

TAMAÑOS DE SEMILLA, SUBSTANCIAS VIGORIZANTES Y PRUEBAS DE VIGOR EN SORGOS TOLERANTES AL FRÍO

SEED SIZES, INVIGORIZATION SUBSTANCES, AND VIGOR TESTS IN COLD TOLERANT SORGHUMS

Juan Valadez-Gutiérrez¹, Leopoldo E. Mendoza-Onofre¹, Leobigildo Córdova-Téllez¹,
Humberto Vaquera-Huerta², Ma. del Carmen Mendoza-Castillo³ y Gabino García-de los Santos¹

¹Semillas, ²Estadística, ³Genética. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo, Estado de México. (juav@gcolpos.mx).

RESUMEN

El lento crecimiento durante el establecimiento en campo de híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) tolerantes al frío en los Valles Altos Centrales de México, se ha atribuido al efecto de bajas temperaturas y al reducido tamaño de la semilla. De abril a mayo de 2005, en condiciones de laboratorio, se evaluaron 36 tratamientos en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, producto de la combinación factorial de tres genotipos (VA-110 y dos líneas mantenedoras B1 y B9), tres tamaños de semilla (grande, mediano y chico) y cuatro tipos de vigorización a la semilla (osmocondicionamiento, Maxi Grow T. S.[®], nitrato de potasio y testigo), en tres pruebas de vigor: 1) germinación estándar; 2) frío; 3) frío modificada, en la cual la fase de germinación se mantuvo sin luz. La unidad experimental fue 25 semillas. Las variables analizadas fueron: el porcentaje de germinación, plántulas anormales y semillas muertas; la longitud (cm) promedio de plúmula y de radícula, por plántula; y el peso seco (mg) total de plúmulas, radículas y restos de semillas de cada unidad experimental. La longitud de la plúmula fue mayor ($p \leq 0.05$) en la prueba de frío pero la radícula se elongó más ($p \leq 0.05$) en la prueba de frío modificada. El peso seco total de plúmulas fue superior 3 a 4 veces al peso seco total de radículas, según las condiciones de germinación. La variedad VA-110 superó ($p \leq 0.05$) en germinación y vigor a las líneas B1 y B9. No siempre los mayores tamaños de semilla exhibieron las mayores expresiones de germinación y vigor, debido a su interacción con genotipos y con las sustancias vigorizantes. Los tratamientos de vigorización no fueron una alternativa factible para superar el problema de lento crecimiento de plántula de los genotipos de sorgo.

Palabras clave: *Sorghum bicolor* L. Moench, acondicionamiento osmótico, germinación, prueba de frío.

ABSTRACT

Slow growth during the field establishment of cold tolerant sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in the Central High Valleys of México, has been attributed to the effect of low temperatures and to small seed size. From April to May of 2005, under laboratory conditions, 36 treatments were evaluated in a complete randomized block design with four replicates, product of the factorial combination of three genotypes (VA-110 and two maintainer lines, B1 and B9), three seed sizes (large, medium and small) and four types of seed invigoration (osmoconditioning, Maxi Grow T.S.[®], potassium nitrate, and control), in three vigor tests: 1) standard germination; 2) cold; 3) modified cold, in which the germination phase was maintained without light. The experimental unit consisted of 25 seeds. The variables analyzed were: percentage of germination, abnormal seedlings, and dead seeds; average length (cm) of plumule and radicle per seedling; and total dry weight (mg) of plumules, radicles and remains of seeds of each experimental unit. The length of the plumule was greater ($p \leq 0.05$) in the cold test, but the radicle was longer ($p \leq 0.05$) in the modified cold test. Total dry weight of plumules was 3 to 4 times greater than the total dry weight of radicles, according to the germination conditions. The variety VA-110 surpassed ($p \leq 0.05$) lines B1 and B9 in germination and vigor. The largest seed sizes did not always exhibit the highest expressions of germination and vigor, due to their interaction with genotypes and with the invigoration substances. The invigoration treatments were not a viable alternative for overcoming the problem of slow growth of the seedling of the sorghum genotypes.

Key words: *Sorghum bicolor* L. Moench, osmotic conditioning, germination, cold test.

INTRODUCTION

A high percentage of germination and excellent seedling vigor are desirable characteristics of seed quality in any cereal. Both characteristics allow a seedling to have better tolerance to diseases and provide it with more strength to emerge from the soil

INTRODUCCIÓN

Un alto porcentaje de germinación, y un excelente vigor de plántula son características deseables de calidad de la semilla en cualquier cereal; ambas características permiten a una plántula tolerar mejor las enfermedades y le confieren una mayor fortaleza para emerger del suelo (Brar *et al.*, 1992). El vigor de plántula es una característica determinada por factores genéticos, pero influenciada por el ambiente (Anda y Pinter, 1994).

El Programa de Mejoramiento Genético de Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) del Colegio de Postgraduados (PMGS-CP) desarrolló un primer grupo de sorgos híbridos tolerantes al frío que producen grano en los Valles Altos Centrales de México, que incluyen regiones ubicadas a 2200 m de altitud donde prevalecen temperaturas mínimas cercanas a 10 °C durante la estación de crecimiento (Osuna-Ortega *et al.*, 2000, 2003). Sin embargo, durante la fase de validación de estos híbridos se observó que en las primeras semanas posteriores a la emergencia, se presentaba un lento crecimiento de plántulas, comparado con maíz (*Zea mays* L.), lo cual se atribuyó a las bajas temperaturas que prevalecen en la región y al reducido tamaño o peso de la semilla. Temperaturas menores de 10 °C y mayores de 35 °C afectan negativamente la germinación de las semillas de sorgo, aunque de manera diferencial entre genotipos (Radford y Henzell, 1990). La selección para una germinación rápida y uniforme en una amplia gama de temperaturas permitiría obtener genotipos de rápido establecimiento de plántulas en campo (Brar y Stewart, 1994).

El mayor vigor de plántula, y por ende, un rápido establecimiento en campo, puede lograrse sembrando semillas de mayor tamaño en sorgo (Rama *et al.*, 1999), maíz (Martinelli y Moreira de Carvalho, 1999), trigo (*Triticum aestivum* L.) (Lafond y Baker, 1986; Baalbaki y Copeland, 1997), y frijol mungo (*Vigna radiata*) (Dharmalingam y Basu, 1987). Otra opción es usar sustancias químicas que incrementen el vigor. Así, De *et al.* (2003) evaluaron el efecto vigorizante del ácido salicílico, blanqueador en polvo, chile rojo (*Capsicum frutescens* L.) en polvo y polvo de semillas de fenogreco (*Trigonella foenum-graecum* L.) en semillas de tamaño chico, mediano y grande de trigo. El ácido salicílico y el polvo de fenogreco mejoraron la calidad fisiológica de la semilla y el rendimiento de grano en campo, mejora que se mantuvo en el post-almacenamiento de las semillas de tamaño grande. Al estudiar la velocidad de germinación y las unidades térmicas al 50% de germinación en 10 genotipos de sorgo, en siete temperaturas (4 a 25 °C), con y sin osmocondicionamiento en polietilén glicol 6000,

(Brar *et al.*, 1992). Seedling vigor is a characteristic that is determined by genetic factors, but is influenced by the environment (Anda and Pinter, 1994).

The Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) Genetic Improvement Program of the Colegio de Postgraduados (PMGS-CP) developed a first group of cold tolerant hybrid sorghums that produce grain in the Central High Valleys of México, which include regions located at 2200 m altitude where minimum temperatures approaching 10 °C prevail during the growing season (Osuna-Ortega *et al.*, 2000, 2003). However, during the validation phase of these hybrids, it was observed that in the first weeks after emergence, there was slow growth of seedlings, with respect to maize (*Zea mays* L.), which was attributed to the low temperatures that prevail in the region and to the reduced size or weight of the seed. Temperatures below 10 °C and above 35 °C have a negative effect on the germination of sorghum seeds, although the effect is differential among genotypes (Radford and Henzell, 1990). The selection for a fast and uniform germination in a wide range of temperatures would make it possible to obtain genotypes of rapid seedling establishment in the field (Brar and Stewart, 1994).

The greatest seedling vigor, and thus, a rapid field establishment, can be obtained by sowing larger seeds in sorghum (Rama *et al.*, 1999), maize (Martinelli and Moreira de Carvalho, 1999), wheat (*Triticum aestivum* L.) (Lafond and Baker, 1986; Baalbaki and Copeland, 1997), and mungo bean (*Vigna radiata*) (Dharmalingam and Basu, 1987). Another option is to apply chemical substances that increase vigor. Thus, De *et al.* (2003) evaluated the invigorizing effect of salicylic acid, powdered bleach, red chile powder (*Capsicum frutescens* L.) and powdered fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) seeds in small, medium and large wheat seeds. The salicylic acid and the fenugreek powder improved the physiological quality of the seed and the grain yield in the field, improvement that was maintained in the post-storage of the large seeds. When studying the germination rate and the thermal units at 50% germination in 10 genotypes of sorghum, at seven temperatures (4 to 25 °C), with and without osmo-conditioning in polyethylene glycol 6000, Foti *et al.* (2002) observed that the osmotic solution promoted germination at low temperatures (8 to 10 °C) and reduced the base temperature in 1 °C, compared with the control.

The application of the laboratory tests to measure vigor depends on the concept of vigor that is applied. Copeland (1979) considers that an ideal vigor test should be fast, easy to apply, without complex equipment requirements, and be capable of detecting minimum differences in vigor. Among the vigor

Foti *et al.* (2002) observaron que la solución osmótica promovió la germinación a bajas temperaturas (8 a 10 °C) y redujo la temperatura base en 1 °C, comparado con el testigo.

La aplicación de las pruebas de laboratorio para medir el vigor depende del concepto de vigor usado. Copeland (1979) considera que una prueba ideal de vigor debería ser rápida, fácil de ejecutar, no requerir de equipo complejo y capaz de detectar mínimas diferencias en vigor. Entre las pruebas de vigor más utilizadas destaca la prueba de frío, quizás por ser una de las más antiguas; consiste en colocar las semillas en toallas de papel absorbente (o en suelo) a 10 °C por un tiempo específico, según la especie a evaluar, aplicar condiciones favorables para la germinación y medir el vigor mediante el porcentaje de germinación, longitud de plúmula, y el peso fresco o peso seco de plántulas (McDonald, 1975; Copeland, 1979). Sin embargo, la evaluación debería considerar varios ambientes, en condiciones de estrés y normales, para potenciar el efecto de la interacción genético-ambiental. Tiryaki y Andrews (2001) aplicaron una secuencia de metodologías en sorgo para evaluar la germinación y el crecimiento de plántulas en laboratorio, invernadero y campo, en temperaturas de 15 a 34 °C, que permitió efectuar un tamizado rápido y efectivo en numerosos genotipos.

Valadez-Gutiérrez *et al.* (2006) aplicaron raleo de flores en tres genotipos de sorgo para aumentar el tamaño de las semillas sin modificar la constitución genética de cada material; el tamaño de semilla aumentó hasta 33% en VA-110 y, en promedio de los otros genotipos, hasta 55%. En el presente estudio, tres tamaños de semilla por genotipo generados en ese experimento fueron sometidos a cuatro tipos de vigorización, evaluados mediante la germinación y el vigor de las plántulas en tres condiciones de laboratorio, con el objetivo de identificar una combinación de factores que ayude a elucidar el problema del lento crecimiento de las plántulas de sorgo en los Valles Altos Centrales de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el ciclo Primavera 2005, en el Laboratorio de Calidad de Semillas del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, se evaluaron 36 tratamientos, producto de la combinación factorial de tres genotipos (la variedad de polinización libre, VA-110, y dos líneas mantenedoras de la fertilidad, B1 y B9); tres tamaños de semilla (TS): TS1, grande, con peso promedio de 100 semillas de 2.9 g; TS2, mediano, 2.6 g; y TS3, chico, 2.0 g; y cuatro tipos de vigorización a la semilla: 1) osmocondicionamiento (PEG -0.75 Mpa, remojo por 2 h a 10 °C); 2) Maxi-Grow T. S.[®] (bioestimulante, 1.25 mL kg⁻¹ semilla); 3) nitrato de potasio al 5%

tests, the cold test is one of the most widely used, perhaps because it is one of the oldest. It consists of placing the seeds on absorbent paper towels (or in the soil) at 10 °C for a specific time, according to the species to evaluate, applying conditions favourable for germination and measuring vigor through the percentage of germination, plumule length, and dry weight or fresh weight of seedlings (McDonald, 1975; Copeland, 1979). However, the evaluation should consider several environments, under normal and stress conditions, to potentiate the effect of genetic-environmental interaction. Tiryaki and Andrews (2001) applied a sequence of methodologies in sorghum to evaluate the germination and growth of the seedlings under laboratory, greenhouse, and field conditions from 15 to 34 °C, which allowed to carry out a rapid and effective screening of a numerous genotypes.

Valadez-Gutiérrez *et al.* (2006) applied flower thinning in three sorghum genotypes to increase the seed size without modifying the genetic constitution of each material; the seed size increased up to 33% in VA-110, and in the average of the other genotypes, up to 55%. In the present study, three seed sizes per genotype generated in that experiment were subjected to four types of invigorization, evaluated through the germination and vigor of the seedlings under three laboratory conditions, with the objective of identifying a combination of factors that help to elucidate the problem of slow growth of sorghum seedlings in the Central High Valleys of México.

MATERIALS AND METHODS

In the 2005 Spring cycle, in the Seed Quality Laboratory of the Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, State of México, 36 treatments were evaluated, product of the factorial combination of three genotypes (the open pollinated variety, VA-110, and two fertility maintainer lines, B1 and B9); three seed sizes (TS): TS1, large, with an average weight of 100 seeds of 2.9 g; TS2, medium, 2.6 g; and TS3, small, 2.0 mg; and four types of seed invigorization: 1) osmo-conditioning (PEG -0.75 Mpa, soaked for 2 h at 10 °C); 2) Maxi-Grow T. S.[®] (biostimulant, 1.25 mL kg⁻¹ seed); 3) potassium nitrate at 5% (soaked during 2 h at 30 °C); 4) control (without any substance). The seed sizes of each genotype were obtained through the application of flower thinning in the 2003 production season in Montecillo, México (Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2006).

The seeds of each treatment were subjected to three tests to determine vigor: 1) standard germination test (ISTA, 1999): the seeds were placed in wet substrate and were incubated at 25 °C with light, but contrary to the recommendations of the ISTA, a single count was carried out on the sixth day due to the fact that the seedlings showed rapid development; 2) cold test: the seeds were

(remojo durante 2 h a 30 °C); 4) testigo (sin sustancia alguna). Los tamaños de semilla de cada genotipo se obtuvieron por la aplicación de raleo de flores en el ciclo de producción 2003 en Montecillo, México (Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2006).

Las semillas de cada tratamiento se sometieron a tres pruebas para determinar el vigor: 1) prueba de germinación estándar (ISTA, 1999): las semillas se colocaron en sustrato húmedo y se incubaron a 25 °C con luz, pero a diferencia de las recomendaciones de la ISTA se realizó un solo conteo al sexto día debido a que las plántulas mostraron un rápido desarrollo; 2) prueba de frío: las semillas se colocaron en un sustrato húmedo a 10 °C por 7 d y se pasaron a una cámara germinadora a 25 °C, con luz, por 6 d; 3) prueba de frío modificada: se siguió el mismo procedimiento que para la prueba anterior, pero la fase de germinación ocurrió en oscuridad.

En cada prueba se emplearon cuatro repeticiones (tacos) de 25 semillas usando toallas de papel (34.5×24.5 cm) donde se marcaron líneas horizontales cada 2 cm. En la parte media del papel se colocó una cinta adhesiva de doble cara, sobre la cual se pegaron las semillas de manera equidistante, cuidando que el embrión quedara siempre en la misma orientación y opuesto a la cinta adhesiva.

Al concluir el período de incubación, en cada repetición se determinó: el porcentaje de plántulas normales (PG), anormales (PA) y semillas muertas (SM); la longitud (cm) promedio de plúmula (LP) y de radícula (LR) por plántula, mediante la sumatoria del número de plúmulas (o radículas) por su longitud respectiva en cada categoría (delimitada por las líneas trazadas en el papel germinador) y dividida entre 25; y el peso seco total (mg) de plúmulas (PPL), radículas (PR) y restos de semillas (PRS) de la unidad experimental, después de que cada órgano se secó en estufa a 72 °C durante 48 h.

Para las variables expresadas en porcentaje (Y_i) inicialmente se efectuó una transformación angular $[\arcseno (Y_i)^{1/2}]$. Después se realizó un análisis de varianza (AdV) combinado para evaluar el efecto de las condiciones ambientales de las pruebas de vigor y el efecto de tratamientos anidados dentro esas pruebas; así como un AdV individual para cada prueba, con base en un diseño completamente al azar, con cuatro repeticiones. Se utilizó el procedimiento GLM (SAS, 1989), las medias se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) y los datos se presentan en las unidades de medición originales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del ambiente de las pruebas de vigor

Las condiciones del ambiente de las pruebas y los tratamientos dentro de cada prueba tuvieron un efecto altamente significativo ($p \leq 0.01$) en las variables (Cuadro 1), es decir, las condiciones de temperatura y de luminosidad en las pruebas de vigor, así como los tratamientos (genotipos, tamaños de semilla y tipos de vigorización) influyeron de manera significativa en las variables relacionadas con la germinación y el vigor de las plántulas.

placed in a wet substrate at 10 °C for 7 d, and then moved to a germination chamber at 25 °C, with light, for 6 d; 3) modified cold test: the same procedure was followed as for the previous test, but the germination phase occurred in darkness.

In each test four replicates (tacos) of 25 seeds were applied, using paper towels (34.5×24.5 cm) in which horizontal lines were marked every 2 cm. In the middle part of the paper, a double sided adhesive tape was placed, to which the seeds were adhered in an equidistant arrangement, taking care that the embryo was always oriented in the same direction and opposite to the adhesive tape.

At the end of the incubation period, the following were determined in each replicate: the percentage of normal seedlings (PG), abnormal seedlings (PA) and dead seeds (SM); average length (cm) of the plumule (LP) and of the radicle (LR) per seedling, by means of the sum of the number of plumules (or radicles) multiplied by their respective length in each category (delimited by the lines drawn on the paper towels) and divided by 25; and the total dry weight (mg) of plumules (PPL), radicles (PR), and remains of seeds (PRS) of the experimental unit, after each organ was dried in the oven at 72 °C during 48 h.

For the variables expressed in percentage (Y_i), an angular transformation was initially carried out $[\arcsine (Y_i)^{1/2}]$. Then a combined variance analysis was made (ANOVA) to evaluate the effect of the environmental conditions of the vigor tests and the effect of nested treatments within these tests; an individual ANOVA was also made for each test, based on a completely randomized design, with four replicates. The GLM procedure was used (SAS, 1989), means were compared with the Tukey test ($p \leq 0.05$) and the data are presented in the original units of measurement.

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of the environment and vigor tests

The environmental conditions of the tests and the treatments within each test had a highly significant effect ($p \leq 0.01$) on the variables (Table 1), that is, the conditions of temperature and light in the vigor tests, as well as the treatments (genotypes, seed sizes, and types of invigoration) had a significant influence on the variables related with the germination and vigor of the seedlings.

The mean squares, the significance of the variables, and the sources of variation for each test are shown in Table 2. In the standard germination test, of the 56 possible cases, only three were not significant; in the cold test, it was not detected in 11 and in the modified cold test, in five cases. According to Copeland (1979), a desirable characteristic of an ideal vigor test is to detect minimum differences of the variables associated to this character, which is best obtained in the tests of standard germination and modified cold. Consequently, it is suggested that these two tests could be used to evaluate germination and

Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia de los efectos ambientales de las pruebas de vigor y de tratamientos anidados en las pruebas para las variables en estudio.**Table 1. Mean squares and significance of the environmental effects of the vigor tests and treatments nested in the tests for the variables under study.**

Variable	Pruebas de vigor	(Trat)/Pruebas de vigor	Coefficiente de variación (%)
Longitud de plúmula	112.98 **	19.09 **	21
Longitud de radícula	76.75 **	26.29 **	16
Porcentaje de germinación	891.80 **	108.81 **	6
Plántulas anormales	4194.29 **	18.45 **	18
Semillas muertas	287.97 **	112.05 **	18
Peso seco de plúmulas	2.66 **	0.68 **	18
Peso seco de radículas	0.30 **	0.24 **	28
Peso seco de restos de semillas	4.17 **	0.56 **	10

En el Cuadro 2 se presentan los cuadrados medios, la significancia de las variables y las fuentes de variación para cada prueba. En la prueba de germinación estándar, de los 56 casos posibles sólo en tres no hubo significancia; en la prueba de frío no se detectó en 11 y en la prueba de frío modificada en cinco casos. Según Copeland (1979), una característica deseable de una prueba ideal de vigor es detectar diferencias mínimas de las variables asociadas a ese carácter, lo cual se consigue mejor en las pruebas de germinación estándar y de frío modificada. En consecuencia, se sugiere utilizar esas dos pruebas para evaluar la germinación y el vigor de semillas de sorgos tolerantes al frío, según el planteamiento de Tiriyaki y Andrews (2001) de emplear ambientes contrastantes.

En la prueba de frío, de los 11 casos sin significancia, siete correspondieron al efecto de las interacciones entre las fuentes principales de variación, en variables relacionadas con los pesos secos totales de plúmula y radícula (Cuadro 2), probablemente porque en esa prueba el período de germinación transcurrió con luz, lo que permitiría a esos órganos reponerse del posible efecto del período inicial de frío.

En la Figura 1 se presentan los promedios de cada variable por prueba de vigor. Dado que en la prueba de germinación estándar hubo la mayor frecuencia de casos estadísticamente significativos, se infiere que las condiciones ambientales de esa prueba fueron las más adecuadas para expresar el máximo potencial de germinación. Bajo tal premisa, destaca que en esa prueba se aprecia menor peso total de los restos de semilla ($p \leq 0.05$) (Figura 1c) que en las otras dos; las longitudes de plúmula y radícula (Figura 1a) son similares en la prueba estándar de germinación y de frío, pero cuando las semillas germinaron en la obscuridad después del período de frío (prueba de frío modificada) la radícula presentó mayor ($p \leq 0.05$) elongación que la plúmula. La acumulación de materia seca total en plúmulas fue 3 a 4 veces superior que en radículas, dependiendo del ambiente de evaluación. Lo anterior

vigor of cold tolerant sorghum seeds, according to the postulate of Tiriyaki and Andrews (2001) of employing contrasting environments.

In the cold test, of the 11 cases without significance, seven corresponded to the effect of the interactions between the main sources of variation, in variables related to the total dry weights of plumule and radicle (Table 2), probably because in this test the germination period took place with light, which would allowed these organs to recover from the possible effect of the initial cold period.

The averages of each variable per vigor test are shown in Figure 1. Given that the standard germination test had the highest frequency of statistically significant cases, it is inferred that the environmental conditions of this test were the most adequate for expressing the maximum germination potential. Under this premise, it is outstanding that in this test lower total weight is observed in the remains of seeds ($p \leq 0.05$) (Figure 1c) than in the other two; the lengths of plumule and radicle (Figure 1a) are of a similar in the tests of standard germination and cold, but when the seeds germinated in darkness after the cold period (modified cold test), the radicle showed greater ($p \leq 0.05$) elongation than the plumule. The accumulation of total dry matter in plumules was 3 to 4 times higher than in radicles, depending on the environment of evaluation. The above is attributed to the fact that the mobilization patterns of the reserve substances from the cotyledons, or in its case, the endosperm, towards the growing embryonic axis, are different under conditions of light than of darkness (Mahanta and Sarma, 1995; Halmer and Bewley, 1982).

Effect of the main sources of variation on the vigor tests

The individual analysis of the average effect of the genotypes (Tables 3, 4 and 5) shows that,

Cuadro 2. Cuadrados medios y significancia de las fuentes de variación correspondientes a los tratamientos en cada prueba de vigor para las variables analizadas.**Table 2. Mean squares and significance of the sources of variation corresponding to the treatments in each vigor test for the variables analyzed.**

Variable	G	TS	VG	G×TS	G×VG	TS×VG	G×TS×VG	CV (%)
Prueba de germinación estándar (6 d a 25 °C, con luz)								
LP	118.92**	46.86**	8.25**	4.26**	9.82**	14.70**	9.47**	8
LR	113.05**	3.28**	17.61**	7.27**	21.64**	4.94**	8.69**	7
PG	999.48**	320.06**	186.23**	377.03**	300.26**	82.10**	125.86**	2
PA	397.14**	254.55**	76.25**	145.86**	386.91**	165.52**	314.53**	22
SM	653.60**	320.20**	264.56**	340.44**	187.28**	70.41**	148.81**	4
PPL	0.0500**	0.0034**	0.0025**	0.0032**	0.0036**	0.0005 ns	0.0020**	17
PR	0.0036**	0.0002**	0.0002**	0.0004**	0.0004**	0.0001**	0.0003**	13
PRS	0.0283**	0.0452**	0.0042**	0.0012 ns	0.0014*	0.0005 ns	0.0023**	15
Prueba de frío (7 d a 10 °C, en obscuridad + 6 d a 25 °C, con luz)								
LP	391.04**	8.48**	7.35**	1.43 ns	14.34**	11.36**	6.22**	11
LR	608.35**	8.55**	24.34**	14.81**	9.13**	3.98**	6.75**	10
PG	1918.21**	78.34**	1402.04**	375.85**	187.76**	245.19**	210.38**	5
PA	169.73**	305.30**	125.03**	48.83**	295.13**	164.16**	121.07**	22
SM	1596.89**	18.76 ns	1369.89**	416.17**	220.87**	291.22**	223.52**	12
PPL	0.1418**	0.0054**	0.0076**	0.0057**	0.0016 ns	0.0017 ns	0.0017 ns	29
PR	0.0091**	0.4×10 ⁻⁴ ns	0.0006**	0.1×10 ⁻³ ns	0.0001 ns	0.2×10 ⁻³ ns	0.1×10 ⁻⁴ ns	29
PRS	0.1554**	0.0371**	0.0236**	0.0083**	0.0050*	0.0013 ns	0.0043*	22
Prueba de frío modificada (7 d a 10 °C, en obscuridad + 6 d a 25 °C, sin luz)								
LP	259.61**	22.80**	13.97**	2.16 ns	6.33**	3.41 ns	8.28**	13
LR	318.34**	2.18 ns	21.76**	20.94**	9.95**	1.00 ns	5.12*	13
PG	1577.00**	224.50**	1550.15**	799.34**	284.83**	219.60**	422.50**	10
PA	283.82**	92.14**	366.46**	64.82**	74.13**	121.58**	119.75**	22
PS	1691.46**	246.58**	1947.01**	982.04**	334.56**	344.22**	321.80**	29
PPL	0.0854 **	0.0003**	0.0042 **	0.0064**	0.0070**	0.0028**	0.0062**	3
PS	0.0049**	0.0003**	0.0010**	0.0003**	0.0007**	0.0005**	0.0006**	18
PRS	0.9009**	0.0368**	0.0139**	0.0152**	0.0049**	0.0015 ns	0.0024*	16

G = genotipos; TS = tamaños de semilla; VG = tipos de vigorización; LP = longitud de plúmula; LR = longitud de radícula; PG = porcentaje de germinación; PA = plántulas anormales; SM = semillas muertas; PPL = peso seco de plúmulas; PR = peso seco de radículas; PRS = peso seco de restos de semillas; *, **, $p \leq 0.05$ y 0.01 ; CV = coeficiente de variación (%).

se atribuye a que los patrones de movilización de las sustancias de reserva desde los cotiledones o, en su caso, el endospermo, hacia el eje embrionario en crecimiento, son diferentes en condiciones de luz que en obscuridad (Mahanta y Sarma, 1995; Halmer y Bewley, 1982).

Efecto de las fuentes principales de variación en las pruebas de vigor

El análisis individual del efecto promedio de los genotipos (Cuadros 3, 4 y 5) muestra que, de manera constante y con leves variaciones, según la prueba, VA-110 presentó mayores ($p \leq 0.05$) longitudes de plúmula (12.1 a 13.9 cm) y radícula (12.9 a 15.6 cm), mayor germinación (82.2 a 85.8%) y mayores pesos secos de plúmulas (157 a 171 mg) y de radículas (43 a 45 mg), con valores menores de plántulas anormales

constantly and with slight variations, according to the test, VA-110 showed greater ($p \leq 0.05$) lengths of plumule (12.1 to 13.9 cm) and radicle (12.9 to 15.6 cm), more germination (82.2 to 85.8%) and higher dry weights of plumules (157 to 171 mg) and of radicles (43 to 45 mg), with lower values of abnormal seedlings (1.5 to 3.1%), dead seeds (11.8 to 16.3%) and dry weight of remains of seeds (148 to 175 mg) than the two fertility maintainer lines. These results confirm others (not published), which indicate that VA-110 is a variety whose seeds are outstanding because of their high germination potential and vigor of their seedlings.

In general, and according to the environmental conditions of the vigor tests, the large and medium sizes had a tendency to produce seedlings with longer plumules and radicles, of higher total dry weight and with heavier seed remains than the small seeds (Tables

(1.5 a 3.1%), semillas muertas (11.8 a 16.3%) y peso seco de restos de semillas (148 a 175 mg) que las dos líneas mantenedoras de la fertilidad. Estos resultados confirman otros (no publicados), que indican que VA-110 es una variedad cuyas semillas destacan por su alto poder germinativo y por el vigor de sus plántulas.

En general, y según las condiciones ambientales de las pruebas de vigor, los tamaños grande y mediano tuvieron una tendencia a producir plántulas con plúmulas y radículas más largas, de mayor peso seco total y con restos de semilla más pesados que las semillas de tamaño chico (Cuadros 3, 4 y 5), lo cual concuerda con los resultados de Rama *et al.* (1999) en sorgo, Martinelli y Moreira de Carvalho (1999) en maíz, Lafond y Baker (1986) y Baalbaki y Copeland (1997) en trigo, y Dharmalingam y Basu (1987) en frijol mungo. Sin embargo, en contraste con estos autores, en el presente estudio, aunque en cada prueba de vigor hubo diferencias significativas para el porcentaje de germinación entre tamaños de semilla, las semillas pequeñas no siempre fueron las de menor germinación, pero como las diferencias máximas fueron cercanas a 3%, la repercusión agronómica final sería escasa.

Respecto a los tratamientos de vigorización a la semilla (Cuadros 3, 4 y 5), se observa que en promedio la mayor germinación ($p \leq 0.05$) correspondió a la aplicación de Maxi-Grow T. S. (79.8 a 84.2%), pero el testigo ocupó el segundo lugar con diferencias no significativas en dos de las tres pruebas (77.0 a 79.8%). El nitrato de potasio tuvo un efecto negativo pues causó mayor ($p \leq 0.05$) porcentaje de semillas muertas (19.1 a 34.2%) y mayores montos de restos de semilla (183 a 244 mg/plántula) que el testigo. En consecuencia, los tratamientos de vigorización de la semilla aplicados en este estudio no serían una opción adecuada para aumentar las probabilidades de éxito en el establecimiento de plántulas de sorgo en el campo.

Efecto de las interacciones entre las fuentes de variación y la germinación

Sólo como referencia se presentan los resultados de estas interacciones en la prueba de germinación estándar (Figura 2), pues en ella ocurrió la mayor frecuencia de efectos significativos en esas fuentes de variación. Sin embargo, en las otras dos pruebas, los comportamientos fueron similares.

En el análisis de la interacción de genotipos por tamaños de semilla (Figura 2a) se confirma que no siempre los mayores porcentajes de germinación correspondieron a los mayores tamaños de semilla, pues las semillas chicas de la línea B9 y de VA-110 (G1TS3

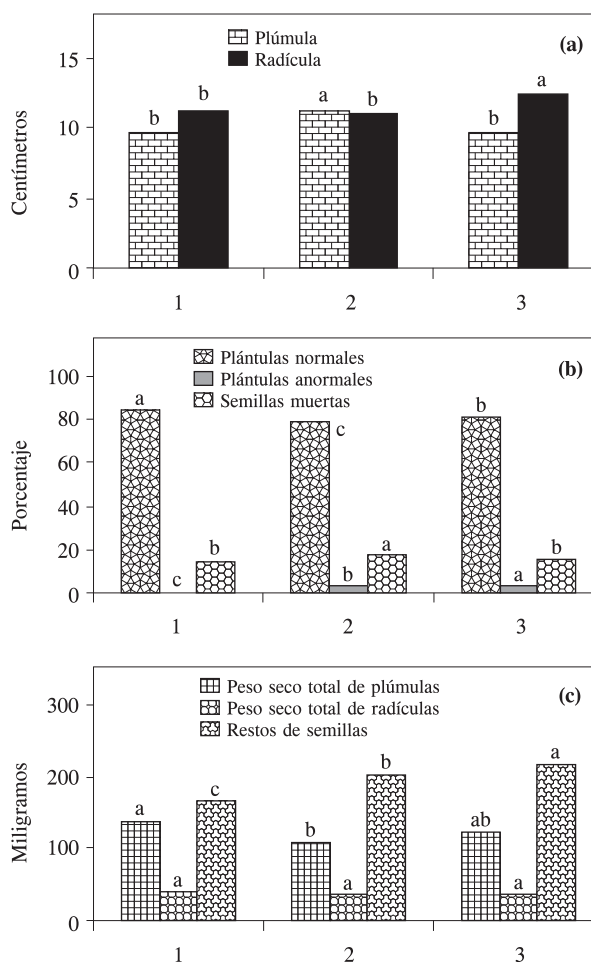


Figura 1. a) Promedio de la longitud de plúmula y radícula; b) porcentajes de germinación con base en plántulas normales, plántulas anormales y semillas muertas; c) peso seco total de plúmulas, radículas y restos de semillas en la prueba de germinación estándar (1: 6 d a 25 °C, con luz), prueba de frío (2: 7 d a 10 °C, en oscuridad + 6 d a 25 °C, con luz); y en la prueba de frío modificada (3: 7 d a 10 °C, en oscuridad + 6 d a 25 °C, sin luz). Variables con letras diferentes entre pruebas de germinación son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Figure 1. a) Average of the length of plumule and radicle; b) percentages of germination based on normal seedlings, abnormal seedlings and dead seeds; c) total dry weight of plumules, radicles and seed remains in the standard germination test (1: 6 d at 25 °C, with light), cold test (2: 7 d at 10 °C, in darkness + 6 d at 25 °C, with light); and in the modified cold test (3: 7 d at 10 °C, in darkness + 6 d at 25 °C, without light). Variables with different letters among germination tests are statistically different ($p \leq 0.05$).

3, 4 and 5), which agrees with the results of Rama *et al.* (1999) in sorghum, Martinelli and Moreira de Carvalho (1999) in maize, Lafond and Baker (1986) and Baalbaki and Copeland (1997) in wheat, and Dharmalingam and Basu (1987) in mungo bean. However, in contrast with these authors, in the present

Cuadro 3. Promedios de las variables indicadas para las tres principales fuentes de variación, en la prueba estándar de germinación (6 d a 25 °C, con luz).**Table 3. Averages of the variables indicated for the three main sources of variation, in the standard germination test (6 d at 25 °C, with light)**

Factores	Tratamiento				Tratamiento			
	1	2	3	4	1	2	3	4
	Longitud de plúmula (cm)				Longitud de radícula (cm)			
Genotipos	9.2 c	9.6 b	12.1 a		10.00 c	11.4 b	12.9 a	
Tamaños	11.1 a	10.6 b	9.2 c		11.7 a	11.4 ab	11.2 b	
Vigorización	10.1 b	10.2 b	9.2 b	11.0 a	12.2 a	11.2 b	10.6 c	11.7 a
	Germinación (%)				Plántulas anormales (%)			
Genotipos	80.6 a	70.9 b	82.2 a		2.4 b	4.4 a	1.5 c	
Tamaños	76.9 b	75.5 c	81.2 a		4.5 a	1.8 b	1.8 b	
Vigorización	79.6 a	80.5 a	74.5 c	77.0 b	2.7 b	2.9 c	1.3 b	3.9 a
	Semillas muertas (%)				Peso seco total de plúmulas (mg)			
Genotipos	17.2 b	24.8 a	16.3 b		107 c	131 b	171 a	
Tamaños	18.5 b	22.9 a	17.0 c		145 a	129 b	135 ab	
Vigorización	17.7 c	16.6 d	24.2 a	19.4 b	135 ab	146 a	126 b	139 ab
	Peso seco total de radículas (mg)				Peso seco total de restos de semilla (mg)			
Genotipos	27 c	38 b	44 a		196 a	151 b	157 b	
Tamaños	39 a	35 b	35 b		198 a	170 b	136 c	
Vigorización	38 a	38 a	34 b	35 ab	167 b	161 b	183 a	161 b

Genotipos (1 = línea B9; 2 = línea B1; 3 = VA-110); tamaños de semilla (TS1 = tamaño grande, TS2 = tamaño mediano y TS3 = tamaño chico); vigorización (1 = osmocondicionamiento, 2 = Maxi-Grow T. S.[®], 3 = nitrato de potasio, y 4 = testigo). Valores con diferente letra en una hilera son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Cuadro 4. Promedios de las variables indicadas para las tres principales fuentes de variación, en la prueba de frío (7 d a 10 °C, en oscuridad + 6 d a 25 °C, con luz).**Table 4. Averages of the variables indicated for the three main sources of variation, in the cold test (7 d at 10 °C, in darkness + 6 d at 25 °C, with light).**

Factores	Tratamiento				Tratamiento			
	1	2	3	4	1	2	3	4
	Longitud de plúmula (cm)				Longitud de radícula (cm)			
Genotipos	8.2 c	11.3 b	13.9 a		8.2 c	10.2 b	15.1 a	
Tamaños	11.5 a	10.7 b	11.3 a		11.6 a	11.1 b	10.8 b	
Vigorización	11.1 ab	11.7 a	10.6 b	11.2 ab	11.0 b	12.1 a	10.1 c	11.5 ab
	Germinación (%)				Plántulas anormales (%)			
Genotipos	77.5 b	73.8 c	85.8 a		4.1 a	3.2 b	2.6 c	
Tamaños	81.0 a	77.5 b	78.6 a		3.6 b	3.8 a	2.5 c	
Vigorización	78.5 b	79.8 a	78.0 c	79.8 ab	3.4 b	2.2 d	3.5 a	3.1 b
	Semillas muertas (%)				Peso seco total de plúmulas (mg)			
Genotipos	18.4 b	23.1 a	11.8 c		70 c	85 b	170 a	
Tamaños	17.8 b	18.9 a	16.6 c		119 a	98 b	108 ab	
Vigorización	18.3 b	16.7 c	19.1 a	17.1 b	106 b	127 a	91 b	110 ab
	Peso seco total de radículas (mg)				Peso seco total de restos de semilla (mg)			
Genotipos	19 c	24 b	45 a		262 a	202 b	148 c	
Tamaños	30 a	29 a	29 a		229 a	209 a	174 b	
Vigorización	30 a	34 a	24 b	31 a	208 ab	172 c	234 a	202 b

Genotipos (1 = línea B9; 2 = línea B1; 3 = VA-110); tamaños de semilla (TS1 = tamaño grande, TS2 = tamaño mediano y TS3 = tamaño chico); vigorización (1 = osmocondicionamiento, 2 = Maxi-Grow T. S.[®], 3 = nitrato de potasio, y 4 = testigo). Valores con diferente letra en una hilera son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Cuadro 5. Promedios de las variables indicadas para las tres principales fuentes de variación, en la prueba de frío modificada (7 d a 10 °C, en oscuridad + 6 d a 25 °C, sin luz).**Table 5. Averages of the variables indicated for the three main sources of variation, in the modified cold test (7 d at 10 °C, in darkness + 6 d at 25 °C, without light).**

Factores	Tratamiento				Tratamiento			
	1	2	3	4	1	2	3	4
	Longitud de plúmula (cm)				Longitud de radícula (cm)			
Genotipos	7.8 c	9.3 b	12.4 a		10.5 c	12.2 b	15.6 a	
Tamaños	10.6 a	9.6 b	9.3 b		12.9 a	12.8 a	12.5 a	
Vigorización	9.3 b	9.6 b	9.6 b	10.6 a	12.8 ab	12.2 b	12.1 b	13.8 a
	Germinación (%)				Plántulas anormales (%)			
Genotipos	74.8 b	67.3 c	83.1 a		6.4 a	4.1 b	3.1 b	
Tamaños	77.5 a	72.2 b	75.5 ab		3.9 b	5.9 a	3.8 b	
Vigorización	73.3 c	84.2 a	63.0 c	79.8 a	8.1 a	3.6 b	2.8 c	3.7 b
	Semillas muertas (%)				Peso seco total de plúmulas (mg)			
Genotipos	18.8 b	28.6 a	13.8 c		75 c	96 b	157 a	
Tamaños	18.6 b	21.9 a	20.6 c		107 c	112 a	109 b	
Vigorización	18.6 b	12.2 c	34.2 a	16.5 bc	105 b	119 a	96 c	118 a
	Peso seco total de radículas (mg)				Peso seco total de restos de semilla (mg)			
Genotipos	23 c	38 b	43 a		262 a	222 b	175 c	
Tamaños	37 a	34 ab	32 b		245 a	224 b	190 c	
Vigorización	34 b	40 a	28 c	36 b	222 b	196 c	244 a	217 bc

Genotipos (1 = línea B9; 2 = línea B1; 3 = VA-110); tamaños de semilla (TS1 = tamaño grande, TS2 = tamaño mediano y TS3 = tamaño chico); vigorización (1 = osmocondicionamiento, 2 = Maxi-Grow T. S.[®], 3 = nitrato de potasio, y 4 = testigo). Valores con diferente letra en una hilera son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

y G3TS3) mostraron mayores ($p \leq 0.05$) valores de germinación que las semillas grandes de la línea B1 (G2TS1).

Con respecto a la interacción de los genotipos por tratamientos de vigorización (Figura 2b), el osmocondicionamiento aplicado a las semillas de la línea mantenedora B9 (G1VG1) ocasionó una germinación superior ($p \leq 0.05$) al mismo tratamiento de vigorización aplicado a los otros dos genotipos. El osmocondicionamiento fue especialmente eficaz para reavivar en mayor grado ($p \leq 0.05$) a las semillas de tamaño chico (TS3VG1) que a las de los otros tamaños (TS2VG1 y TS1VG1) (Figura 2c).

Lo anterior destaca la complejidad del lento crecimiento de las plántulas de sorgo. Evidentemente, el genotipo desempeña un papel más importante en este fenómeno que el tamaño de la semilla y que las sustancias vigorizantes, especialmente en semilla almacenada por periodos relativamente cortos (15 meses).

CONCLUSIONES

La prueba estándar de germinación permitió detectar mayor frecuencia de significancia ($p \leq 0.05$) de las fuentes de variación que la prueba de frío. El efecto ambiental de las pruebas de frío se manifestó por una mayor elongación de la radícula que de la plúmula

study, although in each vigor test there were significant differences for the percentage of germination among seed sizes, the small seeds did not always present the lowest germination, but as the maximum differences were close to 3%, the final agronomic result would be minimal.

With respect to the seed invigoration treatments (Tables 3, 4 and 5), it is observed that on the average the highest germination ($p \leq 0.05$) corresponded to the application of Maxi-Grow T. S. (79.8 to 84.2%), but the control occupied second place with nonsignificant differences in two of the three tests (77.0 to 79.8%). The potassium nitrate exerted a negative effect, as it produced a higher ($p \leq 0.05$) percentage of dead seeds (19.1 to 34.2%) and higher amounts of seed remains (183 to 244 mg/seedling) than the control. Consequently, the seed invigoration treatments applied in this study would not be an adequate option for increasing the probabilities of success in the establishment of sorghum seedlings in the field.

Effect of the interactions between the variation sources and germination

The results of these interactions are shown for the standard germination test (Figure 2), only

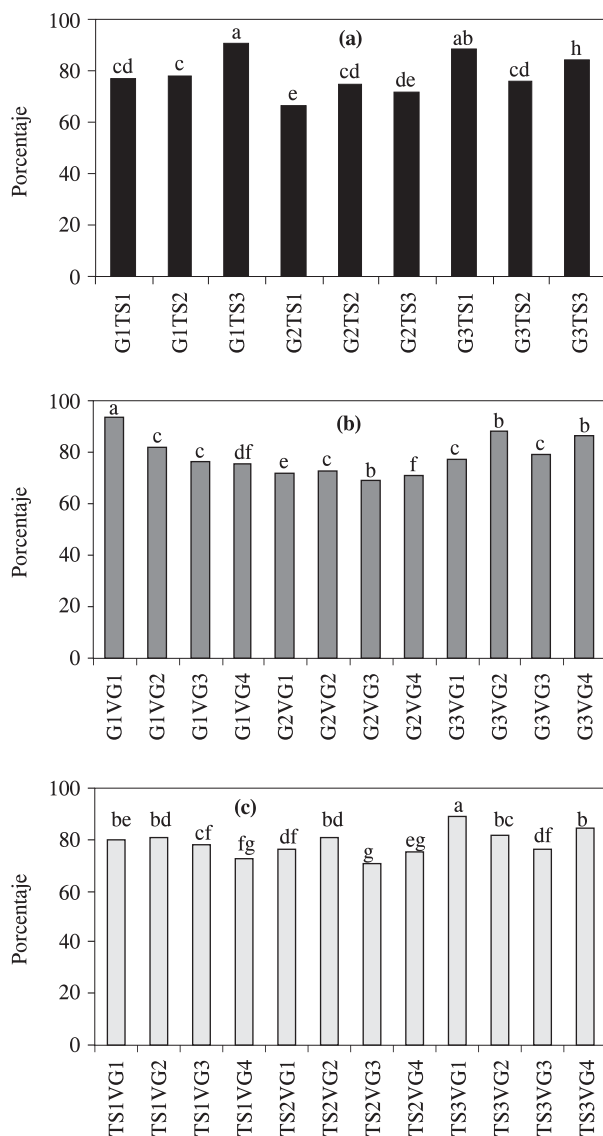


Figura 2. Porcentajes de germinación para las interacciones de genotipos por tamaño de semilla (a), genotipos por tratamientos de vigorización (b) y tamaños de semilla por tratamientos de vigorización (c), en la prueba de germinación estándar (6 d a 25 °C, con luz). G1 = línea B9, G2 = línea B1; G3 = VA-110; TS1 = tamaño de semilla grande, TS2 = tamaño de semilla mediano y TS3 = tamaño de semilla chico; VG1 = osmocondicionamiento, VG2 = Maxi-Grow T. S.®; VG3 = nitrato de potasio; VG4 = testigo. Valores con letra diferente en cada interacción son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Figure 2. Percentages of germination for the interactions of genotypes per seed size (a), genotypes per invigorization treatments (b) and seed sizes per invigorization treatments (c), in the standard germination test (6 d at 25 °C, with light). G1 = line B9, G2 = line B1; G3 = VA-110; TS1 = large seed size, TS2 = medium seed size and TS3 = small seed size; VG1 = osmo-conditioning, VG2 = Maxi-Grow T. S.®; VG3 = potassium nitrate; VG4 = control. Values with different letter in each interaction are statistically different ($p \leq 0.05$).

as a reference, given that the highest frequency of significant effects of these sources of variation occurred in this test. However, in the other two tests, the behaviour was similar.

In the analysis of the interaction of genotypes per seed sizes (Figure 2a), it is confirmed that the highest percentages of germination did not always correspond to the largest seed sizes, given that the small seeds of line B9 and VA-110 (G1TS3 and G3TS3) showed higher values ($p \leq 0.05$) of germination than the large seeds of the line B1 (G2TS1).

With respect to the interaction of the genotypes per invigorization treatment (Figure 2b), the osmo-conditioning applied to the seeds of the maintainer line B9 (G1VG1) caused higher germination ($p \leq 0.05$) than the same invigorization treatment applied to the other two genotypes. The osmo-conditioning was especially effective for a greater re-invigorization ($p \leq 0.05$) of the small seeds (TS1VG1) than to those of the other sizes (TS2VG1 and TS3VG1) (Figure 2c).

The above results point out the complexity of the slow growth of the sorghum seedlings. Evidently, genotype plays a more important role in this phenomenon than seed size and the invigorization substances, especially in seeds stored for relatively short periods (15 months).

CONCLUSIONS

The standard germination test made it possible to detect higher frequency of significance ($p \leq 0.05$) of the variation sources than the cold test. The environmental effect of the cold tests was manifested by a greater elongation of the radicle than of the plumule when germination took place in complete darkness. The total dry weight of plumules was 3 to 4 times higher than the total dry weight of the radicles, depending on the vigor test. The variety VA-110 was significantly higher ($p \leq 0.05$) in germination and vigor than the maintainer lines B1 and B9. The larger seed sizes did not always exhibit the highest expressions of germination and vigor, due to their interaction with genotypes and with invigorization substances. Under the evaluation conditions of the present study, the seed size, the invigorization substances, and the combination of these factors, were not agronomically important for helping to elucidate the problem of slow growth of the sorghum seedlings in the High Valleys of México.

—End of the English version—



cuando la germinación transcurrió por completo en oscuridad. El peso seco total de plúmulas fue 3 a 4 veces superior al peso seco total de radículas, dependiendo de la prueba de vigor. La variedad VA-110 superó significativamente ($p \leq 0.05$) en germinación y vigor a las líneas mantenedoras B1 y B9. No siempre los mayores tamaños de semilla exhibieron las mayores expresiones de germinación y vigor, por su interacción con genotipos y con las sustancias vigorizantes. Bajo las condiciones de evaluación del presente experimento, el tamaño de semilla, las sustancias vigorizantes, así como la combinación de estos factores, no fueron agrónomicamente importantes para ayudar a elucidar el problema del lento crecimiento de las plántulas de sorgo en los Valles Altos de México.

LITERATURA CITADA

- Anda, A., and L. Pinter. 1994. Sorghum germination and development as influenced by soil temperature and water content. *Agron. J.* 86: 621-624.
- Baalbaki, R. S., and L. O. Copeland. 1997. Seed size, density and protein effects on field performance of wheat. *Seed Sci. Technol.* 25: 511-521.
- Brar, G. S., and B. A. Stewart. 1994. Germination under controlled temperatures and field emergence of 13 sorghum cultivars. *Crop Sci.* 34: 1336-1340.
- Brar, G. S., J. L. Steiner, P. W. Unger, and S. S. Phrihar. 1992. Modeling sorghum seedling establishment from soil wetness and temperature of drying seed zones. *Agron. J.* 84: 905-910.
- Copeland, L. O. 1979. Principles of Seed Science and Technology. Burgess Pub. Co. Minn. MN., U.S.A. 369 p.
- De, B. K., A. K. Mandal, and R. N. Basu. 2003. Seed invigoration treatments on different seed sizes of wheat (*Triticum aestivum* L.) for improved storability and field performance. *Seed Sci. Technol.* 31: 379-388.
- Dharmalingam, C., and R. N. Basu. 1987. Influence of seed size and seed coat color on the production potential of mungo bean cv. CO 3. *Seeds and Farms* 13: 16-20.
- Foti, S., S. L. Cosentino, C. Patane, and G. M. D. Acosta. 2002. Effect of osmoconditioning upon seed germination of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) under low temperatures. *Seed Sci. Technol.* 30: 521-533.
- Halmer, P., and J. D. Bewley. 1982. Control by external and internal factors over the mobilization of reserve carbohydrates in higher plants. In: Prison, A., and M. H. Zimmermann (eds). *Encyclopedia of Plant Physiology (New Series)*. Springer Verlag, Berlin. 13 A: 748-793.
- ISTA (International Seed Testing Association). 1999. International Rules for Seed Testing. Seed Testing Association (ed). Zurich, Switzerland. 321 p.
- Lafond G., P., and J. L. Baker. 1986. Effects of genotype and seed size on speed of emergence and seedling vigor in nine spring wheat cultivars. *Crop Sci.* 26: 341-346.
- Mahanta, P. K., and C. M. Sarma. 1995. Mobilization of cotyledon reserve during early seedling growth of Te [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] in dark and light-interrupted dark. *Seed Res.* 23(1): 1-4.
- Martinelli, A., and N. Moreira de Carvalho. 1999. Seed size and genotype on maize (*Zea mays* L.) yield under different technology levels. *Seed Sci. Technol.* 27: 999-1006.
- McDonald, M. B. 1975. A review and evaluation of seed vigor tests. *Proc. Assoc. Official. Seed Analysts* 65: 109-139.
- Osuna-Ortega, J., L. E. Mendoza-Onofre, V. A. González, F. Castillo-González, M. del C. Mendoza-Castillo, and H. Williams-Alanis. 2000. Potencial of cold tolerant germoplasm in the adaptation and adaptability of sorghum in México. I: High Valleys. *Agrociencia* 34: 561-572.
- Osuna-Ortega, J., M. del C. Mendoza-Castillo, and L. E. Mendoza-Onofre. 2003. Sorghum cold tolerance, pollen production, and seed yield in the Central High Valleys of México. *Maydica* 48: 125-132.
- Radford, B. J., and R. G. Henzell. 1990. Temperature affects the mesocotyl and coleptile length of grain sorghum genotypes. *Aust. J. Agric. Res.* 41: 79-87.
- Rama, B. R., R. Ankaiah, B. Muralimoham R., and B. Gopal S. 1999. Effect of seed size and invigoration treatments on field performance of sorghum hybrid SPH 504. *Seed Res.* 27(1): 31-36.
- Tiryaki, I., and D. J. Andrews. 2001. Germination and seedling cold tolerance in sorghum: I. Evaluation of rapid screening methods. *Agron. J.* 93: 1386-1391.
- SAS (Statistical Analysis System). 1989. Version 8. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. 943 p.
- Valadez-Gutiérrez, J., L. E. Mendoza-Onofre, H. Vaquera-Huerta, L. Córdova-Téllez, M. del C. Mendoza-Castillo, and G. García-de los Santos. 2006. Flowers thinning, seed yield and post-anthesis dry matter distribution in sorghum. *Agrociencia* 40: 303-314.