cosecha, por lo que aún sin fertilización se acumuló Ni en el suelo. En ambos casos el contenido de Ni fue muy alto (SEMARNAP, 2002).

crop management led to excessively high levels of Ni in soil, situation that is due to the inclusion of grazed pastures with legumes (return of N with urine and feces) and the use of high levels of chemical fertilization (Whitehead, 2000).

The amount of Ni leached was not affected by PU ($p > 0.05$), but increased 73 % between N_{100} and N_{200} NF ($p \leq 0.05$), corresponding to differences in concentrations of Ni. The losses of N due to leaching were higher than those found by Zhu and Fox (2003) of 11, 41 and 135 kg N ha^{-1} for fertilization levels of 0, 100 and 200 kg N ha^{-1} (result that indicates losses by leaching with the use of legumes), and by Nyamangara *et al.* (2003), who reported 56 kg N ha^{-1} with a rate of 120 kg N ha^{-1} . The high leaching losses in this study may be due to the high levels of initial fertility and the high amount of percolated water.

Nitrogen in soil

Inorganic nitrogen

Before planting maize, the Ni amount in the layer 0 to 30 cm ($172 \pm 14 \text{ kg N ha}^{-1}$) was higher ($p \leq 0.05$) than that found in the layer 30 to 60 cm ($120 \pm 14 \text{ kg N ha}^{-1}$), and in both there was no effect ($p > 0.05$) of PU. The higher amount of Ni in the upper layer was due to higher amount of organic matter and crop residues inputs, so that even without fertilization Ni was accumulated in the soil. In both cases, the Ni content was very high (SEMARNAP, 2002).

The amounts of Ni at the end of the maize cycle were not affected by PU, but there was a linear effect ($p \leq 0.05$) of NF for the layers studied (Table 3). By comparing N_0 with N_{200} , the amount of Ni in soil increased in 0.41 and 0.42 kg of Ni ha^{-1} for each kg of N ha^{-1} applied as fertilizer in the upper and lower strata. The highest concentrations of Ni with higher levels of fertilization, similar effect to that reported by Ma *et al.* (1999) and Carpenter-Boggs *et al.* (2000), were due to mineralization of organic N (Cabrera *et al.*, 2005), since fertilization decreases the C:N ratio of residues and OM, promoting their mineralization. Also, the higher amount of Ni in the 30 to 60 cm layer was due to the lower uptake by the crop and the Ni leaching from the upper layer (Sainju *et al.*, 1998).

Las cantidades de Ni al final del ciclo de maíz no fueron afectadas por UP, pero hubo un efecto lineal ($p \leq 0.05$) de FN para los estratos estudiados (Cuadro 3). Al comparar N_0 con N_{200} , la cantidad de Ni en el suelo aumentó en 0.41 y 0.42 kg de Ni ha^{-1} por cada kg de N ha^{-1} aplicado como fertilizante en los estratos superior e inferior. Las mayores concentraciones de Ni con niveles más altos de fertilización, efecto similar al reportado por Ma *et al.* (1999) y Carpenter-Boggs *et al.* (2000), se debieron a la mineralización del N orgánico (Cabrera *et al.*, 2005), ya que la fertilización disminuye la relación C:N de los residuos y de la MO, favoreciendo su mineralización. Además, la mayor cantidad de Ni en el estrato 30 a 60 cm se originó en la menor absorción por el cultivo y la lixiviación de Ni desde de la capa superior (Sainju *et al.*, 1998).

Nitrógeno total

La cantidad de Nt en la profundidad 0 a 30 cm antes de la siembra de maíz fue mayor ($p \leq 0.05$) que la encontrada en el estrato 30 a 60 cm (Cuadro 4), debido a mayores cantidades de materia orgánica (2.49 % y 1.58 % de 0 a 30 y 30 a 60 cm) y aporte de residuos. La cantidad de Nt antes de la siembra en PMA fue menor ($p \leq 0.05$) en 637 kg Nt ha^{-1} que el promedio de P y PA (no diferentes entre sí). Esta diferencia se debió a que durante el verano previo en PMA se sembró maíz, cultivo altamente demandante

Total nitrogen

The amount of Nt at 0 to 30 cm depth before sowing maize was higher ($p \leq 0.05$) than that found in the 30 to 60 cm layer (Table 4), due to higher amounts of organic matter (2.49 % and 1.58 % of 0 to 30 and 30 to 60 cm) and contribution of residues. The amount of Nt before sowing in PMA was lower ($p \leq 0.05$) in 637 kg Nt ha^{-1} than the average of P and PA (not different from each other). This difference was due to the fact that during the previous summer in PMA, maize was sown, a highly N demanding crop (Sainz *et al.*, 2004). At the 30 to 60 cm depth there was no differences ($p > 0.05$) among PUs, and the average was 3654 kg Nt ha^{-1} .

The amount of Nt, at the end of the maize cycle in the summer of 2006 was not affected ($p > 0.05$) by PU and NF (Table 4). The amount of Nt after the harvest in the 0 to 30 cm layer (in average 4989 ± 131 kg N ha^{-1}), was higher ($p \leq 0.05$) than in the 30 to 60 cm layer (in average 3293 ± 131 kg N ha^{-1}); this difference coincided with that found before sowing and in the average of the experiment (5080 ± 87 and 3437 ± 87 kg N ha^{-1}). This result was expected since the upper layers receive the largest contribution of plant residues and root biomass, main sources of soil N (Whitehead, 2000). According to the averages of Nt at sowing and harvesting in the 0 to 30 layer, the Nt was reduced by 391 kg N ha^{-1} per each increase in the number of annual crop cycles

Cuadro 3. Cantidades de N inorgánico a dos profundidades después de la cosecha del cultivo de maíz con diferente uso previo de suelo y nivel de fertilización nitrogenada.

Table 3. Amounts of inorganic N at two depths after harvesting the maize crop with different previous use of soil and levels of nitrogen fertilization.

Factor	N inorgánico (kg Ni ha^{-1})	
	Profundidad 0 a 30	Profundidad 30 a 60
Uso previo [†]		
P	$324 \pm 16a^{\S}$	$366 \pm 15a$
PA	$327 \pm 20a$	$374 \pm 20a$
PMA	$309 \pm 16a$	$366 \pm 15a$
Nivel de fertilización (kg N ha^{-1})	Profundidad 0 a 30	Profundidad 30 a 60
0	$278 \pm 17c$	$319 \pm 16c$
100	$326 \pm 17b$	$374 \pm 16b$
200	$366 \pm 17a$	$402 \pm 16a$

[†] Como se definió en el Cuadro 1. [§] Medias en una columna y con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) dentro de UP o FN. [‡] As it was defined in Table 1. [§] Means in a column with different letter are statistically different ($p \leq 0.05$) within the PU or NF.

Cuadro 4. Cantidades de N total en el suelo a dos profundidades en el momento de la siembra y después de la cosecha del cultivo de maíz, para diferente uso previo de suelo.**Table 4. Amounts of total N in soil at two depths at the time of sowing and after harvest of the maize crop with different previous uses of soil.**

Uso previo del suelo [†]	N total (kg Nt ha ⁻¹)					
	Profundidad 0 a 30 cm			Profundidad 30 a 60 cm		
	Siembra	Cosecha	Media	Siembra	Cosecha	Media
P	5587	5334	5461±147 a [‡]	3780	3488	3634±147 d [‡]
PA	5318	4788	5067±156 b	3703	2870	3297±156 d
PMA	4823	4546	4685±147 c	3478	3241	3360±147 d

[†] Como se definió en el Cuadro 1. [‡] Medias con distinta literal en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) ❖ [†] As it was defined in Table 1. [‡] Means in a column with different letter are statistically different ($p \leq 0.05$).

de N (Sainz *et al.*, 2004). En la profundidad 30 a 60 cm no hubo diferencias ($p > 0.05$) entre UP, y el promedio fue 3654 kg Nt ha⁻¹.

Las cantidades de Nt, al final del ciclo de maíz en el verano de 2006, no fueron afectadas ($p > 0.05$) por UP y FN (Cuadro 4). La cantidad de Nt después de la cosecha en el estrato 0 a 30 cm (en promedio 4989±131 kg N ha⁻¹), fue mayor ($p \leq 0.05$) que en el estrato 30 a 60 cm (en promedio 3293±131 kg N ha⁻¹), esta diferencia coincidió con la encontrada antes de la siembra y en el promedio del experimento (5080±87 y 3437±87 kg N ha⁻¹). Este comportamiento se esperaba, ya que los estratos superiores reciben el mayor aporte de residuos vegetales y biomasa radical, principales fuentes del N del suelo (Whitehead, 2000). Conforme a los promedios de Nt a la siembra y cosecha en el estrato 0 a 30, el Nt se redujo en 391 kg N ha⁻¹ por cada aumento en número de ciclos de cultivos anuales en el UP; en cambio, la cantidad de Nt en el estrato 30 a 60 no fue afectada por UP. Las diferencias en el estrato superior se debieron primordialmente al mayor número de eventos de labranza que promovieron la oxidación de la materia orgánica fresca (Kumar y Goh, 2000). Además, las praderas plurianuales con leguminosas aportan residuos más ricos en N que las praderas anuales y los cultivos forrajeros (Whitehead, 2000). Cada ciclo de cultivo anual implicó una reducción de aproximadamente seis meses en la duración de las praderas de alfalfa+ovillo, con la consiguiente reducción del aporte de N de la leguminosa.

Considerando ambos estratos (0 a 30 y 30 a 60 cm), se encontró una disminución ($p \leq 0.05$) de 774

in the PU, whereas the amount of Nt in the 30 to 60 layer was not affected by PU. The differences in the upper layer were due mainly to the greatest number of tillage events which promoted oxidation of fresh organic matter (Kumar and Goh, 2000). In addition, the residues of multi-annual pastures with legumes are richer in N than those of the annual pastures and forage crops (Whitehead, 2000). Each cycle of annual crop resulted in a reduction of approximately six months in the duration of pastures of alfalfa+orchardgrass, thereby reducing the N contribution from the legume.

Considering both strata (0 to 30 and 30 to 60 cm) a decrease ($p \leq 0.05$) was found of 774 kg Nt ha⁻¹ between sowing and harvest (of 8904±165 to 8130±157 kg Nt ha⁻¹), which was not influenced ($p > 0.05$) by PU or NF. The absence of differences between treatments in changes in Nt was due to the high variability in soil inherent to this property (Whitehead, 2000). Nt decrease during the maize crop was due to the mineralization of fresh organic matter derived from incorporated residues during and after each crop cycle (Cabrera *et al.*, 2005), since Ni is susceptible to losses by leaching, denitrification and volatilization (Brye *et al.*, 2001). According to Ma *et al.* (1999) and Sainz *et al.* (2004), extraction of N by the crop, which left the system with the harvest, also contributed to this difference. Although NF favored the accumulation of Ni in soil and may have caused higher rates of mineralization, this did not result in significant differences among Nt between treatments, because the amounts of Nt in soil are much higher than those of Ni (Table 3; Table 4).

kg Nt ha⁻¹ entre siembra y cosecha (de 8904±165 a 8130±157 kg Nt ha⁻¹), la cual no fue influenciada ($p>0.05$) por UP ni FN. La ausencia de diferencias entre tratamientos en los cambios en Nt, se debió a la alta variabilidad en el suelo inherente a esta propiedad (Whitehead, 2000). La disminución de Nt durante el crecimiento del cultivo de maíz fue consecuencia de la mineralización de la materia orgánica fresca derivada de residuos incorporados durante y al término de cada ciclo de cultivo (Cabrera *et al.*, 2005), ya que el Ni es susceptible a pérdidas por lixiviación, desnitrificación y volatilización (Brye *et al.*, 2001). De acuerdo con Ma *et al.* (1999) y Sainz *et al.* (2004), la extracción de N por el cultivo, que salió del sistema al realizar la cosecha, también contribuyó a esta diferencia. Aunque la FN favoreció la acumulación de Ni en el suelo y probablemente causó mayores tasas de mineralización, esto no influyó en cambios significativos en el Nt entre tratamientos, debido a que las cantidades de Nt en el suelo son mucho mayores que las de Ni (Cuadro 3; Cuadro 4).

Componentes del balance de nitrógeno

El ingreso de N al sistema con agua de lluvia en el período evaluado fue 9.8 kg N ha⁻¹ (con 3.12 mg Ni L⁻¹), y considerando las diferencias en volumen de precipitación, esta cantidad está dentro del intervalo reportado para esta región por Fenn *et al.* (2002). La incorporación de material vegetal del cultivo antecesor fue de 293 kg N ha⁻¹ para P y 84 kg N ha⁻¹ para PA y PMA. La cantidad de N incorporado en P (similar a la reportada por Carpenter-Boggs *et al.*, 2000) fue mayor que en PMA y PA y se debió a que la pradera de alfalfa con pasto ovido aportó masa vegetal con mayor concentración de N (2.2 %) que la pradera de avena y ballico (1.9 % N). Con este resultado se enfatiza la importante función de la inclusión de leguminosas en las praderas, como una forma de aumentar el N disponible para los cultivos siguientes. En conjunto, las entradas de N al sistema fueron 194 y 294 kg N ha⁻¹ para PA y PMA con N₁₀₀ y N₂₀₀; y 403 y 503 kg N ha⁻¹ para P con N₁₀₀ y N₂₀₀.

En los tratamientos sin FN, el N extraído con la cosecha ascendió a 233 kg ha⁻¹ y esa cantidad aumentó linealmente ($p\leq 0.05$) con 0.615 kg N por cada kg N aplicado con FN. El UP no afectó ($p>0.05$) el N extraído con la cosecha. Las salidas de N, considerando el N extraído con la cosecha y

Nitrogen balance components

Input of N to the system with rainwater during the evaluation period was 9.8 kg N ha⁻¹ (with 3.12 mg Ni L⁻¹), and considering the differences in volume of rainfall, this amount is within the range reported for this region by Fenn *et al.* (2002). The incorporation of plant material of the preceding crop was 293 kg N ha⁻¹ for P and 84 kg N ha⁻¹ for PA and PMA. The amount of N incorporated in P (similar to that reported by Carpenter-Boggs *et al.*, 2000) was higher than in PMA and PA and this was due to the fact that the alfalfa with orchardgrass pasture contributed with residual plant mass with higher concentration of N (2.2 %) than the oats and ryegrass pasture (1.9 % N). This result emphasizes the important role of the inclusion of legumes in pastures, as a way to increase the N available for the following crops. Overall, the N inputs to the system were 194 and 294 kg N ha⁻¹ for PA and PMA with N₁₀₀ and N₂₀₀; and 403 and 503 kg N ha⁻¹ for P with N₁₀₀ and N₂₀₀.

In treatments without NF, N extracted by harvest amounted to 233 kg ha⁻¹ and that amount increased linearly ($p\leq 0.05$) with 0.615 kg N for each kg N applied with NF. The PU did not affect ($p>0.05$) the N removed by the harvest. The outputs of N, considering the N removed by harvest and leaching (not measured in N₀) were not affected by PU ($p>0.05$) and increased with NF from 388 to 528 kg N ha⁻¹, when moving from 100 to 200 kg N ha⁻¹. Nt in soil (0-60 cm) was reduced 774±700 kg N ha⁻¹ without effect of PU or NF ($p>0.05$), but from this reduction must be discounted the N retained in roots and aboveground residues of maize. The negative values of NB (Table 5) indicate that in this rotation phase there was a reduction of reserves of fresh organic N of soil (or from the fresh organic matter) due to a natural process of mineralization (Kumar and Goh, 2000; Cabrera *et al.*, 2005). This process is derived from the accumulated contributions of plant residues characteristic of the crop rotation according to the PU which, together with the tillage practices promote a greater or lesser movement of soil and thus the vulnerability of the fresh organic matter (and therefore the organic N). This allows a major access to the attack of degrading microorganisms (Carpenter-Boggs *et al.*, 2000; Cabrera *et al.*, 2005) and facilitates the losses by denitrification, volatilization and leaching. Negative

el lixiviado (no se midió en N_0), no fueron afectadas por UP ($p > 0.05$) y aumentaron con FN de 388 a 528 kg N ha⁻¹, al pasar de 100 a 200 kg N ha⁻¹. El Nt en el suelo (0-60 cm) se redujo 774±700 kg N ha⁻¹ sin efecto de UP ni FN ($p > 0.05$), pero de esta reducción se debe descontar el N conservado en las raíces y los residuos aéreos del maíz. Los valores del BN negativos (Cuadro 5), indican que en esta fase de la rotación hubo una reducción de las reservas del N orgánico fresco del suelo (o de la materia orgánica fresca), debido a un proceso natural de mineralización (Kumar y Goh, 2000; Cabrera *et al.*, 2005). Este proceso se deriva de los aportes acumulados de los residuos vegetales propios de la sucesión de cultivos según el UP que, en conjunto con las prácticas de labranza, promueven un mayor o menor movimiento del suelo y con ello la desprotección de la materia orgánica fresca (y por tanto del N orgánico). Esto permite un mayor acceso al ataque de los microorganismos degradadores (Carpenter-Boggs *et al.*, 2000; Cabrera *et al.*, 2005) y facilita las pérdidas por desnitrificación, volatilización y lixiviación. En el BN negativo también influyó la salida del N del sistema por la extracción del cultivo de maíz, altamente demandante de N.

Evaluación económica

El análisis marginal, derivado de los tratamientos ensayados (Cuadro 6), aplicando la metodología de CIMMYT (1998), mostró que el incremento del

NB was also influenced by the N outcome from the system by extraction of the maize, a highly N demanding crop.

Economic evaluation

Marginal analysis, derived from the treatments tested (Table 6), applying the methodology of CIMMYT (1998), showed that increasing the level of fertilization increased the total costs and when comparing the net benefits (analysis of dominance), N_{100} and N_{200} were dominated by N_0 in each PU. The value of the additional cost of N fertilization showed that moving from N_0 to N_{100} , in PMA, there was an additional cost of \$1349, with loss in the net benefits (difference of benefits between N_{100} and N_0) of \$339. Although N_{100} produced higher yields and higher gross benefits than N_0 , the costs associated with the practice of fertilizing were high enough to make uncertain the economic viability of this practice; considering the minimum rate of return (MRR), 25 % of each invested peso would be lost. In all cases the MRR for N_{100} and N_{200} were negative and did not exceed the minimum acceptable rate of return of 50 %. According to CIMMYT (1998), 50 % is the acceptable level of MRR that should be chosen for adjustment to common agricultural practices (fertilization), since most of producers have no access to institutional credit.

Based on the marginal analysis, there was no economic benefit from fertilizing the three PU;

Cuadro 5. Balance de N en un ciclo de cultivo de maíz forrajero con diferentes usos previos del suelo y nivel de fertilización nitrogenada, para una profundidad del suelo de 0 a 60 cm.

Table 5. N balance in a cycle of forage maize crop with different previous uses of soil and levels of nitrogen fertilization, for a soil depth of 0 to 60 cm.

Fertilización (kg N ha ⁻¹)	Uso previo de suelo [†]			
	PMA	PA	P	Promedio [‡]
	Balance de N (kg N ha ⁻¹)			
0	-403±366	-1448±460	-504±366	-785±230a
100	-435±366	-912±460	-777±366	-708±230a
200	-701±366	-1538±460	-353±366	-864±230a
Promedio [§]	-513±211a	-1299±279a	-545±211a	

[†] Como se especificó en el Cuadro 1. [‡] Medias en una columna y con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). [§] Medias en una hilera y con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). [¶] As it was specified in Table 1. [¶] Means in a column with different letter are statistically different ($p \leq 0.05$). [§] Means in a row with different letter are statistically different ($p \leq 0.05$).

Cuadro 6. Tasa marginal de retorno (TMR) de la fertilización nitrogenada (FN) en cada uso previo de suelo (UP).
Table 6. Marginal rate of return (MRR) of nitrogen fertilization (NF) in each previous uses of soil (PU).

UP-FN	Rendimiento (t ha ⁻¹) [†]	Beneficio bruto (\$ ha ⁻¹) [‡]	Costos (\$ ha ⁻¹) [§]	Beneficio neto (\$ ha ⁻¹) [¶]	TMR (%) [□]
PMA-0	46.2	6928	0	6928	-
PMA-100	52.8	7938	1349	6589	-25
PMA-200	63.6	9545	2678	6867	-5
PA-0	48.0	7211	0	7211	-
PA-100	56.7	8498	1349	7149	-5
PA-200	58.8	8826	2678	6148	-80
P-0	49.8	7474	0	7474	-
P-100	52.8	7930	1349	6581	-66
P-200	58.2	8727	2678	6048	-107

[†] Forraje con 70 % de humedad. [‡] Precio de \$150 t⁻¹ maíz fresco en pie. [§] Costos de fertilización, con precio de \$2770 t⁻¹ de sulfato de amonio (21 % N) y costo de mano de obra de \$30 y \$40 ha⁻¹ para N₁₀₀ y N₂₀₀. [¶] Diferencias entre beneficio bruto y costos entre tratamientos de FN. [□] Porcentaje de la diferencia entre el costo del nivel de fertilización N (100 o 200) y el nivel 0 y la diferencia entre el beneficio neto del nivel de fertilización y el nivel 0. [†] Forage with 70 % humidity. [‡] Price of \$150 t⁻¹ standing fresh weight of maize forage. [§] Fertilization costs, with price of \$2770 t⁻¹ of ammonium sulfate (21 % N) and labor cost of \$30 and \$40 ha⁻¹ for N₁₀₀ and N₂₀₀. [¶] Differences between gross benefit and costs between NF treatments. [□] Percentage of the difference between the cost of the level of N fertilization (100 or 200) and the level 0 and the difference between the net benefit of the level of fertilization and level 0.

nivel de fertilización aumentó los costos totales y al comparar los beneficios netos (análisis de dominancia), N₁₀₀ y N₂₀₀ fueron dominados por N₀ en cada UP. El valor del costo adicional por fertilizar con N mostró que al pasar de N₀ a N₁₀₀, en PMA, hubo un costo adicional de \$1349, con pérdida en los beneficios netos (diferencia de beneficios entre N₁₀₀ y N₀) de \$339. A pesar que N₁₀₀ produjo mayores rendimientos y beneficios brutos más altos que N₀, los costos asociados con la práctica de fertilizar fueron lo suficientemente altos para no garantizar la viabilidad económica de esta práctica; considerando la tasa de retorno mínima (TMR), se perdería 25 % de cada peso invertido. En todos los casos las TMR para N₁₀₀ y N₂₀₀, fueron negativas y no superaron la tasa de retorno mínima aceptable de 50 %. De acuerdo a CIMMYT (1998), 50 % es el nivel de TMR aceptable que debe escogerse para ajustes a prácticas agrícolas comunes (fertilización), ya que la mayoría de productores no tienen acceso a crédito institucional.

Con base en el análisis marginal, no hubo beneficio económico al fertilizar los tres UP; debido al alto costo del fertilizante, los beneficios netos decrecieron a medida que aumentó la FN. Según Kyveryga *et al.* (2007), las TMR altas ocurren cuando el N disponible en el suelo es bajo, pero en el presente experimento la concentración de Ni en el suelo fue alta, lo que resultó en TMR negativas.

due to the high cost of the fertilizer, the net benefit decreased as NF increased. According to Kyveryga *et al.* (2007), high MRRs occur when the available N in soil is low, but in this experiment Ni concentration in soil was high, which resulted in negative MRRs.

CONCLUSIONS

The initial level of inorganic nitrogen in soil available for the maize crop was high in all phases of the rotation (previous uses) evaluated. The nitrogen fertilization increased the yield of maize; the apparent effect of fertilization and the fertilizer-use efficiency were in acceptable levels. However, due to high initial levels of nitrogen in soil and the high cost of fertilizer, the marginal rate of return of fertilization was low, so it is not economically advisable. Fertilization increased the amount of N leached and therefore it was ecologically unfavorable. During the maize crop cycle the amount of nitrogen in the soil was reduced, which stresses the importance of legume pastures associated with grasses to maintain high levels of productivity in this rotation.

—End of the English version—



CONCLUSIONES

El nivel inicial de nitrógeno inorgánico en el suelo disponible para el cultivo de maíz, fue alto en todas las fases de la rotación (usos previos) evaluadas. La fertilización nitrogenada aumentó el rendimiento de maíz; el efecto aparente de la fertilización y la eficiencia de utilización del fertilizante tuvieron niveles aceptables. Sin embargo, debido a los altos niveles iniciales de nitrógeno en suelo y al alto costo del fertilizante, la tasa marginal de retorno de la fertilización fue baja, por lo que no es económicamente recomendable. La fertilización aumentó la cantidad de nitrógeno lixiviado y por tanto fue ecológicamente desfavorable. Durante el ciclo de cultivo de maíz se redujo la cantidad de nitrógeno en el suelo, lo cual destaca la importancia de las praderas de leguminosas asociadas con gramíneas para conservar altos niveles de productividad en esta rotación.

LITERATURA CITADA

- Améndola M., R. D., y R. Castro J. 2004. Modelo de simulación de la respuesta en producción de leche a la fertilización nitrogenada. Memorias de XXXII Reunión Anual. Asociación Mexicana de Producción Animal. Monterrey, N.L. México. pp: 273-276.
- Améndola, R., E. Castillo, and P. A. Martínez. 2005. Country Pasture/Forage Resource Profiles. FAO. <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGP/AGPC/doc/Counprof/mexico> (Consultado: febrero, 2010).
- Bremner J. M., and C. S. Mulvaney. 1982. Total nitrogen. *In*: A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soils Analysis* (Part. 2). Chemical and Microbiological Properties. Am. Soc. Agron. Madison, WI. (Agronomy 9). pp: 595-624.
- Brye, K. R., J. M. Norman, L. G. Bundy, and S. T. Gower. 2001. Nitrogen and carbon leaching in agroecosystems and their role in denitrification potential. *J. Environ. Qual.* 30: 58-70.
- Cabrera, M. L., D. E. Kissel, and M. F. Vigil. 2005. Nitrogen mineralization from organic residues: research opportunities. *J. Environ. Qual.* 34: 75-79.
- Cachón A., H. E., H. Nery G., y E. H. Cuanalo de la C. 1974. Los Suelos del Área de Influencia de Chapingo. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 80 p.
- Carpenter-Boggs, L., J. L. Pikul Jr., M. F. Vigil, and W. E. Riedell. 2000. Soil nitrogen influenced by crop rotation and nitrogen fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2038-2045.
- CIMMYT. 1988. From Agronomic Data to Farmer Recommendations: An Economics Training Manual. Completely revised edition. Mexico, D.F. 75 p.
- Cueto W., J. A., D. G. Reta S., J. L. Barrientos R., G. González C., y E. Salazar S. 2006. Rendimiento de maíz forrajero en respuesta a fertilización nitrogenada y densidad de población. *Rev. Fitotec. Mex.* 29: 97-101.
- De Clercq P., A. C. Gertsis, G. Hofman, S. C. Jarvis, J. J. Neeteson, and F. Sinabell (eds). 2001. *Nutrient Management Legislation in European Countries*. Wageningen Press Wageningen, The Netherlands. 347 p.
- Deenen, P. J. A. G., and E. A. Lantinga. 1993. Herbage and animal production response to fertilizer nitrogen in perennial ryegrass swards. I. Continuous grazing and cutting. *Neth. J. Agr. Sci.* 41: 197-203.
- Devereux A. F., S. Fukai, and N. R. Hulugalle. 2008. The effects of maize rotation on soil quality and nutrient availability in cotton based cropping. *In*: Unkovich, M. J. (ed). *Global Issues Paddock Action*. Proc. 14th Austr. Agron. Conf. Austr. Soc. Agron. Adelaide South Australia. [CD-ROM].
- Domingo-Olivé, F., J. Serra, A. Roselló y N. Teixidor. 2005. Lavado de nitratos en un cultivo de maíz con diferentes tipos de riego. *In*: Samper C., F. J., y A. Paz G. (eds). VII Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada del Suelo. Estudios de la Zona no Saturada del Suelo. ZNS'05. pp: 115-118. http://www.zonanosaturada.com/publics/ZNS05/zns05_web.pdf (Consultado: noviembre, 2010).
- Fenn, M. E., L. I. de Bauer, K. Zeller, A. Quevedo, C. Rodriguez, and T. Hernández-Tejeda. 2002. Nitrogen and sulfur deposition in the Mexico City air basin: impacts on forest nutrient status and nitrate levels in drainage waters. *In*: Fenn, M. E., L. I. de Bauer, and T. Hernández-Tejeda (eds). *Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Ecological Studies Series, Volume 156. Springer-Verlag. NY, USA. pp: 298-319.
- García, E. 1987. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 216 p.
- Greenwood, D. J., and A. Draycott. 1988. Recovery of fertilizer-N by diverse vegetable crops: processes and models. *In*: Jenkinson D. S., and K. A. Smit (eds). *Nitrogen Efficiency in Agricultural Soils*. Elsevier Applied Science. NY, USA. pp: 46-61.
- Kyveryga, P. M., A. M. Blackmer, and T. F. Morris. 2007. Alternative benchmarks for economically optimal rates on nitrogen fertilization for corn. *Agron. J.* 99: 1057-1065.
- Kumar, K., and K. M. Goh. 2000. Crop residues and management practices: Effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery. *Adv. Agron.* 68: 197-319.
- Ma, B. L., L. M. Dwyer, and E. G. Gregorich. 1999. Soil nitrogen amendment effects on seasonal nitrogen mineralization and nitrogen cycling in maize production. *Agron. J.* 91: 1003-1009.
- Meisinger, J. J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil crops systems. *In*: Hauck, R.D. (ed). *Nitrogen in Crop Production*. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI, USA. pp: 391-413.
- Núñez, H. G., E. F. Contreras G., y R. Faz C. 2003. Características agronómicas y químicas importantes en híbridos de maíz para forraje con alto valor energético. *Téc. Pecu. Méx.* 41: 37-48.
- Nyamangara, J., L. F. Bergstrom, M. I. Piha, and K. E. Giller. 2003. Fertilizer use efficiency and nitrate leaching in a tropical sandy soil. *J. Environ. Qual.* 32: 599-606.
- Owens, L. B. 1990. Nitrate-nitrogen concentration in percolate from lysimeter planted to a legume-grass mixture. *J. Environ. Qual.* 19: 131-135.

- Sainju, U. M., B. P. Singh, and W. F. Whitehead. 1998. Crop root distribution and its effects on soil nitrogen cycling. *Agron. J.* 90: 511-518.
- Sainz R., H. R., H. E. Echeverría, and P. A. Barbieri. 2004. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. *Agron. J.* 96: 1622-1631.
- Soto O., P., E. Jahn B., y S. Arredondo S. 2002. Población y fertilización nitrogenada en un híbrido de maíz para ensilaje en el Valle Central regado. *Agric. Tec. (Chile)* 62: 255-265.
- Statistical Analysis System (SAS). 2004. SAS/STAT 9.1 User's Guide. SAS Publishing, Cary, North Carolina, USA. 5180 p.
- Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio muestreo y análisis. Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial, martes 31 de diciembre de 2002. Segunda Sección. México DF. 85 p.
- Urquiaga, S. 2000. Eficiencia de la fertilización nitrogenada en los principales cultivos anuales. *In:* Urquiaga, S., y F. Zapata (eds). Manejo Eficiente de la Fertilización Nitrogenada de Cultivos Anuales en América Latina y el Caribe. EMBRAPA/ARCAL Boletín Técnico. Río de Janeiro, Brasil. pp: 31-49.
- Whitehead, D. C. 2000. Nutrient Elements in Grassland: Soil-plant-animal Relationships. CAB International. Wallingford, United Kingdom. 369 p.
- Zhu, Y., and R. H. Fox. 2003. Corn-soybean rotation effects on nitrate leaching. *Agron. J.* 95: 1028-1033.