

# Efecto de la distancia entre surcos y densidad de siembra en el rendimiento y calidad del forraje de sorgo

## Effect of row spacing and sowing density on sorghum forage yield and quality

Eduardo Daniel Bolaños-Aguilar<sup>a</sup>, Jean Claude Emile<sup>b</sup>

### RESUMEN

El objetivo fue determinar los cambios en rendimiento de materia seca (RMS) y calidad del forraje de sorgo sembrado en surcos distanciados a 75 y 20 cm, y en densidades de 33 y 65 semillas m<sup>2</sup>, cuando la planta tiene una concentración de materia seca de 300 g kg<sup>-1</sup>. No hubo interacción año x distancia entre surcos en los caracteres, excepto en altura de planta. Efecto de año existió, excepto en concentración de materia seca de la planta (322 g kg<sup>-1</sup>) y en proteína (97.6 g kg<sup>-1</sup>). El RMS por año varió de 10 t (2007) a 17 t ha<sup>-1</sup> (2009), y de 10 a 16.6 t ha<sup>-1</sup> en distancias de 75 y 20 cm, respectivamente. El peso seco de panículas fue 109.4 g y 158.1 g kg<sup>-1</sup> mayor en 2007 que en 2008 y 2009, respectivamente, y el peso de mil granos fue 13.66 g kg<sup>-1</sup> mayor en 2007 que al promedio de los dos años restantes. La digestibilidad fue 89.5 y 39.9 g kg<sup>-1</sup> menor en 2007 y 2008, respectivamente, que en 2009. Hubo correlación entre digestibilidad y cenizas (-0.94\*\*), fibra detergente ácido (-0.93\*\*) y lignina detergente ácido (-0.85\*). La proteína fue 15.2 g kg<sup>-1</sup> mayor en surcos a 25 cm que a 75 cm. No hubo interacción año x densidad de siembra, ni la densidad afectó el RMS ni la calidad del forraje. El RMS y la calidad del forraje de sorgo fueron mejorados al combinar densidad de siembra de 33 semillas m<sup>2</sup> con distancia de 20 cm entre surcos.

**PALABRAS CLAVE:** Calidad del sorgo, Materia seca, Distancia entre surcos, Densidades de siembra.

### ABSTRACT

Sorghum dry matter yield (DMY) and forage quality were evaluated at two row spacings (75 and 20 cm) and two sowing densities (33 and 65 seeds m<sup>-2</sup>), with harvest at a 300 g kg<sup>-1</sup> whole plant dry matter concentration. Trials covered three consecutive growing seasons (2007, 2008 and 2009) with progressively lower annual rainfall. The year x row spacing interaction had no effect on traits, except for plant height. Year did affect the traits, except for whole plant dry matter concentration (322 g kg<sup>-1</sup>) and protein content (97.6 g kg<sup>-1</sup>). Annual DMY ranged from 10 t (2007) to 17 t ha<sup>-1</sup> (2009), and 10 t (75 cm row spacing) to 16.6 t ha<sup>-1</sup> (20 cm). In 2007, panicle dry weight was 109.4 g kg<sup>-1</sup> higher than in 2008 and 158.1 g kg<sup>-1</sup> higher compared to 2009. Thousand-grain weight was 13.66 g kg<sup>-1</sup> higher in 2007 than the average of the two following years. Compared to 2009, digestibility was 89.5 g kg<sup>-1</sup> lower in 2007 and 39.9 g kg<sup>-1</sup> lower in 2008. There was correlation between digestibility and ash content (-0.94\*\*), acid detergent fiber (-0.93\*\*) and acid detergent lignin (-0.85\*). Protein concentration was 15.2 g kg<sup>-1</sup> higher at the 20 cm spacing than at the 75 cm. No year x sowing density interaction was present, and sowing density did not affect DMY or forage quality. Sorghum DMY and forage quality were improved using a 33 seeds m<sup>2</sup> sowing density and 20 cm row spacing.

**KEY WORDS:** Sorghum, Forage quality, Dry matter, Row spacing, Sowing density.

### INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una fuerte necesidad de explotar cultivos forrajeros con mayor

### INTRODUCTION

Forage crops better adapted to lower soil moisture levels are of vital importance in regions

Recibido el 26 de junio de 2012. Aceptado el 17 de septiembre de 2012.

<sup>a</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Km 1 carretera Huimanguillo-Cárdenas, 86400, Huimanguillo, Tabasco, México. bolanos.eduardo@inifap.gob.mx. Correspondencia al primer autor.

<sup>b</sup> National Institute for Agriculture Research (INRA), Lusignan, France.

adaptación al cambio climático que se manifiesta con períodos secos cada vez más largos<sup>(1,2)</sup>. El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), es un cultivo forrajero con alta rusticidad y adaptación a los períodos secos del año. En México, el sorgo ocupó una superficie superior a 15 mil hectáreas en 2009, lo que representó el 11 % de la superficie destinada a los cultivos forrajeros en México, siendo el Norte el principal productor<sup>(3)</sup>. Bajo condiciones deficientes de humedad del suelo (condiciones propias del norte de México), el sorgo es más eficiente en el aprovechamiento del nitrógeno, y produce mayores rendimientos de forraje con respecto al maíz<sup>(4,5,6)</sup>. Sin embargo, el sorgo es menos utilizado que el maíz por su menor digestibilidad dada su alta concentración de lignina<sup>(7)</sup> lo que afecta la producción animal<sup>(2,8)</sup>.

Mejorar la productividad y calidad del sorgo puede ser posible por medio de la manipulación de prácticas agronómicas, tales como variar la distancia entre surcos, las densidades de siembra y la orientación de los surcos, entre otras<sup>(9)</sup>. En Francia, país en donde se realizó el presente estudio, el sorgo es sembrado comúnmente a 75 cm entre surcos, observándose poca variación en el rendimiento de materia seca (RMS) al emplearse densidades de siembra de 14.6 a 33.0 plantas m<sup>2</sup><sup>(10,11)</sup>. Se ha observado que disminuyendo la distancia entre surcos<sup>(12,13,14)</sup> e incrementando la densidad de plantas<sup>(15,16)</sup> se aumenta el RMS. Sin embargo, con el aumento de la densidad de plantas se acelera la síntesis de paredes celulares y maduración del sorgo, incrementándose el contenido de fibra detergente neutro (FDN)<sup>(17)</sup> y de lignina<sup>(12)</sup>, con disminución de la digestibilidad y del contenido de proteína<sup>(16)</sup>. Además estos resultados son producto de estudios en donde la cosecha se realizó en el momento de anthesis para evaluar el rendimiento de forraje, o a maduración fisiológica para evaluar la producción de semillas, y no necesariamente para evaluar la calidad de la planta entera, factor primordial en producción de forrajes.

where climate change is manifest in increasingly longer dry periods<sup>(1,2)</sup>. Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) is a highly rustic forage crop adapted to seasonal dry periods. In Mexico, sorghum was sown on over 15,000 ha in 2009, which represents 11 % of the surface used for forage crops in the country. Northern Mexico is the main sorghum producing area<sup>(3)</sup>, but this region is prone to long periods of low soil moisture. Under these conditions, sorghum uses nitrogen more efficiently and produces higher forage yields than corn<sup>(4,5,6)</sup>. However, sorghum is not used as widely as corn because its high lignin content results in lower digestibility, which negatively affects animal production<sup>(2,8)</sup>.

Improving sorghum productivity and quality can be accomplished by manipulating agricultural practices such as row spacing, sowing density and row orientation, among other factors<sup>(9)</sup>. For example, in France, where this study was done, sorghum is commonly sown at a 75 cm row spacing, with little variation in dry matter yield (DMY) at densities of 14.6 to 33.0 plants m<sup>2</sup><sup>(10,11)</sup>. Increases in DMY can be produced by decreasing row spacing<sup>(12,13,14)</sup> and increasing plant density<sup>(15,16)</sup>. However, increasing plant density accelerates cell wall synthesis and ripening in sorghum, raising neutral detergent fiber (NDF)<sup>(17)</sup> and lignin contents<sup>(12)</sup>, and consequently lowering digestibility and protein content<sup>(16)</sup>. These results are from studies in which harvest was done at anthesis, to evaluate forage yield, or at physiological maturation, to evaluate seed production. They were not focused on determining whole plant quality, a key factor in forage production.

Another factor to consider is that harvest of sorghum at a 300 g kg<sup>-1</sup> whole plant dry matter (WPDM) concentration results in relatively high digestibility (650 g kg DM)<sup>(18)</sup>. In corn, forage quality has been maximized by harvesting at concentrations from 300 to 370 g kg WPDM<sup>(19)</sup>. What effect WPDM concentration could have on sorghum forage yield and quality has not been studied. A better understanding of this

Por otra parte, se ha observado que cosechando el sorgo a una concentración de 300 g kg<sup>-1</sup> de materia seca a nivel de planta entera (MSPL), se obtiene una alta digestibilidad del orden de 650 g kg de MS<sup>(18)</sup>. En maíz, la calidad del forraje fue optimizado al cosechar de 300 a 370 g kg MSPL<sup>(19)</sup>. El efecto de prácticas de siembra sobre el rendimiento y calidad del forraje de sorgo a nivel de la concentración de materia seca de la planta entera no ha sido abordado en estudios previos, y podría ser una alternativa para mejorar su digestibilidad, sin deterioro del contenido de proteína. Por lo anterior, dichos trabajos son necesarios.

El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la distancia entre surcos y de la densidad de siembra, sobre el rendimiento y calidad del forraje de sorgo a nivel de planta entera, cuando la cosecha se realiza a una concentración de MSPL de aproximadamente 300 g kg<sup>-1</sup>.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Descripción del sitio*

El trabajo de campo se realizó en la Estación Experimental de Forrajes y Medio Ambiente del Instituto Nacional de Investigación Agronómica (INRA) de Lusignan, Francia (46°25'07 N, 0°07'06 E, altitud 140 m) durante tres estaciones de crecimiento de los años 2007, 2008 y 2009 (Cuadro 1). El suelo era de color café, de textura limo arcilloso, con 3 % de materia orgánica y pH de 6.8, clasificado como cambisol districo<sup>(20)</sup>. La profundidad del suelo varió de 90 a 100 cm<sup>(3)</sup>.

### *Distancia entre surcos y densidades de siembra*

La variedad de sorgo de grano "Solarius", es ampliamente utilizada para el ensilaje en Francia<sup>(1)</sup>, y se sembró a una profundidad de 5 cm con una sembradora comercial de cereales. Datos sobre la siembra y cosecha se presentan en el Cuadro 1. Los tratamientos consistieron en dos distancias entre surcos: a 75 y a 20 cm, ambas con densidad de siembra

parameter could help to design sorghum cultivation strategies that improve digestibility without compromising protein content.

The present study objective was to evaluate the effect of two row spacings and two sowing densities on whole plant yield and forage quality at an approximately 300 g kg<sup>-1</sup> WPDM harvest concentration.

## MATERIALS AND METHODS

### *Site description*

Field work was done at the Forage and Environmental Experimental Station of the National Institute of Agricultural Research (l'Institut National de la Recherche Agronomique - INRA) in Lusignan, France (46°25'07 N, 0°07'06 E; 140 m asl) during the growing seasons of 2007, 2008 and 2009 (Table 1). Soils at the Station are brown, silty clay in texture, from 90 to 100 cm deep<sup>(3)</sup>, with 3% organic matter and a pH of 6.8; they are classified as dystric cambisol<sup>(20)</sup>.

### *Row spacing and sowing density*

The Solarius variety of grain sorghum, widely used for silage in France<sup>(1)</sup>, was sown at 5 cm depth using a commercial cereal sower (Table 1). Treatments involved row spacings of 75 and 20 cm, both sown at a 33 seeds/m<sup>2</sup> density. To evaluate this variety's response to high sowing

Cuadro 1. Datos de clima durante las tres estaciones de crecimiento en Lusignan, Francia

Table 1. Sorghum sowing and harvest dates, and weather data for three growing seasons in Lusignan, France

	2007	2008	2009
Sowing date	May 10	May 20	Jun 02
Harvest date	Oct 15	Sept 24	Sept 16
<i>From sowing to harvest:</i>			
Accumulated rainfall, mm	353	329	163
Summer rainfall (June and July), mm	152	100	56
Average temperature, °C	15.9	16.4	18.0

convencional de 33 semillas  $m^2$ . Con la finalidad de también conocer la respuesta de la variedad Solarius al someterse a altas densidades de siembra, en 2007 y 2008 se incluyó una distancia entre surcos de 20 cm con 65 semillas/ $m^2$ . Se calculó que con 33 semillas/ $m^2$  se tenían en el surco 24.7 y 6.7 semillas m lineal en las distancias de 75 cm y 20 cm, respectivamente. Con 65 semillas  $m^2$ , 14 semillas/metro lineal se depositaron en los surcos distanciados a 20 cm. El tamaño de cada parcela experimental fue de 12 x 60 m. Todas las parcelas se fertilizaron con 70 kg  $ha^{-1}$  año $^{-1}$  de N en forma de nitrato de amonio a los 20 días después de la siembra, utilizando una fertilizadora desplegable de 20 m de longitud montada sobre un tractor. No se empleó irrigación ni pesticidas en el cultivo. El control de malezas se realizó con ayuda de un cultivador intra-surcos cuando las malezas tenían de 10 a 15 cm de alto.

#### *Cosecha y colecta de muestras*

Para conocer la concentración de materia seca de la planta entera (MSPL) y determinar el momento óptimo o fecha de cosecha, las muestras se colectaron dos veces por semana a partir de que el cultivo alcanzó el 50 % de floración. El momento óptimo de cosecha se basó en 300 g  $kg^{-1}$  MSPL, y para alcanzar esta concentración de materia seca (MS) las fechas de cosecha fueron diferentes entre años (Cuadro 1). Con esta concentración de MSPL, aproximadamente tres cuartos del peso seco del grano (consistencia masoso lechoso) se alcanzó en 2007, y la mitad del peso seco del grano (consistencia lechoso) se alcanzó en 2008 y 2009.

Para estimar el número de plantas  $m^2$  y el rendimiento de materia seca (RMS)  $ha^{-1}$ , las plantas se contaron y cosecharon a mano a una altura de 10 cm de la superficie del suelo, sobre tres segmentos de un metro lineal cada uno tomados al azar por parcela. Cada segmento se tomó en la parte central de un surco distinto (en total tres surcos por parcela). La altura de la planta se midió previo a la

densidad, an additional treatment of 20 cm row spacing with a 65 seeds/ $m^2$  density was done in 2007 and 2008. At a 33 seeds  $m^2$  density, seed count per linear meter was 24.7 at the 75 cm spacing and 6.7 at the 20 cm spacing. At a 65 seeds/ $m^2$  density, seed count per linear meter was 14 at the 20 cm spacing. Each experimental parcel measured 12 x 60 m. Twenty days after sowing, all parcels were fertilized with 70 kg  $ha^{-1}$  yr $^{-1}$  nitrogen (N, in the form of ammonium nitrate) using a 20 m retractable fertilizer mounted on a tractor. No irrigation or pesticides were used. Weed control was done with an inter-row cultivator when weeds were 10 to 15 cm in height.

#### *Sample collection and harvest*

Whole plant dry matter concentration and optimum harvest date were determined by collecting samples every two weeks once the plants had attained 50 % floration. Optimum harvest date was when plants had a 300 g  $kg^{-1}$  WPDM. This date differed between years (Table 1). In 2007, this concentration was reached at approximately three quarters of grain (doughy milky consistency) dry weight, whereas in 2008 and 2009 it was reached at half of grain (milky consistency) dry weight.

Plant density per  $m^2$  and DMY per  $ha^{-1}$  were estimated by counting the plants and manually harvesting them at 10 cm above soil surface. These samples were taken from three, one meter-long row segments selected randomly inside the parcel. Each segment was located in the center of a different row. Plant height was measured before harvest. Harvested plants were divided into stems, leaves and panicles to estimate vegetation and reproductive organ biomass fresh weight. After drying at 60 °C for 48 h, vegetation and panicle dry weight were measured and sample dry matter (DM) content calculated. Seeds were separated from panicles to calculate thousand-grain weight (TGW). Once manual sampling was finished, all remaining plants in all the parcels were harvested with a tractor (John Deere 5730) using a 12.7 mm

cosecha. Las plantas cosechadas se separaron en; tallos, hojas y panículas, para estimar el peso fresco de la biomasa vegetativa y reproductiva. Estas partes de las plantas se secaron a 60 °C por 48 h para determinar el peso seco vegetativo y de panículas, y la MS de las muestras fue calculada. Después del secado, los granos se separaron de las panículas para calcular el peso de mil granos (PMG). Después del muestreo a mano sobre los tres surcos por parcela, se realizó la cosecha de todas las plantas de todas las parcelas experimentales con apoyo de un tractor marca John Deere Modelo 5730, a un tamaño de partícula de 12.7 mm. Tres muestras representativas de cada parcela experimental se tomaron para los análisis químicos. Estas muestras se secaron a 60 °C por 48 h y se molieron en un Molino Wiley a través de una malla de 1 mm previo a la determinación de la calidad. La técnica de absorción en el infrarrojo cercano (NIR Systems, Inc., Silver Spring, MD 20904, USA) se utilizó para analizar y predecir las concentraciones de: proteína cruda (PROT), digestibilidad (DIG), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), lignina detergente ácido (LDA) y cenizas, en el laboratorio del INRA-Lusignan. Las ecuaciones de calibración fueron desarrolladas para sorgo basadas en análisis químicos húmedos de 290 muestras de sorgo en verde y de 111 muestras de ensilado de sorgo cosechadas de 2003 a 2007 en Lusignan. Los parámetros para el error estándar de calibración, calibración  $r^2$  y error estándar de la validación cruzada fueron 0.34, 0.98 y 0.38 para PROT, 1.67, 0.95 y 1.88 para DIG, 1.71, 0.96 y 1.92 para FDN, 1.24, 0.93 y 1.27 para FDA, 0.52, 0.57 y 0.55 para LDA, y 0.35, 0.90 y 0.38 para cenizas, respectivamente.

#### *Análisis estadístico*

Un primer análisis se realizó con los datos obtenidos de los tres ciclos de crecimiento de sorgo (2007, 2008 y 2009) para determinar el efecto de la distancia entre surcos a la densidad de siembra de 33.0 semillas  $m^2$  únicamente. Un segundo análisis se realizó para los ciclos

particle size. Three representative samples were taken from each parcel for chemical analyses. Before the quality evaluation, these samples were dried at 60 °C for 48 h, and ground (Wiley mill) using a 1 mm mesh. Near infrared absorption was used to analyze the samples for crude protein (PROT); digestibility (DIG); neutral detergent fiber (NDF); acid detergent fiber (ADF); acid detergent lignin (ASL); and ash. These analyses were done at the INRA-Lusignan laboratory. Calibration equations were then developed for sorghum based on chemical analyses of 290 green sorghum samples and 111 samples of sorghum silage harvested in 2003 to 2007 in Lusignan. Calibration standard error parameters were 0.34 for PROT; 1.67 for DIG; 1.71 for NDF; 1.24 for ADF; 0.52 for ADL and 0.35 for ash. Calibration  $r^2$  parameters were 0.98 for PROT; 0.95 for DIG; 0.96 for NDF; 0.93 for ADF; 0.57 for ADL and 0.90 for ash. Cross validation standard error parameters were 0.38 for PROT; 1.88 for DIG; 1.92 for NDF; 1.27 for ADF; 0.55 for ADL and 0.38 for ash.

#### *Statistical analyses*

An initial analysis was done using data from all three growth cycles (i.e. 2007, 2008 and 2009) to determine the effect of distance between rows only at the 33.0 seeds  $m^2$  sowing density. A second analysis was then done using data from the 2007 and 2008 cycles to determine the effect of the 33.0 versus the 65.0 seeds  $m^2$  sowing densities only at the 20 cm row spacing. Data were analyzed using a random block design in divided parcels, with four replicates in 2007 and 2008, and three replicates in 2009. Principal parcels were row spacing in the first analysis and sowing density in the second analysis, with years as subparcel. In both analyses, forage yield and nutritional value traits were analyzed with the PROC MIXED tool in the SAS statistics software package<sup>(21)</sup>. Fixed effects were row spacing and sowing density, and random effects were year and replicates (i.e. year or environment is a random factor) which is why year was treated as a subparcel. Differences between means were identified using the

2007 y 2008 para determinar el efecto de densidad de siembra de 33.0 vs 65.0 semillas m<sup>2</sup>, solamente en los surcos espaciados a 20 cm. Los datos se analizaron en un diseño de bloques al azar en arreglo de parcelas divididas, con cuatro repeticiones en 2007 y 2008, y tres repeticiones en 2009, con espacio entre surcos (primer análisis) y densidades de siembra (segundo análisis) como parcelas principales, y años como subparcela. En ambos análisis, los caracteres de rendimiento de forraje y valor nutritivo se analizaron utilizando el PROC MIXED del software SAS<sup>(21)</sup> con espacio entre surcos y densidades de siembra como efectos fijos, años y repeticiones como efectos aleatorios (el año o el ambiente es un factor aleatorio), razón por la que el año se consideró como parcela chica. Diferencias entre medias se realizaron empleando la prueba de Student-Newman-Keuls ( $P<0.05$ ). Correlaciones entre caracteres a

Student-Newman-Keuls test ( $P<0.05$ ). Correlations between traits during years were calculated using PROC CORR in PROC GLM<sup>(21)</sup>.

## RESULTS AND DISCUSSION

### *Rainfall and dry matter concentration*

Annual rainfall in 2007 was 24 mm higher than in 2008 and 190 mm higher than in 2009 (Table 1). When averaged over the three years, there was a linear response ( $y= 0.203x + 73.14$ ;  $r^2= 0.72$ ) between rainfall and the number of days needed to reach an average 320 g kg<sup>-1</sup> WPDM, where  $y$  is number of days and  $x$  is cumulative rainfall. The number of days needed to reach this concentration decreased each year from 157 in 2007, to 126 in 2008 to 108 in 2009. This was due to increased hydric stress, which caused the plants to accelerate the seed

Cuadro 2. Cuadrados medios y niveles de significancia para los efectos de año, distancia entre surcos (RS) y densidades de siembra (SD) sobre los caracteres de crecimiento, rendimiento y calidad del sorgo

Table 2. Mean squares and significance levels for year, row spacing (RS) and sowing density (SD) effects on sorghum growth, yield, and forage quality traits

	Row spacing				Sowing density			
	Mean	RS	Year	RS x Year	Mean	SD	Year	SD x Year
DMY, t ha <sup>-1</sup>	13.2	262.6**	52.7 **	5.2	18.8	6.3	60.9 *	3.3
Plants, m <sup>-2</sup>	29.2	1125.9**	573.9 ***	29.5	38.0	126.5	976.5 ***	9.0
Plant height, cm	112.7	22.9	4356.8 ***	389.9 **	126.1	1.0	462.2 **	25.0
WPDM, g kg <sup>-1</sup>	322.5	2076.5	102.2	8.0	317.8	1.0	272.2	25.0
PDM, g kg <sup>-1</sup>	418.0	4381.9*	40802.9 ***	742.3	450.2	410.1	44626.5 ***	564.1
VODM, g kg <sup>-1</sup>	268.0	326.7	5522.9 ***	283.8	248.1	85.6	2047.5 *	3.1
TGW, g	12.9	19.3*	456.4***	5.8	15.7	4.0	552.2 ***	0.3
PROT, g kg <sup>-1</sup> DM	97.6	415.0**	2.1	1.3	-	-	-	-
DIG, g kg <sup>-1</sup> DM	640.8	580.5	15723.0 ***	422.5	613.8	45.6	8789.1 ***	76.5
NDF, g kg <sup>-1</sup> DM	506.8	807.0	981.5	202.9	518.6	56.3	196.0	324.0
ADF, g kg <sup>-1</sup> DM	257.0	260.4	3813.5 **	103.6	267.1	60.1	2943.1 **	189.1
ADL, g kg <sup>-1</sup> DM	28.9	1.01	296.4***	23.0	30.7	18.1	315.1 ***	18.1
Ash, g kg <sup>-1</sup> DM	53.5	61.0	714.9 ***	10.4	56.7	49	930.2 ***	12.3
df		1	2	2		1	1	1

DMY= dry matter yield; WPDM= dry matter concentration in whole plant; PDM= panicles dry matter; VODM= vegetative organs; TGW= thousand-grain weight; PROT= protein; DIG= digestibility; NDF= neutral detergent fiber; ADF= acid detergent fiber; ADL= acid detergent lignin; df= degrees of freedom \*( $P<0.05$ ); \*\*( $P<0.01$ ); \*\*\*( $P<0.001$ ).

través de años se calcularon por PROC CORR del PROC GLM<sup>(21)</sup>.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

*Precipitación pluvial y concentración de materia seca en la planta*

La estación lluviosa presentó 24 y 190 mm menos de lluvia en 2008 y 2009, en su orden, con respecto a 2007 (Cuadro 1). Como promedio de los tres años, hubo una respuesta lineal ( $y=0.203x + 73.14$ ;  $r^2=0.72$ ) entre la cantidad de lluvia y los días requeridos para alcanzar un promedio de 320 g kg<sup>-1</sup> de MSPL, donde y es el número de días y x la lluvia acumulada. El número de días requeridos para alcanzar la concentración de MSPL mencionada disminuyó con los años y fue de 157, 126 y 108 en 2007, 2008 y 2009, respectivamente. Lo anterior debido a que con los años el estrés hídrico en la planta aumentó, acelerando su ciclo de desarrollo para la formación de granos como

formation development cycle as a survival strategy<sup>(22)</sup>. This agrees with a study done of alfalfa in four different climates during a three-year period<sup>(23)</sup>. As long as reduced rainfall did not become a limiting factor, it resulted in a fewer number days to seed harvest, although it also caused lower plant height and therefore lower forage yield.

*Dry matter yield*

*Effect of row spacing at a conventional sowing density*

No interaction was observed between year and row spacing for DMY at the 33 seeds m<sup>2</sup> sowing density (Table 2). Compared to 2007, DMY was 3.26 t ha<sup>-1</sup> lower in 2008 and 6.70 t ha<sup>-1</sup> lower in 2009 (Table 3). A positive correlation was observed between DMY and plants/m<sup>2</sup>, while a negative correlation was identified between DMY and vegetative organ dry matter (VODM) concentration (Table 4). Compared to 2007,

Cuadro 3. Efecto de año y distancia entre surcos sobre los caracteres del crecimiento, rendimiento y calidad del sorgo

Table 3. Effects of year and row spacing on sorghum growth, yield and forage quality traits

	Year			Row spacing	
	2007	2008	2009	Conventional (75 cm)	Narrow (20 cm)
DMY, t ha <sup>-1</sup>	16.90 a	13.64 b	10.20 c	10.07 b	16.60 a
Plants, m <sup>-2</sup>	37.70 a	20.87 c	29.08 b	22.25 b	36.17 a
Plant height, cm	136.37 a	122.00 b	90.83 c	111.11 a	114.39 a
WPDM, g kg <sup>-1</sup>	330.80 a	325.80 a	313.90 a	330.40 a	313.90 a
PDM, g kg <sup>-1</sup>	517.10 a	407.70 b	359.00 c	427.90 a	408.20 a
VODM, g kg <sup>-1</sup>	236.30 c	267.30 b	291.80 a	274.10 a	261.60 a
TGW, g	22.87 a	10.25 b	8.17 b	13.64 a	12.29 b
PROT, g kg <sup>-1</sup> DM	95.88 a	-	99.88 a	88.91 b	104.10 a
DIG, g kg <sup>-1</sup> DM	598.38 c	648.00 b	687.87 a	644.10 a	638.10 a
NDF, g kg <sup>-1</sup> DM	515.38 a	497.38 a	508.13 a	498.67 a	513.68 a
ADF, g kg <sup>-1</sup> DM	278.88 a	246.25 b	242.83 b	253.64 a	260.13 a
ADL, g kg <sup>-1</sup> DM	35.62 a	24.87 b	25.35 b	28.58 a	29.19 a
Ash, g kg <sup>-1</sup> DM	63.87 a	9.12 b	45.61 c	52.15 a	54.68 a

DMY= dry matter yield; WPDM= whole plant dry matter; PDM= panicles dry matter; VODM= vegetative organs; TGW= thousand-grain weight; PROT= protein; DIG= digestibility; NDF= neutral detergent fiber; ADF= acid detergent fiber; ADL= acid detergent lignin. Sowing density in conventional- and narrow-row spacing was 33 grains m<sup>-2</sup>, that is, 24.7 and 6.7 grains m<sup>-1</sup>, respectively. abc Means within a row followed by the same letter are not different according to the Student-Newman-Keuls test ( $\alpha=0.05$ ).

estrategia de sobrevivencia de las plantas<sup>(22)</sup>. En un estudio realizado en alfalfa<sup>(23)</sup>, en el que se evaluaron cuatro sitios de clima distinto y durante tres años, también se observó que el número de días necesarios para cosechar la semilla fue menor en aquellos sitios con menor precipitación pluvial (sin llegar a ser un factor limitante), pero se observó un menor rendimiento de forraje relacionado con la menor altura adquirida de la planta.

*Rendimiento de materia seca*

*Efecto de la distancia entre surcos con densidad de siembra convencional*

No hubo interacción año x distancia entre surcos para el rendimiento de materia seca (RMS) con la siembra de 33 semillas m<sup>2</sup> (Cuadro 2). El RMS fue 3.26 y 6.70 t ha<sup>-1</sup> menos en 2008 y 2009, respectivamente, comparado con 2007 (Cuadro 3). El RMS tuvo una correlación positiva con el número de plantas/m<sup>2</sup> y una correlación negativa con la concentración de materia seca de los órganos vegetativos (MSOV) (Cuadro 4). El número de plantas/m<sup>2</sup> fue de 16.8 y 8.6 menos en 2008 y 2009, respectivamente, comparado con 2007. La altura promedio de la

plants m<sup>2</sup> was 16.8 lower in 2008 and 8.6 lower in 2009. Average plant height in 2009 was 14.37 cm lower than in 2008 and 45.5 cm lower than in 2007 (Table 3). The lower plants m<sup>2</sup> and plant height values were due to severe water shortages in 2008 and 2009. This was particularly acute in 2009, when high temperatures (Table 1) exacerbated the water shortage.

Yearly average WPDM concentration was 322 g kg<sup>-1</sup>, with no effect from year. Dry matter distribution among the reproductive (panicles and TGW) and vegetative organs did vary by year (Table 3). Reproductive organs were heavier in 2007 because the crop reached a more advanced growth stage. Vegetative organs also had lower dry matter concentration values in 2007 than in 2008 and 2009. Again, the favorable environmental conditions in 2007 were the probable cause since these induced rapid seed growth and effective grain fill (attained milky doughy stage at harvest), and made the seeds the principal destination of assimilates from the leaves and stems<sup>(22,24)</sup>. Because of this, panicle dry matter (PDM) concentration was 109.4 g kg<sup>-1</sup> higher in 2007 than in 2008, and 158.1 g kg<sup>-1</sup> higher in 2007 than in 2009.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación para el rendimiento de material seca y caracteres de calidad del forraje de sorgo a dos distancias entre surcos y a dos densidades de siembra (entre paréntesis)

Table 4. Correlation coefficients for DMY and quality traits of sorghum forage at two row spacing and two sowing densities (in parentheses)

	Plant m <sup>-2</sup>	Plant height	WPDM	PDM	VODM	TGW	PROT	DIG	NDF	ADF	ADL	Ash
DMY	0.77*(0.95*)	0.64(0.94)	-0.18(0.93)	0.49(0.97*)	-0.77*(0.97*)	0.50(0.96*)	0.63(—)	-0.73(-0.88)	0.59(0.47)	0.72(0.79)	0.53(0.76)	0.77*(0.80)
Plant m <sup>-2</sup>		0.28(0.87)	-0.36(0.84)	0.37(0.94)	-0.55(-0.98*)	0.48(0.96*)	0.79(—)	-0.48(-0.91)	0.81*(0.71)	0.70(0.87)	0.62(0.83)	0.68(0.84)
Plant height			0.61(0.99**)	0.88*(0.98*)	-0.94**(-0.95*)	0.81*(0.97*)	-0.03(—)	-0.85*(-0.94)	0.02(0.38)	0.68(0.88)	0.53(0.88)	0.80*(0.92)
WPDM				0.69(0.97*)	-0.44(-0.93)	0.61(0.95*)	-0.72(—)	-0.42(-0.92)	-0.46(0.32)	0.25(0.85)	0.28(0.85)	0.33(0.90)
PDM					-0.92**(-.99**)	0.98***(-0.99**)	-0.23(—)	-0.88*(-0.96*)	0.21(0.52)	0.83*(0.90)	0.80*(0.89)	0.88*(0.92)
VODM						-0.89*(-.99**)	-0.06(—)	0.914*(0.95*)	-0.32(-0.60)	-0.84*(0.90)	-0.72(-0.87)	-0.92**(-0.89)
TGW							-0.19(—)	-0.86*(-0.98*)	0.34(0.59)	0.88*(0.93)	0.86*(0.91)	0.90*(0.94)
PROT								0.001(—)	0.48(—)	0.07(—)	-0.13(—)	0.17(—)
DIG									-0.46(-0.62)	-0.93**(-.98*)	-0.85*(-.97*)	-0.94**(-.98*)
NDF										0.69(0.69)	0.71(0.65)	0.53(0.57)
ADF											0.96**(-0.99**)	0.96**(-0.98*)
ADL												0.88*(0.99**)

DMY= dry matter yield; WPDM= dry matter concentration in whole plant; PDM= panicles dry matter; VODM= vegetative organs; TGW= thousand-grain weight; PROT= protein; DIG= digestibility; NDF= neutral detergent fiber; ADF= acid detergent fiber; ADL= acid detergent lignin. \*(P<0.05); \*\*\*(P<0.001).



planta fue de 14.37 y 45.5 cm menos en 2009 con respecto a 2008 y 2007 (Cuadro 3). El menor número de plantas/m<sup>2</sup> y la menor altura de la planta se debió al severo déficit de agua ocurrido en 2008 y principalmente en 2009, además de la alta temperatura ocurrida en este último año (Cuadro 1), lo que exacerbó el efecto negativo de la deficiencia de agua.

No hubo efecto de año en la concentración de MSPL, la cual promedió 322 g kg<sup>-1</sup> de MS en cada año. La distribución de materia seca entre órganos reproductivos (panículas y peso de mil granos) y vegetativos varió con el año (Cuadro 3), con órganos reproductivos más pesados en el primer año dado que el cultivo alcanzó un estado de crecimiento más avanzado. En 2007, los órganos vegetativos tuvieron menos concentración de materia seca que en 2008 y 2009, posiblemente dado a las condiciones ambientales favorables del primer año, que indujeron al rápido crecimiento de la semilla y eficaz llenado de grano (alcanzando un estado masoso lechoso al momento de la cosecha), el cual se convirtió en el principal demandante de asimilados provenientes de hojas y tallos<sup>(22,24)</sup>. Por la razón anterior, la concentración de materia seca en la panícula (MSP) fue 109.4 g y 158.1 g kg<sup>-1</sup> mayor en 2007 que en 2008 y 2009, respectivamente, y el peso de mil granos (PMG) fue 13.66 g kg<sup>-1</sup> mayor en 2007 comparado con el promedio de los dos años restantes. El PMG estuvo correlacionado negativamente ( $P<0.05$ ) con la concentración de MSOV (Cuadro 4). Para la formación de granos, la planta requiere tomar nitrógeno de sus tallos y hojas. El contenido de nitrógeno en planta es resultado de la eficiencia como éste es tomado del suelo y la concentración del mismo en la solución del suelo. La solubilidad y disponibilidad de nitrógeno en el suelo son mayores bajo condiciones de humedad<sup>(25,26)</sup>. Bajo estas condiciones consecuentemente el grano tiene mayor disponibilidad de nitrógeno proveniente de la planta y un rápido crecimiento del mismo es observado<sup>(27)</sup>. Estas condiciones favorables de humedad prevalecieron en nuestro estudio en 2007.

Also, TGW was 13.66 g kg<sup>-1</sup> higher in 2007 than the average of the following two years. As can be expected, TGW was negatively ( $P<0.05$ ) correlated to VODM (Table 4). These discrepancies between 2007 and the following two years are probably related to N use by the plants. Grain formation requires a plant to transfer N from the stems and leaves to the panicles. Overall plant N content depends on uptake efficiency and soil N concentration. Soil N solubility and availability are greater under high moisture conditions<sup>(25,26)</sup>, which translate into greater plant N availability for grain development and more rapid grain growth<sup>(27)</sup>. The higher rainfall of 2007 would have led to higher soil moisture content, thereby promoting grain development.

Row spacing affected DMY, which was 6.52 t ha<sup>-1</sup> higher at the 20 cm spacing than at the 75 cm spacing (Tables 2 and 3); it was clearly associated with plants m<sup>2</sup> (Table 4). These results coincide with previous reports of sorghum growth performance at different row spacings<sup>(9)</sup>. Under moist conditions, sorghum growth improved at a narrow spacing (38 cm) compared to a wider spacing (76 cm), primarily due to more efficient solar radiation capture: 80 % at 38 cm vs 70 % at 76 cm. A 33 seeds/m<sup>2</sup> sowing density was used in the present study at both row spacings, but only 23 plants grew at the 75 cm spacing while all the seeds produced a plant at the 20 cm spacing; that represents a 30 % (10 plants m<sup>2</sup>) loss. This loss may have been caused by greater competition for soil nutrients<sup>(28)</sup> between plants within the row at the 75 cm spacing (24.7 seeds/linear meter) than at the 20 cm spacing (6.7 seeds/linear meter). Given the greater light interception at the 75 cm spacing, a higher evapotranspiration rate may also have effected seed germination<sup>(9)</sup>. However, more space between plants within a row leads to increased light penetration and decreased competition for nutrients<sup>(29)</sup>. Higher DMY at narrow *versus* wide row spacings has also been reported for corn<sup>(30,31)</sup>.

El RMS del sorgo tuvo 6.52 t ha<sup>-1</sup> más en surcos espaciados a 20 cm, que en surcos espaciados a 75 cm (Cuadros 2 y 3) y estuvo asociado con el número de plantas m<sup>2</sup> (Cuadro 4). Este resultado es consistente con lo encontrado por Steiner<sup>(9)</sup>, quien observó que en surcos estrechos (38 cm entre surcos) se mejora el comportamiento del sorgo bajo condiciones húmedas, principalmente a una mejora en la eficiencia de la captura de la radiación solar incidente (a captura del 80 % de la radiación solar incidente vs el 70 % de captura observada en surcos espaciados a 76 cm). En nuestro estudio, en ambos espaciamientos entre surcos se aplicó una densidad de siembra de 33 semillas/m<sup>2</sup>, pero en surcos a 75 cm sólo crecieron 23 plantas, y en surcos a 20 cm todas las semillas dieron origen a una planta. Esto indica una pérdida de 10 plantas m<sup>2</sup> en surcos

#### *Effect of sowing density at narrow row spacing*

No effect between year and sowing density for DMY was observed (Table 2) when the 33.0 and 65.0 seeds/m<sup>2</sup> densities were evaluated at the 20 cm row spacing. Dry matter yield was positively correlated to plants m<sup>2</sup>, PDM and TGW, but inversely correlated to VODM (Table 4). The high ratios of DMY to the reproductive organs (PDM and TGW) was more marked in 2007, with PDM being 106 g kg<sup>-1</sup> higher and TGW 12.0 g kg<sup>-1</sup> higher than in 2008 (Table 5). This occurred because an additional month of growth was required to reach the target WPDM concentration (Table 1), meaning the reproductive organs (panicle and seeds) were more developed.

Sowing density did not affect DMY (Table 5), although plant survival was lower at the 65

Cuadro 5. Efecto de año y de densidad de siembra sobre los caracteres del crecimiento, rendimiento y calidad del forraje de sorgo

Table 5. Effects of year and sowing density on sorghum growth, yield and forage quality traits

	Year		Sowing density, grains m <sup>2</sup>	
	2007	2008	33	65
DMY, t ha <sup>-1</sup>	0.84 a	16.94 b	18.26 a	19.52 a
Plants, m <sup>-2</sup>	45.81 a	30.18 b	36.17 a	40.81 a
Plant height, cm	131.50 a	120.70 b	126.30 a	125.80 a
WPDM, g kg <sup>-1</sup>	322.00 a	313.70 a	318.10 a	317.60 a
PDM, g kg <sup>-1</sup>	503.00 a	397.30 b	445.12 a	455.20 a
VODM, g kg <sup>-1</sup>	236.70 b	259.30 a	250.37 a	245.70 a
TGW, g	21.62 a	9.87 b	15.25 a	16.25 a
PROT, g kg <sup>-1</sup> DM	101.00	—	103.00 a	99.00 a
DIG, g kg <sup>-1</sup> DM	590.30 b	637.20 a	612.13 a	615.50 a
NDF, g kg <sup>-1</sup> DM	522.10 a	515.10 a	516.75 a	520.50 a
ADF, g kg <sup>-1</sup> DM	280.60 a	253.50 b	269.00 a	265.10 a
ADL, g kg <sup>-1</sup> DM	35.10 a	26.20 b	31.75 a	29.60 a
Ash, g kg <sup>-1</sup> DM	64.30 a	49.10 b	58.50 a	55.00 a

DMY= dry matter yield; WPDM= whole plant dry matter; PDM= panicles dry matter; VODM= vegetative organs; TGW= thousand-grain weight; PROT= protein; DIG= digestibility; NDF= neutral detergent fiber; ADF= acid detergent fiber; ADL= acid detergent lignin.

Row spacing was 20 cm at both sowing densities.

ab Means within a row followed by the same letter are not different according to the Student-Newman-Keuls test ( $\alpha= 0.05$ ).

a 75 cm. Esta pérdida posiblemente se debió a una mayor competencia entre plántulas, al interior del surco, por los nutrientes del suelo<sup>(28)</sup> en surcos espaciados a 75 cm (24.7 semillas/metro lineal) que en surcos a 20 cm (6.7 semillas/metro lineal), así como también a una posible mayor evapotranspiración para un nivel dado de intercepción de luz en surcos espaciados a 75 cm<sup>(9)</sup>. Por otro lado, se ha mostrado<sup>(29)</sup> que incrementando el espacio entre plantas al interior del surco resulta en una mayor penetración de luz y en una disminución en la competencia por nutrientes. Mayor RMS en surcos de espaciamiento estrecho, comparado con surcos de espaciamiento amplio, ha sido también reportado en maíz<sup>(30,31)</sup>.

#### *Efecto de la densidad de siembra en surcos estrechos*

No hubo interacción año x densidad de siembra para el RMS (Cuadro 2) cuando las densidades de siembra de 33.0 y 65.0 semillas/m<sup>2</sup> fueron evaluadas con la distancia entre surcos de 20 cm. El RMS estuvo correlacionado positivamente con plantas m<sup>2</sup>, MSP y PMG, e inversamente correlacionado con la MSOV (Cuadro 4). La alta relación del RMS del sorgo con los órganos reproductivos (MSP y PMG) fue más acentuada en el primer año, en donde la MSP fue 106 g kg<sup>-1</sup> y el PMG 12.0 g kg<sup>-1</sup> más elevados que lo registrado en 2008 (Cuadro 5). Lo anterior a que en el primer año la humedad del suelo fue superior que en 2008 y entonces para obtener la concentración de MSPL fue necesario esperar un mes más (Cuadro 1), y por ende los órganos reproductivos (panícula y granos) alcanzaron un mayor desarrollo.

La densidad de siembra no afectó el RMS (Cuadro 5); sin embargo, las plantas tuvieron menor sobrevivencia con la densidad de siembra de 65.0 semillas/m<sup>2</sup>. Al respecto, en un estudio previo<sup>(32)</sup> se observó que al incrementarse la densidad de plantas por unidad de superficie, se presenta un aumento en la tasa de senescencia de la planta entera durante su ciclo de crecimiento.

seeds/m<sup>2</sup> density. This coincides with a previous study in which increases in plant density per surface unit led to a higher whole plant senescence rate during the growth cycle<sup>(32)</sup>. This decrease in plants/m<sup>2</sup> at the higher sowing density resulted in no difference in plant population at harvest between the two studied densities. This agrees with studies indicating that a higher plant density does not affect DMY or grain yield in sorghum<sup>(10,11)</sup>. Indeed, low plant densities are associated with a compensatory response involving greater sprouting, higher grain counts and heavier seeds. In other words, higher plant density offers no productive advantages in sorghum.

#### *Forage quality*

##### *Effect of row spacing at a conventional sowing density*

No interaction between year and row spacing was observed for the evaluated plant quality traits. Year did affect digestibility, ADF, ADL and ash, but not protein concentration or NDF (Table 2). The lack of rainfall in 2009 did not change plant protein concentration compared to 2007. This was probably because the 2009 dry period was interrupted by sporadic rains which could have helped to maintain N availability in the upper soil levels where plants most absorb N<sup>(33,34)</sup>.

Compared to 2009, digestibility was 13 % lower in 2007, and 5.8 % lower in 2008 (Table 3). An inverse correlation was observed between digestibility and ash concentration, ADF and ADL (Table 4). Ash concentration in 2007 was 14.7 g kg<sup>-1</sup> DM higher than in 2008, and 18.2 g kg<sup>-1</sup> DM higher than in 2009 (Table 3). This was also the case with ADL (10.55 g kg<sup>-1</sup> higher in 2007 than the other years) and ADF (34.34 g kg<sup>-1</sup> higher in 2007 than the other years). The moist environmental conditions during the 2007 growing season led to greater seed production (higher TGW and PDM), and consequently a higher panicle/plant ratio (0.54) in 2007 than in 2009 (0.34)(data not shown). As a result, both ADF and ADL were higher and plant

Dado que el número de plantas disminuyó en la siembra de mayor densidad, no hubo diferencia en población entre las dos densidades al momento de la cosecha. Estos resultados concuerdan con estudios realizados con anterioridad<sup>(10,11)</sup> en donde se señala que al incrementar la densidad de plantas no se afecta el RMS en sorgo o el rendimiento en grano, y que densidades con pocas plantas m<sup>2</sup> están asociadas con una respuesta compensatoria en cuanto a mayor rebrote y mayor número y peso de los granos. Lo anterior es indicativo de que una mayor densidad de plantas no ofrece ventajas productivas en sorgo.

### *Calidad del forraje*

#### *Efecto de la distancia entre surcos con densidad de siembra convencional*

No hubo interacción año x distancia entre surcos para los caracteres evaluados de la calidad de la planta. El efecto de año fue significativo para la digestibilidad, FDA, LDA y cenizas, pero no para la concentración de proteína ni para la FDN (Cuadro 2). En 2009, la falta de agua no cambió el estatus en concentración de proteína de la planta, con respecto a 2007. Esto porque el período seco del último año fue interrumpido por lluvias esporádicas, lo que posiblemente ayudó a mantener la disponibilidad de nitrógeno en las capas superiores del suelo, capas de donde las plantas toman principalmente el nitrógeno<sup>(33,34)</sup>.

La digestibilidad del sorgo fue 13 y 5.8 % menor en 2007 y 2008, respectivamente, que en 2009 (Cuadro 3). Una correlación inversa se observó entre la digestibilidad del sorgo y concentración de cenizas, FDA y LDA (Cuadro 4). La concentración de cenizas fue mayor en 2007 que en 2008 y 2009 (14.7 y 18.2 g kg<sup>-1</sup> MS más en el primer año que en 2008 y 2009, respectivamente) (Cuadro 3). Las concentraciones de LDA y FDA fueron superiores en el primer año que en los dos años siguientes (10.55 g kg<sup>-1</sup> y 34.34 g kg<sup>-1</sup> de MS más en 2007). Las condiciones ambientales húmedas que

digestibilidad lower in 2007. The leaf/stem ratio decreases as plants reach maturity and begin to form and fill seeds<sup>(35)</sup>. Senescence and lignification of vegetative organs accelerate during this process as nutrients are transferred to the forming panicle<sup>(24,32)</sup>, thus reducing leaf and stem digestibility and not compensating for the panicle's high digestibility<sup>(36)</sup>.

Row spacing was an important source of variation in forage quality traits. This was particularly notable in protein concentration, where sample whole protein content was 15.2 g kg<sup>-1</sup> higher at the 20 cm row spacing than at the 75 cm spacing (Table 3). This coincides with previous studies in which protein content was higher in plants grown in narrowly-spaced rows<sup>(16,37)</sup>. This is attributed to wider spacing between plants within the row, which allows greater light penetration, lowers competition for nutrients and favors leaf area development. In the present study, the 20 cm row spacing allowed more space between individuals, and produced the largest average leaf surface per plant (data not shown). Average leaf area per plant at the 20 cm row spacing was 2010.8 cm<sup>2</sup>, and that at the 75 cm spacing was 1590.7 cm<sup>2</sup>. As can be expected in sorghum, protein concentration was higher in the leaves than the stems.

These results coincide with studies done using corn in which whole plant N accumulation was higher as row spacing decreased<sup>(39,40)</sup>. Other studies indicate that sowing corn in narrow rows does not negatively affect whole plant nutritional value<sup>(31,41,42)</sup>.

#### *Effect of sowing density in narrowly spaced rows*

No interaction between year and sowing density was observed for any of the forage quality traits (Table 2). Digestibility was 47.0 g kg<sup>-1</sup> lower in 2007 than in 2008, and had an inverse correlation with ADF, ADL and ash concentration (Table 4): ADF was 27.1 g kg<sup>-1</sup> higher in 2007 than 2008; ADL was 8.9 g kg<sup>-1</sup> higher; and ash

prevalecieron durante el ciclo de crecimiento en 2007, propiciaron una mayor producción de semilla (mayor PMG y MSP) y en consecuencia una relación panícula/planta (0.54) en 2007 superior a la observada en 2009 (0.34) (datos no presentados). Por la razón anterior, los caracteres FDA y LDA fueron superiores y en consecuencia la digestibilidad de la planta fue más baja en el primer año. Se ha señalado<sup>(35)</sup> que la relación hoja/tallo disminuye cuando las plantas alcanzan la madurez y empieza la formación y llenado de grano, dado que durante este proceso se acelera la senescencia y lignificación de los órganos vegetativos, por el aporte de nutrientes a la panícula en formación<sup>(24,32)</sup> reduciendo la digestibilidad de hojas y tallos, no compensando la alta digestibilidad de la panícula<sup>(36)</sup>.

La distancia entre surcos fue también una importante fuente de variación en la calidad del sorgo, en particular en lo que se refiere a la concentración de proteína, la cual en la planta entera fue 15.2 g kg<sup>-1</sup> mayor en la siembra de surcos estrechos que en el espaciamiento a 75 cm (Cuadro 3). Así mismo, en estudios previos<sup>(16,37)</sup>, se observó también mayor concentración de proteína en plantas creciendo en surcos estrechos, explicado como el resultado de existir mayor espaciamiento entre plantas al interior del surco, lo que propicia una mejor penetración de luz y baja competencia por nutrientes, favoreciendo el desarrollo del área foliar. Este mayor espaciamiento entre individuos en nuestro estudio se obtuvo en la siembra a 20 cm entre surcos donde también se observó una mayor superficie foliar promedio por planta (datos no presentados). En plantas en surcos estrechos la superficie foliar por planta fue de 2010.8 cm<sup>2</sup>, mientras que en surcos espaciados a 75 cm fue de 1590.7 cm<sup>2</sup>. En sorgo también ha sido reportado<sup>(38)</sup>, como lo esperado, una mayor concentración de proteína en hojas que en tallos.

Los resultados de nuestro estudio coinciden con otros<sup>(39,40)</sup> realizados en maíz, en los que se observó que el maíz acumulaba más nitrógeno

was 15.2 g kg<sup>-1</sup> higher (Table 5). These differences can be attributed to greater structural organ maturity in 2007<sup>(35)</sup>, and the greater cell wall contribution from the pericarp of the larger number of seeds produced in 2007. None of the forage quality traits differed between the two evaluated sowing densities (Table 5). In other words, the increase in sowing density from 33 to 65 seeds/m<sup>2</sup> did not improve production or forage quality and could therefore negatively affect producer profit margins due to the cost of the additional seed. Although the present data were generated in France, they remain applicable in Mexico because this is an analysis of physiological response to environmental effect, which is independent of country.

## CONCLUSIONS AND IMPLICATIONS

Year and row spacing caused variation in DMY and forage quality traits, but without interaction between these two factors. Differing climatic conditions between years induced variation in plant height, plant density and PDM concentration, the three traits most closely correlated to DMS during the three-season study period. Interannual climate differences also affected digestibility, which was inversely associated with variation in ADL, ash concentration and TGW. No differences in DMY or forage quality were observed between the evaluated sowing densities (33 vs 65 seeds/m<sup>2</sup>) at the 20 cm row spacing, meaning that high sowing density is not an advantage with sorghum. In addition, the conventional 75 cm row spacing did not improve DMY. Sowing at low density (33 seeds/m<sup>2</sup>) in narrowly-spaced rows (20 cm) increases dry matter yield and forage protein concentration.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The research was partially supported by a grant from the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de

en planta entera conforme la distancia entre surcos disminuía. Existen otros estudios<sup>(31,41,42)</sup> que demuestran que la siembra de maíz en surcos estrechos no perjudica el valor nutritivo de la planta entera.

#### *Efecto de la densidad de siembra en surcos con espaciamiento estrecho*

No hubo interacción año x densidad de siembra para ninguno de los caracteres de la calidad del forraje (Cuadro 2). La digestibilidad fue 47.0 g kg<sup>-1</sup> menor en el primer año que en 2008, y tuvo una correlación inversa con la FDA, LDA y con la concentración de cenizas (Cuadro 4), los cuales fueron, respectivamente, de 27.1, 8.9, y 15.2 g kg<sup>-1</sup> mayores en 2007 que en 2008 (Cuadro 5). Lo anterior se atribuye a la mayor madurez de órganos estructurales<sup>(35)</sup>, además del aporte de paredes celulares del pericarpio por el mayor número de semillas producidas en 2007. Por otra parte, ninguno de los caracteres de la calidad de forraje fue diferente entre las dos densidades de siembra evaluadas (Cuadro 5). Esto significa que con el incremento de la densidad de siembra (de 33 a 65 semillas/m<sup>2</sup>) no se mejora la producción ni la calidad del forraje de sorgo, y podría afectarse la economía del productor por el mayor gasto por compra de semilla. Los resultados del presente estudio son aplicables a México, por tratarse de un análisis de la respuesta fisiológica del sorgo al efecto ambiental, respuesta independiente del país del que se trate.

## CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

El año y espaciamiento entre surcos fueron fuentes de variación del RMS y de los caracteres de calidad del forraje, sin encontrar interacción entre estos dos factores. Diferencias en condiciones climáticas indujeron variación en altura de planta, plantas/m<sup>2</sup> y concentración de MSP, que fueron los caracteres más estrechamente correlacionados con el RMS durante los tres años de estudio. Las diferencias ambientales entre años también afectaron la

México to EDBA for a one-year sabbatical at the INRA, Lusignan, France.

*End of english version*

---

digestibilidad del sorgo, la cual estuvo asociada inversamente con la variación de los caracteres: LDA, concentración de cenizas en la planta y PMG. No se observaron diferencias en RMS ni en calidad del forraje de sorgo entre las dos densidades de siembra evaluadas (33 vs 65 semillas/m<sup>2</sup>) en el espaciamiento estrecho entre surcos (20 cm entre surcos) indicando que la siembra de sorgo a alta densidad no presenta ventajas productivas. Por lo anterior, el sorgo sembrado en espaciamiento convencional (75 cm entre surcos) no mejora el RMS, pero sembrado en surcos estrechos a una baja densidad de siembra (33 semillas/m<sup>2</sup>) incrementa el rendimiento de materia seca y la concentración de proteína del forraje de sorgo.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de México por su apoyo financiero para la realización de su estancia sabática por un año en el INRA-Lusignan de Francia.

## LITERATURA CITADA

1. Emile JC, Charrier X, Do Nascimento WG, Barrière Y. Utilisation d'ensilage de sorgho plante entière pour l'alimentation de vaches laitières. p. 209. *In* 12<sup>e</sup> Rencontres Recherches Ruminantes. Paris, les 7 et 8 décembre; 2005.
2. Oliver AL, Pedersen JF, Grant RJ and Klopfenstein TJ. Comparative effects of the sorghum bmr-6 and bmr-12 genes: I. Forage sorghum yield and quality. *Crop Sci* 2005;45:2234-2239.
3. Bolaños-Aguilar ED, Emile JC, Enríquez-Quiroz JF. Les fourrages au Mexique: ressources, valorisation et perspectives de recherche. *Fourrages* 2010;204:277-282.

## DISTANCIA ENTRE SURCOS Y DENSIDAD DE SIEMBRA EN EL RENDIMIENTO DE SORGO

4. Lemaire G, Charrier X, Hébert Y. Nitrogen uptake capacities of maize and sorghum crops in different nitrogen and water supply conditions. *Agronomie* 1996;16:231-246.
5. Legarto J. L'utilisation en ensilage plante entière des sorghos grains et sucriers: intérêts et limites pour les régions sèches. *Fourrages* 2000;163:323-338.
6. Emile JC, Al Rifai M, Charrier X, Leroy P, Barrière Y. Grain sorghum silage as an alternative to irrigated maize silage. Proc 21 General Meet European Grass Fed. Badajoz, Spain, 2006:80-82.
7. Traxler MJ, Fox DG, Van Soest PJ, *et al.* Predicting forage indigestible NDF from lignin concentration. *J Anim Sci* 1998;76:1469-1480.
8. Humphreys JM, Chapple CC. Rewriting the lignin road-map. *Curr. Opin. Plant Biol* 2002;5:224-229.
9. Steiner JL. Dryland grain sorghum water use, light interception, and growth responses to planting geometry. *Agron J* 1986;78:720-726.
10. Berenguer MJ, Faci JM. Sorghum (*Sorghum Bicolor* L. Moench) yield compensation processes under different plant densities and variable water supply. *Eur J Agron* 2001;15:43-55.
11. Carmi A, Aharoni Y, Edelstein M, *et al.* Effects of irrigation and in vitro digestibility of a new forage sorghum variety, Tal, at two maturity stages. *Anim Feed Sci Technol* 2006;131:120-132.
12. Masaoka Y, Takano N. Studies on the digestibility of forage crops I. Effect of plant density on the feeding value of a sorghum-sudangrass hybrid. *J Jpn Grassl Sci* 1980;26:179-184.
13. Ferraris R, Charles-Edward DA. A comparative analysis of the growth of sweet and forage sorghum crops I. Dry matter production, phenology, and morphology. *Aust J Agric Res* 1986;37:495-512.
14. Baumhardt RL, Howell TA. Seeding practices, cultivar maturity and irrigation effects on simulated grain sorghum yield. *Agron J* 2006;98:462-470.
15. Huda AKS. Simulation growth and yield responses of sorghum to changes in plant density. *Agron J* 1988;80:541-547.
16. Caravetta GJ, Cherney JH, Johnson KD. Within-row spacing influences on diverse sorghum genotypes: II. Dry matter yield and forage quality. *Agron J* 1990;82:210-215.
17. Marsalis MA, Angadi SV, Contreras-Govea FE. Dry matter yield and nutritive value of corn, forage sorghum, and BMR forage sorghum at different plant populations and nitrogen rates. *Field Crop Res* 2010;116:52-57
18. Barrière Y, Guillet C, Goffner D, Fichon M. Genetic variation and breeding strategies for improved cell wall digestibility in annual forage crops. A Review. *Anim Res* 2003;52:193-228.
19. Darby HM, Lauer JG. Harvest date and hybrid influence on corn forage yield, quality, and preservation. *Agron J* 2002;94:559-566.
20. FAO-ISRIC. Guidelines for Soil Description. Revised, third ed. Food and Agricultural Organisation, Rome. 1990.
21. SAS Institute. Statistical Analysis System for Windows, Release 9.1.3. SAS Institute, Cary, NC. 2003.
22. Abdel-Motagally FMF. Evaluation of water use efficiency under different water regimes in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *World J Agric Sci* 2010;5:499-505.
23. Bolaños-Aguilar ED, Huyghe C, Ecalle C, Hacquet J, Julier B. Effect of cultivar and environment on seed yield in alfalfa. *Crop Sci* 2002;44:45-50.
24. Blum A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?. *Aust J Agric Res* 2005;56:1159-1168.
25. Ta CT, Weiland RT. Nitrogen partitioning in maize during ear development. *Crop Sci* 1992;32:443-451.
26. Borrell AK, Hammer GL. Nitrogen Dynamics and the physiological basis of stay-green in sorghum. *Crop Sci* 2000;40:1295-1307.
27. Kamoshita A, Muchow RC, Cooper M, Fukai S. Grain nitrogen concentration differs among three sorghum hybrids with similar grain yield. *Aust J Agric Res* 1999;50:137-146.
28. Cook SJ, Gilbert MA, Shelton HM. Tropical pasture establishment. 3. Impact of plant competition on seedling growth and survival. *Trop Grassl* 1993;27:291-301.
29. Caravetta GJ, Cherney JH, Johnson KD. Within-row spacing influences on diverse sorghum genotypes: I. Morphology. *Agron J* 1990;82:206-210.
30. Cox WJ, Cherney DJR. Evaluation of narrow-row corn forage in field-scale studies. *Agron J* 2002;94:321-325.
31. Baron VS, Najda HG, Stevenson FC. Influence of population density, row spacing and hybrid on forage corn yield and nutritive value in a cool-season environment. *Can J Plant Sci* 2006;86:1131-1138.
32. Borrás L, Maddonni GA, Otegui ME. Leaf senescence in maize hybrids: plant population, row spacing and kernel set effects. *Field Crops Res* 2003;82:13-26.
33. Lemaire G, Meynard JM. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. In: Lemaire G editor. *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. ISBN 3-540-62223-3 Springer-Verlag Berlin, Heidelberg New York 1997:45-55.
34. Marino MA, Mazzanti A, Assuero SG, Gastal F, Echeverría HE, Andrade F. Nitrogen dilution curves and nitrogen use efficiency during winter-spring growth of annual ryegrass. *Agronomy J* 2004;96:601-607.
35. Albrecht KA, Wedin WF, Buxton DR. Cell wall composition and digestibility of alfalfa stems and leaves. *Crop Sci* 1987;27:735-741.
36. Filya I. Nutritive value and aerobic stability at whole crop maize silage harvested at stages of maturity. *Anim Feed Sci Technol* 2004;116:141-150.
37. Turgut I, Bilgili U, Duman A, Acikgoz E. Production of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) increases with increased plant densities and nitrogen fertilizer levels. *Acta Agric Scand* 2005;55:236-240.
38. Singh SP, Luthra YP, Joshi UN. Biochemical differences in some forage sorghum varieties in relation to *Pyrilla perpusilla* Walker infestation. *Acta Phytol Entomol Hung* 2007;42:17-23.
39. Cox WJ, Cherney DJR. Row spacing, plant density, and nitrogen effects on corn silage. *Agron J* 2001;93:597-602.
40. Bolaños-Aguilar ED, Emile JC. Distancia entre surcos en el rendimiento y calidad de la materia seca de maíz y de sorgo. *Rev Mex Cienc Pecu* 2011;2(3):299-312.

41. Cox WJ, Hanchar JJ, Knoblauch WA, Cherney JH. Growth, yield, quality and economics of corn silage under different row spacings. *Agron J* 2006;98:163-167.

42. Iptas S, Acar AA. Effects of hybrid and row spacing on maize forage yield and quality. *Plant Soil Environ* 2006;52:515-522.