

Mejoramiento del grado de uso del nitrógeno en maíz mediante técnicas parcelarias de riego por superficie*

Improving the usage level of nitrogen in maize, through surface irrigation plot techniques

Ernesto Sifuentes Ibarra^{1§}, Jaime Macías Cervantes¹, Jesús del Rosario Ruelas Islas², Pablo Preciado Rangel³, Waldo Ojeda Bustamante⁴, Marco Antonio Inzunza Ibarra⁵ y José Alfredo Samaniego Gaxiola⁶

¹Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Carretera Internacional México-Nogales, km 1609, Juan José Ríos, Sinaloa, C. P. 81110. ²Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte-UAS, Calle 16 y Av. Japaraqui, Juan José Ríos, C. P. 81110, Ahome, Sinaloa. ³Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, Ejido Ana, Torreón, Coahuila, México C. P. 27170. ⁴Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C. P. 62550 Jiutepec, Morelos. ⁵Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmosfera-INIFAP. Canal de Sacramento, km 6.5, Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140. ⁶Campo Experimental La Laguna-INIFAP. Blvd. José Santos Valdez 1200 Pte., Col. Centro Matamoros, Coahuila C. P. 27440. [§]Autor para correspondencia: sifuentes.ernesto@inifap.gob.mx.

Resumen

El maíz es uno de los principales cultivos sembrados en el estado de Sinaloa; sin embargo, en esta región la aplicación de riegos se realiza sin considerar las características físicas del suelo incrementando las pérdidas de agua y fertilizantes. Es importante desarrollar tecnologías que permitan optimizar el uso de insumos (agua, fertilizantes, pesticidas) incrementando el potencial productivo de los cultivos y reduciendo los costos de producción, por tal motivo una serie de experimentos se condujeron durante los ciclos otoño-invierno 2006-2007 y 2011-2012 en el INIFAP-CEVAF ubicado en el norte de Sinaloa, México, con el propósito de conocer el efecto del riego por gravedad por diferentes técnicas en la eficiencia de uso del nitrógeno (N) en el cultivo de maíz. Dichos experimentos consistieron en bloques completos al azar con la aplicación de dos sistemas de riego de baja presión (multicompuertas), uno de tubería PVC y el otro de manguera Lay flat en el primer ciclo y tres técnicas de riego por superficie (surcos alternos, camas y reducción de gasto) en el segundo ciclo. Se comprobó que usando el sistema de riego de tuberías multicompuertas y las técnicas de riego implementadas en este estudio fue posible

Abstract

Maize is one of the main crops grown in the State of Sinaloa; however, in this region the application of irrigation is performed without considering the physical characteristics of the soil increasing losses of water and fertilizer. It is important to develop technologies to optimize the use of inputs (water, fertilizers, pesticides) increasing the productive potential of crops and reducing production costs, for this reason a series of experiments were conducted during the 2006-2007 autumn-winter cycles and 2011-2012 in the INIFAP-CEVAF located in the north of Sinaloa, Mexico, in order to know the effect of gravity irrigation by different techniques in use efficiency of nitrogen (N) in the maize crop. These experiments consisted of a randomized complete block to the implementation of two low pressure irrigation systems (multi-gates), one of PVC pipe and the other of Lay flat hose, in the first cycle and three surface irrigation techniques (alternate rows, beds and reducing spending) in the second cycle. It was found that using the pipe multi-gates irrigation system and the implemented irrigation techniques in this study was possible to increase irrigation efficiency on averaged 80% with a gradual increase in the efficiency of

* Recibido: marzo de 2015
Aceptado: julio de 2015

incrementar la eficiencia del riego en promedio 80% con un incremento gradual en la eficiencia del nitrógeno reduciendo las pérdidas de fertilizante y ahorrando volúmenes de agua que puedan utilizarse en escenarios de baja disponibilidad de agua y/o establecimiento de segundos cultivos.

Palabras clave: eficiencia de uso de nitrógeno, sistemas de riego de baja presión, técnicas de riego por superficie.

Introducción

El nitrógeno es uno de los nutrientes primarios que los cultivos requieren en mayores cantidades; sin embargo, su disponibilidad hacia las plantas es influenciada por varios procesos incluyendo la mineralización, inmovilización por plantas o microorganismos, nitrificación y desnitrificación (Tisdale *et al.*, 2005). Además, incrementa el tamaño de la células, área foliar y actividad fotosintética (Hashemi *et al.*, 1994). Por otro lado, su importancia radica en la contaminación ambiental que produce al acumularse en el sub-suelo; así como la generada debido a la desnitrificación (Beukema and Van Der Zaag, 1990). En los últimos 30 años el contenido de nitratos en agua de riego ha incrementado (Vahabzadeh *et al.*, 2006). Por tales motivos estudios realizados muestran el interés de incrementar la eficiencia del uso de nitrógeno para incrementar los rendimientos potenciales de los cultivos, incrementar la fertilidad del suelo y especialmente manejar de manera eficiente el agua de riego y del fertilizante nitrogenado reduciendo principalmente los daños potenciales al medio ambiente y a la economía del productor (Ilen *et al.*, 2004; Muñoz y Hernández, 2004).

En Estados Unidos de América, el cultivo de maíz utiliza la mayor fracción (37 a 51%) del nitrógeno total consumido anualmente, donde el 40-60% es tomado por el cultivo (Grassini and Casman, 2012), una parte queda en el suelo y otra es sujeta a pérdidas potenciales al medio ambiente a través de procesos como volatilización de NH_3 , NO_3^- ; lixiviación, desnitrificación, escurrimiento, emisiones de N_2O (Snyder, C. S. 2012). De acuerdo a Shicheng Zhao and Ping He (2012) la estrategia más lógica para incrementar la eficiencia de uso de nitrógeno es combinar aplicaciones de nitrógeno basal y de cobertura en las etapas de crecimiento más importantes y que a su vez coincidan con la demanda del cultivo y el suministro estacional por parte del suelo.

nitrogen fertilizer reducing losses and saving water volumes that can be used in scenarios of low water availability and establishment of second crops.

Keywords: low pressure irrigation systems, nitrogen use efficiency, surface irrigation techniques.

Introduction

Nitrogen is one of the primary crop nutrients required in higher amounts; however, its availability towards the plants is influenced by several processes including mineralization, immobilization by plants or microorganisms, nitrification and denitrification (Tisdale *et al.*, 2005). It also increases the size of the cells, leaf area and photosynthetic activity (Hashemi *et al.*, 1994). Furthermore, its importance lies in the environmental pollution caused by accumulating in the subsoil; and the generated due to denitrification (Beukema and Van Der Zaag, 1990). In the past 30 years, the nitrate content in irrigation water has increased (Vahabzadeh *et al.*, 2006). For these reasons, studies show the interest of increasing nitrogen use efficiency potential to increase crop yields, increasing soil fertility and especially efficiently manage irrigation water and nitrogen fertilizer primarily reducing potential damage to the environment and the economy of the producer (Ilen *et al.*, 2004; Muñoz and Hernández, 2004).

In the United States, growing maize uses most fraction (37-51%) of total nitrogen consumed annually, where 40-60% is taken up by the crop (Grassini and Casman, 2012), it is in part ground and another is subject to potential losses to the environment through processes such as volatilization of NH_3 , NO_3^- leaching, denitrification, runoff, emissions of N_2O (Snyder, CS 2012). According to Shicheng Zhao and Ping He (2012), the most logical strategy to increase the efficiency of nitrogen use is to combine applications basal nitrogen and coverage in the most important stages of growth and in turn match the growing demand and seasonal supply from the ground.

In Mexico, the efficient use of nitrogen fertilizer generally varies from 40-80% due to factors such as texture or compaction problems, land levelling, and characteristics incorporating crop residues, water application system,

En México, la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado varía en forma general desde 40 hasta 80% debido a factores como textura o problemas de compactación, nivelación del terreno, incorporación y características de los residuos de cultivo, sistema de aplicación del agua, manejo del riego, época de aplicación y fuente de nitrógeno, magnitud de la precipitación, profundidad del sistema radical del cultivo y manejo en general incluido el fitosanitario (Castellanos, 2005). En el norte de Sinaloa, México, las eficiencias de aplicación del riego en maíz son en promedio de 45%, encontrándose las mayores pérdidas por efecto de escurrimientos y percolación (Gutiérrez, 2004; Sifuentes *et al.*, 2010), lo que hace suponer una pérdida similar de nitrógeno con repercusiones en los costos de producción y contaminación de aguas superficiales y subterráneas (Sifuentes, 2007).

De acuerdo a Rimski *et al.* (2002) el transporte de nitratos a través del perfil del suelo se encuentra influenciado no solo por las propiedades del mismo y las dosis de fertilización sino también por el tipo de cultivo y la aplicación de riego observándose las mayores pérdidas de nitrógeno en suelos con contenidos importantes de arenas finas o limos bajo condiciones de riego. Bajo el mismo criterio, Spalding *et al.* (2001) evaluaron durante seis años el impacto del mejoramiento del riego y las prácticas de nutrición (N-NO₃) en los cultivos de maíz y alfalfa utilizando cuatro sistemas de producción (riego convencional en surcos, riego intermitente, aspersión y pivote central) donde redujeron significativamente la lixiviación de N con reducciones menores al 6% en rendimiento.

Actualmente el problema más grave que enfrentan los agricultores es asegurarse que haya suficiente de cada elemento esencial para su utilización óptima en la planta y en sus etapas de desarrollo (Bowen y Bernard, 1990) ya que de forma natural el N sufre transformaciones desde la atmósfera, suelo y planta acentuándose más las pérdidas con prácticas irracionales como el sobre-riego y la sobre-fertilización nitrogenada; tal es el caso del N inmovilizado por microorganismos incorporando N orgánico en compuestos insolubles y por lo tanto no disponibles para las plantas (Tisdale, 2005). Sin embargo, este problema se agrava en suelos altos en MO como los que se someten a labranza cero (Bowen y Bernard, 1990). De tal manera, que el nitrógeno y el manejo del agua son complementarios, por consecuencia, las parcelas con bajas eficiencias de riego bajo altos suministros de nitrógeno pueden tener deficiencias de este elemento reduciéndose las producciones (SIAP, 2010; INIFAP, 2005).

management irrigation, time of application and nitrogen source, amount of precipitation, depth of crop root systems and general management including phytosanitary issues (Castellanos, 2005). In the north of Sinaloa, Mexico, the application of irrigation efficiencies in maize are on average 45%, being the biggest losses as a result of runoff and percolation (Gutiérrez, 2004; Sifuentes *et al.*, 2010), which suggests a similar loss of nitrogen impacts on production costs and pollution of surface and groundwater (Sifuentes, 2007).

According to Rimski *et al.* (2002) transportation of nitrates through the soil profile is influenced not only by its properties and fertilization but also by the type of the crop and, the implementation of major irrigation observed losses of nitrogen in soils with substantial contents of fine sand or silt under irrigation. Under the same criteria, Spalding *et al.* (2001) evaluated for six years, the impact of improved irrigation and nutrition practices (N-NO₃) in maize and alfalfa, using four production systems (conventional furrow irrigation, intermittent irrigation, sprinkler and centre pivot) significantly reducing N leaching with minor reductions in 6% of the yield.

Currently, the most serious problem facing farmers is to ensure that there is enough of each essential element for optimal use on the ground and in their developmental stages (Bowen and Bernard, 1990) as the N naturally undergoes transformations from the atmosphere, soil and plant lost more accentuated with irrational practices such as over-irrigation and nitrogen over-fertilization; such is the case of N immobilized by microorganisms incorporating N organic of insoluble compounds and therefore unavailable for the plants (Tisdale, 2005). However, this problem is aggravated in high soils in organic matter such as undergoing tillage (Bowen and Bernard, 1990). Thus, nitrogen and water management are complementary, consequently, the plots with low irrigation efficiencies under high nitrogen supply may be deficient in this element reducing the yields (SIAP, 2010; INIFAP, 2005).

Fields that have improved irrigation efficiency require less nitrogen, retaining profitable returns, for which it is important that the selection and management of irrigation are adequate (Bauder *et al.*, 2007). Because of this, the present work was to study different techniques of surface irrigation and its effect on the efficient use of nitrogen.

Los campos donde se ha mejorado la eficiencia del riego requieren menos nitrógeno conservando rendimientos rentables, para lo cual es importante que la selección y manejo del riego sean las adecuadas (Bauder *et al.*, 2007). Debido a lo anterior, el presente trabajo consistió en estudiar diferentes técnicas de riego por superficie y su efecto en el uso eficiente del nitrógeno.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló durante los ciclos agrícolas otoño-invierno (OI) 2006-2007 y 2011-2012 en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Juan José Ríos, Guasave Sinaloa, México en los 25° 46' 32" latitud norte y 108° 48' 10" longitud oeste a una altitud de 20 msnm, dentro del Distrito de Riego 075, Río Fuerte el más extenso de México. Esta zona tiene una precipitación anual de 200 a 350 mm, suelos de textura franco arcillosa (50% arcilla, 30% limo y 20% arena), bajos en materia orgánica (menos del 1%) y densidad aparente de 1.2 g cm⁻³.

Durante el primer ciclo (2006-2007) se estableció una parcela de tres hectáreas en dos sistemas de riego de baja presión (multicompuertas), uno de tubería en PVC (MCPVC) y el otro de manguera Lay flat (MCLF), ambos de 6 pulgadas de diámetro y separación de compuertas de 0.75 m. El sistema se instaló de acuerdo a las condiciones topográficas del terreno y al método de siembra. Se adaptó una red de tuberías previamente, instalada en la parcela experimental la cual fue accionada por una motobomba con motor diésel y abastecida por un estanque alimentado directamente de un canal del módulo de riego Batequis. El testigo fue una parcela con riego convencional (RC) en surcos con separación de 0.76 m conectados en canales a cielo abierto. La longitud de los surcos de los dos sistemas de baja presión fue de 120 m, mientras que la de la parcela testigo fue de 100 m.

En las dos parcelas con los sistemas de baja presión se llevó a cabo un diseño de riego por gravedad mediante el programa RIGRAV (Rendón, 1995) para determinar el gasto de riego unitario óptimo (Q_o) y tiempos de riego (Tr) que permitan obtener altas eficiencias de riego para lo cual fue necesario calibrar características hidráulicas del suelo. En el testigo no se realizó ningún diseño, solo se midieron las láminas de riego aplicadas por el regador seleccionando un

Materials and methods

The study was conducted during the autumn-winter crop cycles (OI) 2006-2007 and 2011-2012 in the Fort Valley Experimental Field (CEVAF) of the National Research Institute of Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP), located in "Juan Jose Rivers", "Guasave Sinaloa" Mexico in the 25° 46' 32" north latitude and 108° 48' 10" west longitude at an elevation of 20 meters, within the Irrigation District 075, "Rio Fuerte" the largest in Mexico. This area has an annual rainfall of 200-350 mm, clay loam soil (50% clay, 30% silt and 20% sand), low in organic matter (less than 1%) and bulk density of 1.2 g cm⁻³.

During the first cycle (2006-2007) a plot of three hectares was established in two irrigation low pressure (multi-gates), a PVC pipe (MCPVC) and the other Lay flat hose (MCLF), each with 6 inches in diameter and separation gates of 0.75 m. The system was installed according to the topographical conditions of the terrain and planting method. Adapting a piping system previously installed in the experimental plot which was powered by a diesel engine pump and supplied directly from an irrigation channel module pond Batequis. The control was a plot with conventional irrigation (RC) in rows with spacing of 0.76 m connected in open channels. The length of the grooves of the two low pressure systems was 120 m, while that of the control plot was 100 m.

In both plots with low pressure systems carried out a gravity irrigation design by the RIGRAV program (Rendon, 1995) to determine the optimal spending irrigation unit (Q_o) and run time (Tr) that will generate high irrigation efficiencies for which it was necessary to calibrate soil hydraulic characteristics. In the control no design was made, only the single sheets were measured, which were applied by the sprinkler, selecting one groove in the center of each treatment and taking five equidistant points along the groove where a gravimetric sampling was performed (using auger) in three strata 0-30, 30-6- and 60-90 cm, then depositing the samples in aluminum containers which were dried and weighed.

In order to determine the effect of irrigation efficiency in the efficiency of N, a fertilization program was designed for each treatment. For both systems, the formula 360-60-60 was used for the control formula was used and also for the 430-60-60, i.e., 20% of N units in the control than in the traditional system, with the assumption that by increasing the efficiency in the use of water will increase nitrogen efficiency. In the

surco al centro de cada tratamiento y tomando cinco puntos equidistantes a lo largo del surco donde se realizó un muestreo gravimétrico (usando barrena) en tres estratos de 0-30, 30-6- y 60-90 cm y posteriormente depositando las muestras en contenedores de aluminio las cuales fueron secadas y pesadas.

Para conocer el efecto de la eficiencia del riego en la eficiencia del N, se diseñó un programa de fertilización para cada tratamiento. Para los dos sistemas multicompuertas se usó la fórmula 360-60-60 y para el testigo la fórmula utilizada fue 430-60-60, es decir, 20% más unidades de N en el testigo que en el sistema tradicional, con el supuesto que al aumentar la eficiencia en el uso del agua aumentará la eficiencia del nitrógeno. En los tres tratamientos la aplicación de N y K se aplicó en forma fraccionada en cuatro eventos (25% en cada uno) mientras que las unidades de P totales fueron aplicadas al momento de la siembra (Cuadro 1). La variedad seleccionada fue DK 2020 y se sembró el 15 de diciembre de 2006.

three treatment applying N and K, applied in instalments in four events (25% each) while the total of P units were applied at planting time (Table 1). The variety selected was DK 2020 and was planted on December 15, 2006.

For the second cycle (2011-2012), the treatments consisted of three techniques used surface irrigation (furrow): 1) alternate rows (SA) consisting of watering a groove and the other not, which may reduce the gross sheets implemented without affecting crop production (Webber *et al.*, 2006); 2) beds (CAM) consisting of a furrow of 1.6 m wide and 0.20 m high; which enables a fast horizontal watering (Sifuentes, 2003); 3) reduction of expenditure (RG), reducing step by step the supplied water so that runoff losses at the end of the groove are eliminated and, the percolation losses at the start of the groove are minimized (Lal and Pandya, 1970) and the control (TES). The latter corresponds to conventional furrow

Cuadro 1. Manejo y fuentes de fertilización utilizadas, ciclo otoño-invierno 2006-2007.
Table 1. Management and fertilizer sources usage, fall-winter 2006-2007.

Tratamiento	Requerimiento (kg ha ⁻¹)	Fuentes	Dosis			Etapa fenológica
			%N	%P	%K	
MCPVC	360-60-60	MAP (11-52-00),	25	100	25	Siembra
		sulfato de amonio	25	0	25	V5
		(21-00-00), urea	25	0	25	VT-R1
		(46-00-00),	25	0	25	R3-R4
MCLF	360-60-60	sulfato de potasio	25	100	25	Siembra
		y thiosulfato de	25	0	25	V5
		potasio (KTS)	25	0	25	VT-R1
			25	0	25	R3-R4
RC	430-60-60	MAP (11-52-00),	25	100	25	Siembra
		sulfato de amonio	25	0	25	V5
		(21-00-00), urea	25	0	25	VT-R1
		(46-00-00),	25	0	25	R3-R4
		sulfato de potasio	25	100	25	Siembra
		y thiosulfato de	25	0	25	V5
		potasio (KTS)	25	0	25	VT-R1
			25	0	25	R3-R4

Para el segundo ciclo (2011-2012) los tratamientos utilizados consistieron en tres técnicas de riego por superficie (surcos): 1) surcos alternos (SA) que consiste en regar un surco si y el

irrigation. Each treatment was established on an area of 0.27 hectares (36 rows at 0.76 m with a length of 100 m). The variety selected was Pioneer P3245W, sown on December 2, 2011.

otro no, el cual puede reducir las láminas brutas aplicadas sin afectar la producción del cultivo (Webber *et al.*, 2006); 2) camas (CAM) que consisten en un bordo de 1.6 m de ancho y 0.20 m de alto; el cual permite un rápido mojado horizontal (Sifuentes, 2003); 3) reducción de gasto (RG) el cual consiste en reducir paso a paso el agua suministrada de tal manera que se eliminan las pérdidas por escorrentía al final del surco y las pérdidas por percolación en el inicio del surco se mantienen al mínimo (Lal y Pandya, 1970) y el testigo (TES). Este último corresponde al riego por surcos convencional. Cada tratamiento se estableció en una superficie de 0.27 hectáreas (36 surcos a 0.76 m con una longitud de 100 m). La variedad de maíz seleccionada fue Pioneer P3245W que se sembró el 02 de diciembre de 2011.

En los cuatro tratamientos se aplicó una fertilización base previa a la siembra de 300 kg ha⁻¹ de la mezcla física 30-10-12; la fertilización complementaria considerando el aporte del suelo (108 kg ha⁻¹) y la eficiencia de riego proyectada (CAM 65, SA 70, RG 80 y TES 45%) para cada tratamiento se realizó a base de urea resultando un total de N aplicado de 329, 305, 268 y 475 kg ha⁻¹.

Para determinar la dosis de fertilización nitrogenada en ambos ciclos fue indispensable conocer los requerimientos nutrimentales del cultivo según la etapa de desarrollo y su potencial productivo, así como las características de su sistema radicular, contenido de nitratos en el suelo, contenido de material orgánica y sobre todo el manejo del agua de riego. Por tales motivos en cada ciclo agrícola se realizaron análisis de textura, salinidad y fertilidad y así proceder con una adecuada nutrición del cultivo, calculando las dosis de los nutrimentos con la siguiente ecuación.

$$\text{Dosis} = \frac{\text{Demanda} - \text{Suministro}}{\text{Eficiencia}}$$

Donde: demanda, representa la demanda diaria de cada nutrimento (kg ha⁻¹ día); suministro se refiere al aporte nutrimental del suelo (kg ha⁻¹), estimado a partir del análisis del mismo y la eficiencia al grado de aprovechamiento del nutrimento que depende del sistema de riego, suelo, fuente de fertilizantes, entre otras y su valor escala de 0 a 100%.

Los cultivos se sembraron en seco con una densidad de siembra de 105 000 semillas ha⁻¹ separadas a 12.04 cm y aplicando el riego de germinación en forma inmediata. Cuando el maíz alcanzó 40 cm de altura, se procedió a cultivar y abrir surco en forma simultánea.

In the four treatments, we applied prior to the sowing, a basic fertilization of 300 kg ha⁻¹ of the physical mixture 30-10-12; the supplementary fertilization, considering the contribution to the soil (108 kg ha⁻¹) and the projected irrigation efficiency (CAM 65, SA 70, RG 80 and TES 45%) for each treatment was performed based on urea resulting in a total of N applied of 329, 305, 268 and 475 kg ha⁻¹.

In order to determine the dose of nitrogen fertilization in both cycles was essential to know the nutrient requirements of the crop by stage of development and their productive potential, and the characteristics of their root system, content of nitrates in the soil organic matter content and all the irrigation management. For such reasons, in each growing season texture analysis, salinity and fertility were performed and thus proceed with adequate crop nutrition calculating doses of nutrients to the following equation.

$$\text{Dose} = \frac{\text{Demand} - \text{Supply}}{\text{Efficiency}}$$

Where: demand, represents the daily needs of each nutrient (kg ha⁻¹ day); supply refers to soil nutrient intake (kg ha⁻¹), estimated from the analysis of it and the degree of utilization efficiency of the nutrient which depends on irrigation, soil, fertilizer source, including squill value from 0 to 100%.

The crops were planted in dry, with a seeding density of 105 000 ha⁻¹ to 12.04 cm, applying immediately the germination irrigation. When the maize reached 40 cm height, we proceeded to grow and open a groove simultaneously.

Irrigation scheduling for all treatments was performed using the method of water balance through software irrimodel (Sifuentes *et al.*, 2012) using an integrated model of locally calibrated irrigation scheduling for maize, which estimated the variation of soil moisture in the root zone integrating parameters of soil, plant and climate using the concept of growing degree days. Furthermore, the degree of use of nitrogen was also estimated by the following equation:

$$\text{EUN} = \frac{\text{EXT}}{\text{Total nitrogen}} \times 100$$

Where: EXT is the total nutrient removal by crop (kg ha⁻¹) and total nitrogen represents the contribution of soil and the amount of fertilizer added (kg ha⁻¹).

La programación del riego para todos los tratamientos se realizó con el método del balance hídrico a través del software irrimodel (Sifuentes *et al.*, 2012), utilizando un modelo integral de programación del riego calibrado localmente para el cultivo del maíz, el cual estima la variación de la humedad del suelo en la zona radical integrando parámetros de suelo, planta y clima utilizando el concepto de grados día crecimiento. Por otro lado, también se estimó el grado de uso del nitrógeno mediante la siguiente ecuación:

$$EUN = \frac{EXT}{\text{Nitrógeno total}} \times 100$$

Donde: EXT es la extracción total del nutriente por el cultivo (kg ha^{-1}) y el nitrógeno total representa el aporte del suelo y la cantidad de fertilizante agregado (kg ha^{-1}).

Resultados y discusión

El diseño de riego (inicial y auxilios) durante el primer ciclo (2006-2007) se realizó con el programa RIGRAV donde se simuló la duración del tiempo de riego (T_r), gasto de riego unitario (q_u), coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC), lámina bruta (Lb), eficiencia de aplicación (Ea) y eficiencia de riego (Er), considerando los parámetros que se muestran en el Cuadro 2. En la práctica estos valores pueden ser diferentes a los valores reales de una parcela con la misma textura. Debido a esto, el diseño del riego obtenido con el método directo o simplificado puede implicar que en la práctica el riego se aplique con eficiencias más bajas que las obtenidas por el diseño. Para incrementar estas eficiencias se debe ajustar el diseño en el campo durante la primera "puesta del riego" midiendo el tiempo de avance. Estos valores fueron generados con la calendarización del riego y a las características físicas del suelo. Cabe mencionar que para fines de evaluación las recomendaciones del programa solo fueron aplicadas en los sistemas de baja presión.

Además de estos datos generados por el programa RIGRAV se compararon los tiempos de riego modelados con los tiempos de riego realizados y eficiencias de aplicación las cuales estuvieron dentro del rango recomendado con eficiencias de aplicación fluctuando entre 88 y 90%. El Cuadro 3 muestra las eficiencias obtenidas para dichos tratamientos considerando que al incrementar esta también aumentaría la eficiencia en el uso del nitrógeno.

Results and discussion

The irrigation design (initial and aid) during the first cycle (2006-2007) was performed with the program RIGRAV, where the length of watering time (T_r), unit cost of irrigation (q_u), Christiansen uniformity coefficient (CUC), raw sheet (Lb), application efficiency (Ea) and irrigation efficiency (Er), were simulated considering the parameters shown in Table 2. In practice, these values may differ from the actual values of a plot with the same texture. Because of this, the irrigation design obtained with direct or simplified method may be involve in practice irrigation is applied with lower than those obtained by the design efficiencies. For increasing these efficiencies, it is necessary to adjust the layout in the field during the first "start watering" timing. These values were generated with irrigation scheduling and the physical characteristics of the soil. It is noteworthy that for evaluation program recommendations were only applied in low pressure systems.

Cuadro 2. Parámetros de diseño de riego por gravedad calibrados (RIGRAV).

Table 2. Irrigation design parameters calibrated by gravity (RIGRAV).

Parámetro	Valor
Longitud de riego (m)	120
Pendiente del terreno en sentido del riego (%)	0.02
Gasto de riego unitario (lps m^{-1})	0.6
Contenido de humedad inicial (cm cm^{-3})	0.3
Contenido de humedad a saturación (cm h^{-3})	0.49
Conductividad hidráulica a saturación cm h^{-1}	0.004
Tiempo de impresión de avance (min)	1
Lamina de riego neta (m)	0.08
Coefficiente de rugosidad de manning ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)	0.04
Parámetro de hf de la función de infiltración	158

In addition to the data generated by the program RIGRAV, the times modeled irrigation run times and application efficiencies made which were within the recommended application with efficiencies ranging from 88 to 90% range were compared. Table 3 shows the efficiencies obtained for such treatments to increase considering that this would also increase the efficiency of nitrogen.

The calendar used in this study consisted of four irrigation distributed germination irrigation (irrigation 1) and three aid sixth true leaf stage (V6), watery stage (R2) and milky (R3) (Table 4).

Cuadro 3. Láminas de riego totales y eficiencias de aplicación promedio para los tratamientos.**Table 3. Total watering sheets, and average irrigation application efficiencies for the treatments.**

Tratamiento	Lamina neta total (cm)	Lamina bruta total (cm)	Eficiencia (%)
MCPVC	45.75	60	76.3
MCLF	45.75	55.5	82.4
RC	45.75	78.3	58.5

El calendario usado en dicho estudio consistió en cuatro riegos distribuidos en un riego de germinación (riego 1) y tres auxilios en las etapas sexta hoja verdadera (V6), grano acuoso (R2) y grano lechoso (R3) (Cuadro 4).

In order to determine the degree of use of the main nutrients, the culture was subjected to analysis of growth to every part of the plant to observe the interaction and response to the addition of the nutrients added. It is noted that an interaction occurs

Cuadro 4. Calendario de riego 2006-2007.**Table 4. Irrigation Calendar 2006-2007.**

NR	fecha	IR	DDS	Lamina neta (cm)	GDA	Etapas
1	05/12/06	0	0	15.05	0	-
2	13/02/07	70	70	5.08	410.7	V6
3	23/03/07	38	108	12.52	743.5	R2
4	20/04/07	28	136	13.10	1035.2	R3
Total	-	-	136	45.75	-	-

Con el propósito de conocer el grado de uso de los principales nutrientes, al cultivo se les realizó análisis de crecimiento a cada parte de la planta para observar la interacción y respuesta a la adición de nutrientes agregados. Se observa que una interacción ocurre cuando la respuesta de uno o más insumos agregados en combinación en este caso agua y dosis de fertilizantes es desigual en comparación a la suma de sus respuestas individuales; por tal motivo, antes de la cosecha se determinó la concentración nutrimental en paja y grano para posteriormente estimar las extracciones totales de nutrimentos y proyectar la productividad de dichos nutrientes en la producción de grano ya que de manera general se encontró una diferencia importante en dichas extracciones como se puede observar en los Cuadros 5 y 6.

El nitrógeno está ligado al movimiento del agua en el suelo, ya que a medida que se incrementa la eficiencia de aplicación del riego también incrementa la eficiencia del uso del nitrógeno (Figura 1 y Cuadro 6) como lo señalan Castellanos *et al.* (2005). El grado de uso del nitrógeno se estimó tomando en cuenta el aporte del suelo que para este caso fue de 70 kg y el suministrado por el fertilizante fue de 360 kg. Con respecto al rendimiento obtenido para los tres tratamientos, se observó que fue mayor en el sistema de MC-lay flat con 10.5 t ha⁻¹, seguido del sistema MCPVC con 10 t ha⁻¹ y el menor rendimiento fue en el sistema convencional

when the response of one or more inputs added in combination, in this case water and fertilizer doses is uneven in comparison to the sum of their individual responses; therefore, before harvesting, the nutrient concentration in straw and grain was determined, for later estimate the total removals of nutrients and project productivity of these nutrients in grain production, since generally a significant difference was found in these extractions was determined, as shown in Tables 5 and 6.

Cuadro 5. Extracción nutrimental del maíz bajo diferentes métodos de riego (2006-2007).**Table 5. Nutrient extraction of maize under different irrigation methods (2006-2007).**

Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg
Extracción nutrimental en grano (kg ha ⁻¹)					
MC-Layflat	165	4	11	9	19
MC-PVC	173	4	10	11	13
RC	138	6	9	7	7
Extracción nutrimental en paja (kg ha ⁻¹)					
MC-Layflat	109	6	199	99	53
MC-PVC	110	6	26	70	44
RC	63	3	150	47	18
Extracción total (kg ha ⁻¹)					
MC-Layflat	274	10	209	109	72
MC-PVC	283	10	216	81	57
RC	200	9	159	54	25

con 8.67 t ha^{-1} , lo cual fue debido principalmente a las condiciones de humedad proporcionada en la zona activa radicular. Estos datos además indican que se puede incrementar el potencial productivo del cultivo y ahorrar en costos de insumos así como reducir potencialmente la contaminación de aguas subterráneas ya que las pérdidas de N lixiviado se hacen mayor en el riego convencional como resultado de incrementar la lámina bruta aplicada y que son ampliamente adoptadas resultando en un aumento gradual de la concentración de nitratos en el agua subterránea.

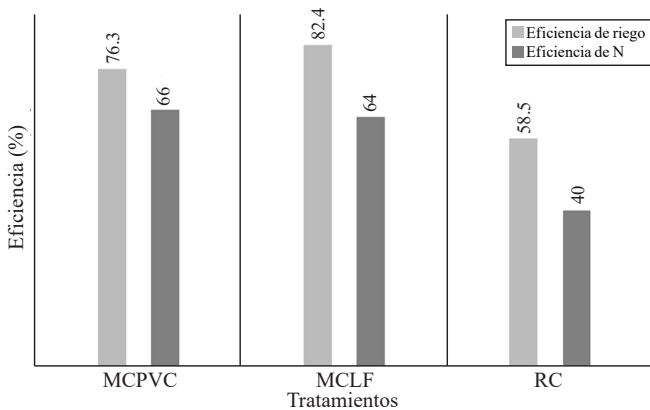


Figura 1. Eficiencia del riego y nitrógeno en dos sistemas de riego de baja presión (MCLF y MCPVC) y en riego convencional (RC) en maíz.

Figure 1. Efficiency of irrigation and nitrogen in two irrigation low pressure (MCLF and MCPVC) and conventional irrigation in maize (RC).

Nitrogen is linked to the movement of water in the soil, because as the irrigation application efficiency increases also increases nitrogen use efficiency (Figure 1 and Table 6) as pointed out by Castellanos *et al.* (2005). The level of nitrogen used was estimated taking into account the contribution of the soil, which in this case was 70 kg and supplied by the fertilizer for 360 kg . With respect to the yield obtained for the three treatments, it was observed that was larger in the system of MC-lay flat with 10.5 t ha^{-1} , followed in the MCPVC system with 10 t ha^{-1} and, the lowest yield was in the conventional system with 8.67 t ha^{-1} , which was mainly due to moisture conditions provided in the active root zone. These data further indicated that it may increase the productive potential of the crop and save on input costs and potentially reduce pollution of groundwater as N leaching losses become higher in the conventional irrigation as a result of increasing the raw sheet applied, widely adopted and resulting in a gradual increase in the concentration of nitrates in groundwater.

For the second cycle, 2011-2012, the irrigation techniques were evaluated by the just established surface, using the same design criteria and irrigation scheduling of the previous study. Table 7 shows a summary of the risks applied for each irrigation technique used with their respective phenological stages coinciding with the critical stages of the crop and growing degree days to predict in advance,

Cuadro 6. Extracción nutricional unitaria del maíz bajo diferentes métodos de riego (2006-2007).

Table 6. Unitary nutrient extraction of maize under different irrigation methods (2006-2007).

Método de Riego	Rendimiento de Grano	N	Extracción P	(kg/t/grano) K	Ca	Mg
MC-PVC	9.7	28	1	22	8	6
MCLF	10.5	26	1	20	10	7
RC	8	23	1	18	6	3

Para el segundo ciclo 2011-2012 se evaluaron las técnicas de riego por superficie anteriormente mencionadas, utilizando los mismos criterios de diseño y calendarización del riego del estudio previo. El Cuadro 7, muestra un resumen de los riegos aplicados para cada técnica de riego utilizada con sus respectivas etapas fenológicas coincidiendo con las etapas críticas del cultivo y grados día crecimiento que permitieron predecir de forma anticipada los requerimientos hídricos y nutrimentales; mientras que en el Cuadro 8 se puede observar las láminas requeridas por el cultivo y las aplicadas así como las eficiencias obtenidas.

allowing water and nutrient requirements; while in Table 8 shows the sheets required for the cultivation and applied and efficiencies achieved.

The Table 9 shows the total extraction of several nutrients at the end of the cycle, used to determine the degree of use of the fertilizer. Similarly in Figure 2, we can observe the grade efficiencies of nitrogen used considering a contribution of 108 kg soil and fertilizer in different supplies. The design beds with a dose of 329 , alternate rows 305 , 268 deficit conventional irrigation and 475 kg ha^{-1} , respectively, and the final yield was 13.31 , 13.11 , 13.17 and 14.6 t ha^{-1} in the same order.

Cuadro 7. Calendario de riegos aplicados 2011-2012.**Table 7. Calendar of the irrigation applied from 2011 to 2012.**

Núm. de riego	Fecha de riego	Días al riego	Intervalo de riego	Etapas fenológicas	Grados día acumulados (GDA)
1	03/12/2012	0	0	0	0
2	22/02/2012	83.00	83.00	V8 (8 hojas)	523.00
3	26/03/2012	116.00	33.00	Flor masculina	787.00
4	25/04/2012	146.00	30.00	Grano lechoso	1109.00

Cuadro 8. Requerimientos hídricos y eficiencias de aplicación.**Table 8. Water requirements and application efficiencies.**

Tratamiento	Lamina neta (cm)	Lamina bruta (cm)	Eficiencia de aplicación (%)
camas	42	60	70
Surco alterno	48.51	63	77
Reducción de gasto	52.8	60	88
Riego convencional	59	118	50

A continuación, el Cuadro 9 muestra las extracciones totales de diferentes nutrimentos al final del ciclo mismos que fueron utilizados para determinar el grado de uso del fertilizante. De la misma manera en la Figura 2 se pueden observar las eficiencias en el grado de uso del nitrógeno considerando un aporte del suelo de 108 kg y diferentes suministros del fertilizante. El diseño de camas con una dosis de 329, surcos alternos 305, riego deficitario 268 y riego convencional 475 kg ha⁻¹ respectivamente y el rendimiento final fue de 13.31, 13.11, 13.17 y 14.6 t ha⁻¹ en el mismo orden.

Conclusions

Using the low pressure irrigation systems with multi-gates MC-PVC and MC-Lay Flat, application efficiencies were obtained on average 80%. In addition, the results showed that, the excess of water dramatically decreased the efficiency of nitrogen, increasing losses due to percolation, which increase the degree of contamination of groundwater; these results were consistent with previous studies made by Pacheco (1998).

Cuadro 9. Extracción nutrimental del maíz bajo diferentes técnicas de riego superficial 2011-2012.**Table 9. Maize nutrient extraction under different surface irrigation techniques 2011-2012.**

Tratamientos	Parte	N	P	K	Ca	Mg
Camas	Grano	179.75	6.15	86.04	21.51	24.58
	Paja	205.24	14.66	498.44	92.85	68.41
	Total	384.99	20.81	584.48	114.36	93.00
Surco alterno	Grano	171.97	5.21	80.77	11.73	22.15
	Paja	144.23	9.62	253.84	46.15	32.69
	Total	316.20	14.83	334.62	57.88	54.84
Reducción de gasto	Grano	180.34	3.98	19.89	13.26	21.22
	Paja	118.43	10.11	205.08	47.66	20.22
	Total	298.77	14.09	224.97	60.92	41.44
Riego convencional	Grano	195.67	7.36	27.95	30.90	22.07
	Paja	154.81	11.47	128.05	55.43	30.58
	Total	350.48	18.82	156.00	86.32	52.65

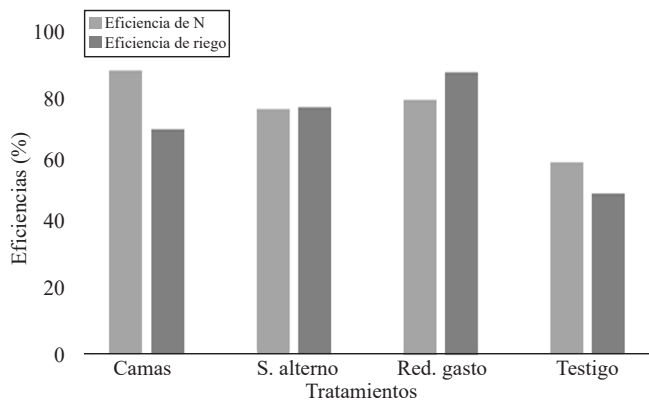


Figura 2. Eficiencia de aplicación del riego y grado de uso de nitrógeno en tres técnicas parcelarias de riego por superficie.

Figure 2. Efficiency of irrigation application and degree of use of nitrogen in three plot surface irrigation techniques.

Conclusiones

Con el uso de los sistemas de riego de baja presión multicompuertas MC-PVC y MC-Lay Flat se obtuvieron eficiencias de aplicación en promedio de 80% respectivamente. Además, los resultados mostraron que exceso de agua aplicados en los riegos disminuye drásticamente la eficiencia del nitrógeno incrementando las pérdidas por percolación, mismas que aumentan el grado de contaminación de aguas subterráneas, estos resultados fueron consistentes a estudios previos realizados por Pacheco (1998).

Los sistemas de riego de baja presión mostraron ser una buena alternativa para la tecnificación del riego a nivel parcelario ya que permite la conducción y distribución del agua de riego dentro del lote mediante tuberías livianas, fáciles de transportar y conectar que trabajan a baja presión a menos de un metro de desnivel y válvulas que permiten regular los caudales de entrega en los surcos y con ello mejorar la eficiencia del riego. Además de estar al alcance de la economía de los productores ya que la mayoría establecen cultivos en superficies mayores a 10 hectáreas, a partir de la cual la inversión tiende a ser menor de \$5 000.00 pesos por hectárea. Con respecto al uso de diferentes técnicas de riego por superficie también se demostró incrementar la eficiencia del riego a nivel parcelario, no obstante reduciendo significativamente las pérdidas de nutrientes fuera de la zona activa radicular como el nitrógeno. También se concluyó que el volumen de agua ahorrado en el uso de estas técnicas puede usarse en escenarios de baja disponibilidad de agua.

Low pressure irrigation systems proved to be a good alternative for technological irrigation at farm level, by allowing the transmission and distribution of irrigation water within the lot by lightweight, easy to carry and connect working at low pressure pipelines with less than a meter of elevation and valves for regulating the flow of delivery in the grooves and thereby improve irrigation efficiency. Besides, being available to the economy of the producers, since most crops established in areas larger than 10 hectares, from which the investment tends to be less than \$5 000.00 pesos per hectare. Regarding the use of different techniques of surface irrigation, it is also showed increasing irrigation efficiency at farm level; however, significantly reducing nutrient losses outside the active root zone as nitrogen. It was also concluded that, the volume of water saved in the use of these techniques can be used in scenarios of low water availability.

End of the English version



Literatura citada

- Bauder, T. A.; Waskom, R. M. and Andales, A. 2007. Nitrogen and irrigation management. Crop Series (Soil). Colorado State University Extension. 247 p.
- Beukema, H. P. and Van Der Zaag, D. E. 1990. Introduction to potato production. Pudoc Wageningen. 413 p.
- Bowen, E. y Bernard, A. 1990. Pérdidas de nitrógeno de los fertilizantes. Agricultura de las Américas. 19-22 p.
- Castellanos, J.; Cueto, W. y Macías, J. 2005. La fertilización en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México. INIFAP-Campo Experimental Bajío. Folleto Técnico Núm. 1.44 p.
- Grassini, P. y Cassman, K. G. 2012. Proceedings of the national academies of science. 109(4):1074-1079 p.
- Gutiérrez, A. 2004. Diagnóstico de la operación de módulos de riego en la zona norte de Sinaloa (Módulo Batequis DR075). Tesis de Licenciatura. Chapingo, México. 1-2 p.
- Hashemi, D. A.; Kocheiki, A. and Banaiyan, A. 1994. Increase Crop Yield. Translation. Mashhad University Press. 76 p.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2005. La fertilización en los cultivos de maíz y trigo en México. Centro de Investigación Regional del centro y campo experimental Bajío. Celaya Guanajuato, México. Folleto técnico Núm. 43. 1:32.
- Llen, B. C.; Rodny, E. W.; Megarbey, R. C.; Coyle, D. R. and Coleman, M. D. 2004. Radiation use efficiency and gas exchange responses to water and nutrient availability in irrigated and fertilized stands of sweet gum and sycamore. Tree Physiology. 25:191-200.
- Muñoz, P. D. y Hernández, R. G. 2004. Situación actual y perspectiva del maíz. Sistema de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)- SAGARPA. 136 p.

- Rimski-Korsakov, H. M. y Torres, R. S. 2002. Influencia de la fertilización y el riego en la lixiviación de nitratos en un suelo arenoso. *In: XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.* 512 p.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera). SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca Y Alimentación)2010(consultado enero,2010). www.siap.gob.mx.
- Sifuentes, I. E.; Ojeda, B. W.; Quintana, Q. J. G y Macías, C. J. 2010. Jornada sobre impacto y adaptación al cambio climático de la agricultura del estado de Sinaloa. *In: Memoria Técnica Núm. 23. Los Mochis Sinaloa México.* 63 p.
- Sifuentes, E.; Macías, C. J.; Ojeda, B. W. y Sánchez, N. 2007. Manejo eficiente de dos sistemas de riego por multicompuertas y su efecto en la nutrición del cultivo del maíz. *In: Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación, A. C. XIV Congreso Nacional de Irrigación. Morelia, Michoacán, México.*
- Shicheng, Z. and Ping, H. 2012. Evaluation of in-season nitrogen management for summer maize in the north china plain. (2):8-10.
- Snyder, C. S. 2012. Are the Midwest corn farmers over applying fertilizer N? Better crops with plant food. A publication of the international plant nutrition institute (IPNI). (2):3-7.
- Spalding, R.; Watts, F.; Darrel, G.; Schepers, J.; Burbach, S. and Mark, E. 2001. Controlling nitrate leaching in irrigated agriculture. *J. Environ. Quality.* 30:1184-1193.
- Tisdale, S.; Havlin, J.; Beaton, J. and Nelson, W. 2005. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management, 7th ed. Upper Saddle River, New Jersey. 554 p.
- Vahabzadeh, M; Ghasemi, M; Kalate, M and Penis, C. P. 2006. Introduction of yellow rust resistant wheat. Fusarium to kill Caspian Coastal Plain Region. Ninth Congress of plant Agriculture. Techrans University. Iran. 336-337 p.