

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DE LAS DEFICIENCIAS HÍDRICAS SOBRE EL RENDIMIENTO DE
SORGO GRANIFERO**

por

**Martín RAMEAU RIBEIRO
Ana Laura ROSA MORÁN**

**TESIS presentación como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2013**

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Luis Giménez

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Guillermo Siri

Fecha:

10 de julio de 2013

Autor:

Martín Rameau Ribeiro

Ana Laura Rosa Morán

AGRADECIMIENTOS

A Luis Giménez, nuestro director de tesis, por permitirnos realizar este trabajo final, por su constante apoyo y dedicación. A Richard y Andrés, al personal de laboratorio 1, a Fernanda, Amelia, las funcionarias de biblioteca Montevideo y a Sully Toledo, por la colaboración en las diferentes etapas del trabajo de tesis. A mi madre, mi padre, mi hermana, la tía bety, las abuelas y a la familia por el apoyo incondicional durante todos estos años de carrera, a los amigos que de una u otra forma ayudaron a mi formación académica. A Erica y Lorena por estar siempre a lado desde el comienzo en este camino. A Dani J. por el apoyo y la paciencia durante estos últimos años de carrera. A todos muchas gracias porque sin ellos esto no podría haber sido realidad.

Ana...

A mi familia por el apoyo constante desde siempre. A Luis Giménez, a la gente del laboratorio 1, a los colaboradores de campo, al personal de biblioteca, y a todos aquellos que siempre con la mejor predisposición colaboraron para que esto pudiera ser posible.

Martín...

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 CARACTERÍSTICAS ECO-FISIOLÓGICAS DEL SORGO	3
2.2 CARACTERÍSTICAS VEGETATIVAS	3
2.2.1 <u>Hojas</u>	3
2.2.2 <u>Tallo</u>	4
2.2.3 <u>Raíces</u>	4
2.3 AMBIENTES PARA LA PRODUCCION DE SORGO EN EL URUGUAY ..	4
2.3.1 <u>Precipitaciones</u>	4
2.3.2 <u>Temperatura</u>	5
2.3.3 <u>Radiación solar</u>	6
2.4 REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL SORGO.....	6
2.4.1 <u>Demanda de agua</u>	8
2.4.2 <u>Consumo y requerimientos diarios</u>	9
2.5 PRÁCTICAS DE MANEJO DEL CULTIVO Y SU RELACIÓN CON DISPONIBILIDAD HIDRICA	10
2.5.1 <u>Población</u>	10
2.5.2 <u>Nitrógeno</u>	11
2.6 EFECTOS DE LAS DEFICIENCIAS HIDRICAS SOBRE EL POTENCIAL PRODUCTIVO DE SORGO.....	12
2.6.1 <u>Índice de cosecha</u>	14
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	16
3.1 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO	16
3.2 MANEJO EXPERIMENTAL	16
3.3 TRATAMIENTOS	17
3.4. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	18
3.4.1 <u>Hipótesis biológica</u>	18
3.4.2 <u>Hipótesis estadística</u>	19
3.4.3 <u>Diseño experimental</u>	19

3.5 DETERMINACIONES	19
3.5.1 <u>Mediciones a campo</u>	19
3.5.2 <u>Mediciones a cosecha</u>	20
3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	20
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	21
4.1 CONDICIONES CLIMATICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO	21
4.1.1 <u>Precipitaciones</u>	21
4.1.2 <u>Radiación solar</u>	22
4.2. AGUA DISPONIBLE	24
4.3. PARÁMETROS DE CRECIMIENTO	27
4.3.1 <u>Evolución de la materia seca</u>	27
4.3.2 <u>Rendimiento en grano</u>	29
4.4 COMPONENTES DEL RENDIMIENTO	31
4.4.1 <u>Número de granos por superficie</u>	31
4.4.2 <u>Peso de 100 granos</u>	32
4.5 RELACIONES ENTRE EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES	33
4.6 EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SOBRE EL IC	35
5. <u>CONCLUSIONES</u>	37
6. <u>RESUMEN</u>	39
7. <u>SUMMARY</u>	40
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	41
9. <u>ANEXOS</u>	46

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Relación de transpiración para el sorgo y maíz.....	7
2. Etapas fenológicas del cultivo.....	17
Figura No.	
1. Utilización diaria de agua por la planta de sorgo desde la germinación hasta la cosecha (Pérez et al., 2010).....	9
2. Precipitaciones (mm) en el ciclo del cultivo año 2011-12, EEMAC, y promedios mensuales para Paysandú de la serie histórica de 1980-2009 (elaborado en base a datos de INIA GRAS, s.f.).....	21
3. Distribución de las precipitaciones decádicas y totales mensuales en las distintas etapas del cultivo, 2011-12 (elaborado en base a datos de INIA GRAS, s.f.).....	22
4. Radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) durante el ciclo del cultivo del año 2011-12 en la EEMAC y promedios anuales para Paysandú de la serie histórica de 2002-2012 (Estación Agro meteorológica EEMAC).....	23
5. Evolución del porcentaje de agua disponible durante el ciclo del cultivo en el T1.....	24
6. Evolución del porcentaje de agua disponible durante el ciclo del cultivo en el T2.....	25
7. Evolución del porcentaje de agua disponible durante el ciclo del cultivo en el T3.....	26
8. Evolución del porcentaje de agua disponible durante el ciclo del cultivo en el T4.....	26
9. Evolución del porcentaje de agua disponible durante el ciclo del cultivo en el T5.....	27

10. Evolución de la materia seca durante el ciclo del cultivo. Columnas con igual letra no difieren entre sí para una misma fecha de muestreo ($p < 0,05$: Tukey).....	28
11. Rendimiento (kg ha^{-1}) en función de la MS total (kg ha^{-1}) producida.....	29
12. Rendimiento (kg ha^{-1}) en función de diferentes disponibilidades hídricas, con sus respectivos errores estándar. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$: Tukey).....	31
13. Número de granos m^{-2} para los tratamientos evaluados. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$: Tukey).....	32
14. Peso (g) promedio de 100 granos en los tratamientos evaluados. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$: Tukey).....	33
15. Rendimiento en función del número de granos m^{-2}	34
16. Rendimiento en función del peso de 100 granos (g).....	35
17. Índice de Cosecha en los diferentes tratamientos evaluados. Valores seguidos de igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$: Tukey).....	36

1. INTRODUCCIÓN

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es el quinto cereal en producción de granos a nivel mundial, luego del trigo, el maíz, el arroz y la cebada (Ali et al., 2009b). En América y Oceanía es utilizado principalmente para alimentación animal, mientras que en las regiones más pobres de Asia y África, donde la inseguridad alimentaria es mayor, más del 70% de la producción de sorgo es parte del alimento básico de la población.

El sorgo se produce en general en suelos pobres y en condiciones climáticas adversas en comparación con otros cultivos (Ejeta y Knoll, citados por Ali et al., 2009b), por poseer características morfo-fisiológicas que lo hacen tolerante a las sequías. De todas maneras, el sorgo en regiones áridas y semi-áridas se ve influenciado por el estrés hídrico lo cual provoca que los rendimientos logrados sean bajos (Tuinstra et al., citados por Ali et al., 2009b).

En Uruguay la agricultura ha crecido significativamente en la última década, dominada por la soja como cultivo principal. Este crecimiento, aumenta la preocupación acerca de las consecuencias que puedan tener desde el punto de vista de la sustentabilidad los nuevos sistemas de producción agrícolas, y en ese contexto el sorgo presenta una especial importancia. Con la incorporación masiva de la siembra directa, el área de siembra de sorgo aumentó en forma importante, sembrándose 88200 ha en el año 2011 (URUGUAY.MGAP.OPYPA, 2012). Sin embargo, su rendimiento no ha presentado variaciones de significación en la última década.

El sorgo posee características que lo hacen muy indicado para las rotaciones que poseen un alto porcentaje de soja. Entre las características más importantes de este cultivo, se destaca el aporte del rastrojo que sostiene la fertilidad de los suelos y mantiene el suelo cubierto durante el período de barbecho invernal (Ernst, s.f.). Por este motivo el sorgo puede llegar a tener un rol preponderante en los agro-ecosistemas del futuro próximo.

Por otra parte, la disponibilidad hídrica es la principal limitante de los cultivos de verano en el país, esto aunado a los actuales buenos precios de los granos de verano está justificando una mayor incorporación de la técnica del

riego. Por ese motivo, es necesario generar conocimientos en relación a la respuesta al riego suplementario del sorgo.

La característica de ser un cultivo adaptado a condiciones de aridez, ha llevado a que la investigación acerca de su respuesta al riego sea muy baja a nivel mundial, y prácticamente inexistente a nivel nacional y regional. Algunas de las investigaciones encontradas aseveran que las deficiencias hídricas tienen diversos efectos sobre el rendimiento de sorgo, según la etapa de desarrollo en la que se produzcan. Asimismo es necesario conocer los requerimientos hídricos para maximizar los rendimientos (Peiter y Carlesso 1996, Agboma et al., citados por Ali et al. 2009b).

Las deficiencias hídricas durante el crecimiento y desarrollo del cultivo reducen el área foliar irreversiblemente, disminuyendo la interceptación y absorción de radiación solar, generando una menor producción de carbohidratos (Peiter y Carlesso, 1996). En tanto que, el estrés hídrico durante la floración y principios de anthesis genera fracasos en la fertilidad (Prasad et al., citados por Ali et al., 2009b), provocando las mayores disminuciones del rendimiento. Las deficiencias hídricas producidas en el llenado de grano producen pérdidas en rendimiento de consideración, pero menores que las que se generan cuando las deficiencias ocurren durante la floración (Lewis et al. 1974, Craufurd y Peacock 1993).

El objetivo del presente trabajo consistió en la evaluación de los efectos producidos sobre el rendimiento y la producción de MS, por las deficiencias hídricas generadas en distintas etapas del ciclo del sorgo, y el conocimiento del potencial productivo de la especie en nuestros ambientes de producción sin restricciones hídricas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS ECO-FISIOLÓGICAS DEL SORGO

El sorgo se caracteriza por adaptarse a áreas con condiciones marginales, tanto áridas como húmedas, donde otros cultivos normalmente no son sembrados (Arkin et al., 1976). Sin embargo, en los últimos tiempos en Uruguay, los veranos secos han determinado rendimientos similares a los que se constatan en el maíz en iguales condiciones.

Por otra parte, existe un estancamiento en el mejoramiento genético del sorgo en comparación con el maíz. Lo cual repercute entre otras cosas, en los rendimientos potenciales que en la actualidad presentan ambas especies.

El hábito de crecimiento y la fisiología del sorgo son similares a la del maíz (*Zea mays L.*), ambas especies son de tipo fotosintético C4 y presentan según Carrasco (1989), las siguientes características expresadas en relación a las plantas de tipo C3:

- Alto punto de saturación en luz de la fotosíntesis.
- Fotosíntesis máxima con temperaturas elevadas.
- Alta eficiencia de uso de agua.
- Alta eficiencia de uso de nitrógeno.
- Bajo punto de compensación por CO₂.
- Alto punto de compensación por luz.

2.2 CARACTERÍSTICAS VEGETATIVAS

2.2.1 Hojas

A diferencia del maíz, y como se menciona anteriormente, el sorgo posee la habilidad de tolerar condiciones hídricas sub-óptimas, como consecuencia de una fisiología y anatomía más adaptada.

El largo de los estomas (2/3 de los del maíz), la cantidad de estomas (50 % más por unidad de área que en el maíz; Carrasco, 1989) y el ajuste osmótico, le confieren al sorgo la capacidad de mantener la apertura de los estomas a niveles bajos de potencial hídrico en las hojas (Ludlow et al. 1990, Girma y Krieg 1992).

Las hojas del sorgo presentan líneas de células motoras, las cuales arrollan la hoja en condiciones de estrés hídrico. Esto diferencia al sorgo de otras especies donde la reacción al estrés consiste en diversos grados de marchitamiento (Carrasco, s.f.).

2.2.2 Tallo

El tallo en los materiales modernos tiene crecimiento erecto. Estos son sólidos en la mayoría de los casos, pudiendo ser seco o jugoso. Y, en el último caso, dulce o insípido.

En cada nudo existen yemas que pueden llegar a no desarrollarse. Las que se ubican cerca del suelo generalmente desarrollan raíces que ayudan al anclaje de la planta. Las yemas basales del tallo desarrollan macollas, mientras que las superiores tienen la capacidad de diferenciar ramas cuando el tallo sufre algún daño (Carrasco, s.f.).

2.2.3 Raíces

Miller, citado por Carrasco (1989) dice que el sistema radicular del sorgo, no se destaca tanto por la cantidad en peso de la raíz sino por el grado profuso de ramificación en comparación con el maíz. En tanto que Wright y Smith (1983), Singh y Singh (1995) aseveran que, la resistencia del sorgo a la sequía se atribuye a un sistema radicular denso y prolífico capaz de extraer agua desde lo más profundo del perfil del suelo.

Carrasco (1989) menciona que el crecimiento inicial lento del sorgo es uno de los mecanismos de tolerancia a la sequía, lo que hace que hasta floración sólo se hayan consumido entre 150 a 200 mm de agua. Mientras que Wright y Smith (1983) destacan la capacidad de retrasar la etapa reproductiva en situaciones de estrés hídrico, lo cual hace que dicha fase transcurra en mejores condiciones de crecimiento del cultivo.

2.3 AMBIENTES PARA LA PRODUCCION DE SORGO EN EL URUGUAY

2.3.1 Precipitaciones

Las precipitaciones en Uruguay varían entre 1100 y 1400 mm anuales según la zona del país con una distribución relativamente homogénea a lo largo del año. La media mensual de precipitaciones oscila en los 100 mm, por lo que se esperan aproximadamente 400 mm de agua durante el período de crecimiento de un cultivo de verano (Siri, 2004).

Las precipitaciones en el Uruguay tienen alta variabilidad interanual y relativa uniformidad en el ciclo anual medio. La distribución espacial marca un crecimiento uniforme desde el Sur al Norte del país (CIC, 2004).

Por otra parte, los suelos agrícolas correspondientes a la zona del litoral oeste del país, tienen una capacidad de almacenaje de agua que varía entre 80 y 160 mm (Molfino y Califra, 2001), por lo que de empezar el ciclo con el suelo con un % de agua disponible (AD) elevado, y dada la tolerancia del sorgo al déficit hídrico, su producción en el país es factible.

Giménez y García Petillo (2011) indican una diferencia de 150 a 100 mm entre la Evapotranspiración del cultivo (ETc) y Evapotranspiración real (ETr) en los departamentos de Colonia y Salto, respectivamente. Estos datos que surgen de un trabajo en el cual se estimaron los valores de ETc y ETr promedios de veintidós años para ambas localidades en cultivos de sorgo de secano, demuestran que existe un balance negativo entre el agua aportada por las precipitaciones y la almacenada previo a la siembra del cultivo, y, la demanda atmosférica durante los meses en los cuales se desarrolla el cultivo.

2.3.2 Temperatura

Si se considera que la temperatura base de crecimiento es de 15 °C, no es posible realizar el cultivo de sorgo con menos de 600 °C en la estación de crecimiento. En condiciones de valores más elevados, este cultivo se realiza sin restricciones en cuanto al factor térmico (Carrasco, s.f.).

El sorgo produce buenos rendimientos con temperaturas elevadas, sin embargo los mejores rendimientos se obtienen cuando las temperaturas medias durante la estación de crecimiento están entre 24 y 27 °C.

Las temperaturas promedio más bajas del ciclo del cultivo deben exceder normalmente los 21 °C (Bennett y Tucker, 1986), siendo la mínima para un buen crecimiento según Pérez et al. (2010). Para este mismo autor la temperatura óptima del suelo es de 18°C, siendo necesarias temperaturas entre 12 y 13°C para la germinación y de 15° para el crecimiento de la especie.

Carrasco (1989), concluye que Uruguay posee un rango de temperaturas predominantes en verano que lo posiciona dentro de la zona de máxima respuesta biológica, habiendo ciertas diferencias según la zona del país. La variación térmica existente entre Colonia y Paysandú provoca una reducción de entre 5 y 7 días en el ciclo de un híbrido, lo que debe considerarse

como de gran magnitud dado que es superior a la variación en días existente entre un ciclo corto y uno largo.

El autor citado anteriormente destaca que la amplitud térmica del clima aumenta de sur-este a nor-oeste y hace que las condiciones de producción en relación a las temperaturas resulten excelentes para el litoral oeste, con ventajas comparativas importantes frente a otras regiones productivas del mundo.

2.3.3 Radiación solar

Se considera que con la variación de radiación y helofanía existente se produce un 15 % de diferencia en el rendimiento potencial entre el oeste y el este del país. La conclusión a la que se arriba, en relación a la disponibilidad de este factor, es que el país tiene la máxima radiación posible compatible con la agricultura de secano. Para el sorgo, la importancia de la radiación radica en dos aspectos: por su condición de planta C4 y porque el rendimiento en grano depende en última instancia de la fotosíntesis durante el llenado de grano (Carrasco, 1989).

2.4 REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL SORGO

En relación a las cualidades que hacen que el sorgo sea una especie resistente a la sequía, Saucedo, citado por Pérez et al. (2010) reporta las siguientes características:

- Sistema radicular muy ramificado (su índice radical duplica al del maíz) y un déficit de presión de difusión en sus raíces, también superior al de la mayoría de los cultivos.
- Capa de cera que recubre las hojas y tallos, que disminuye la evapotranspiración.
- Células motoras o higroscópicas abundantes, que están dispuestas en forma regular a lo largo de la nervadura central de las hojas, de modo que producen un acorchamiento de todas las hojas cuando falta el agua, formando un ambiente confinado que disminuye la evaporación; este mecanismo es una importante contribución a la economía del agua. En el maíz, en cambio, las células motoras existen en forma aislada y, como consecuencia, su resistencia a la sequía es mucho menor.

- Mayor número de estomas que en el maíz, de menor tamaño (aproximadamente la mitad). Esto le brinda mayor seguridad a la apertura y cierre, respondiendo con prontitud a las variaciones de humedad del ambiente.
- El sorgo presenta posibilidades de entrar en “reposo vegetativo” cuando falta el agua, en general entra en periodos de dormancia que abandona cuando hay nuevamente disponibilidad de agua.

Según Farré y Fasi (2006) el uso eficiente del agua, expresado como el cociente entre el rendimiento en grano y la evapotranspiración del cultivo, es más afectado en maíz que en sorgo, aunque en ambos cultivos disminuye a medida que baja la disponibilidad hídrica.

Por otra parte Lazo, citado por Siri (2004), menciona que; frente a un estrés hídrico puede ocurrir hasta senescencia de las hojas inferiores, al tiempo que se mantiene un estado hídrico favorable en el meristema apical. Esta condición otorga al cultivo de sorgo la posibilidad de recuperar una alta tasa de crecimiento cuando por lluvia o riego se restaura el suministro adecuado de agua.

Por lo expuesto anteriormente, no existe ningún factor en particular que separe al maíz del sorgo en su respuesta al déficit de agua, sino un complejo de factores. El rendimiento del sorgo bajo riego deficitario se asocia con una mayor capacidad para extraer agua de las capas profundas del suelo, menor duración del crecimiento y mejores características de las hojas para hacer frente a la sequía, por tanto el sorgo es más eficiente que el maíz en el uso de agua de riego (Farré y Fasi, 2006).

A continuación se presentan los datos de eficiencia de uso del agua (kg de agua transpirada por kg de tejido vegetal), donde se observa una mayor eficiencia por parte del sorgo en relación al cultivo de maíz.

Cuadro No. 1 Relación de transpiración para el sorgo y el maíz.

Cultivos	Kilos de agua por kilos de tejido vegetal
Sorgo	311
Maíz	375

Fuente: elaborado en base a datos de Bennett y Tucker (1986).

2.4.1 Demanda de agua

En un trabajo donde se estimaron las necesidades hídricas promedios en cultivos de verano, se reportaron valores de ET_c en sorgo sin restricciones hídricas, de 542 mm en el departamento de Colonia y 523 mm en Salto. La diferencia se da por menores temperaturas en Colonia y por ende ciclos del cultivo más largos (Giménez y García Petillo, 2011).

En tanto que Bennett y Tucker (1986) aseveran que el sorgo granífero necesita de 400 a 600 mm de agua para una producción máxima en el ciclo del cultivo, distribuyéndose de la siguiente manera:

- Desde el comienzo de la germinación de la semilla al estado de plántula la cantidad de humedad absorbida es pequeña y por lo tanto el abastecimiento de agua no se agota, pero resulta crítico que haya suficiente humedad del suelo.
- Durante el periodo de crecimiento vegetativo (anterior al panojamiento), la escasez de agua no es crítica ya que en este estado de crecimiento, la planta tiene la habilidad de entrar en dormancia fisiológica sin una reducción del rendimiento, y cuando las condiciones mejoran puede recuperarse.
- A medida que las hojas se desarrollan y la transpiración aumenta, el uso del agua sube rápidamente y alcanza un pico en la etapa de embuche.
- Durante el periodo de panojamiento y floración los requerimientos de agua para el sorgo son tan elevados como para el maíz. Peiter y Carlesso (1996) demuestran que para niveles mayores a 85 % AD durante todo el ciclo, no hay diferencias significativas en los componentes del rendimiento granos/planta y peso de mil granos.
- Aun cuando la proporción de agua que es absorbida disminuye después de la aparición de la panoja, una humedad del suelo abundante es necesaria para lograr un buen llenado de grano. Después de alcanzarse el contenido máximo de materia seca de la panoja, la humedad del suelo tiene poca influencia sobre el rendimiento. En esta etapa, abundante cantidad de agua se halla en los tejidos de la planta para una maduración normal.
- Debe haber una adecuada humedad durante el estadio de pasta blanda si se desea obtener los rendimientos máximos. Una excesiva humedad

en el suelo después del estadio de pasta dura, algunas veces produce la formación de cañas o chupadores que demoran el secado y la cosecha.

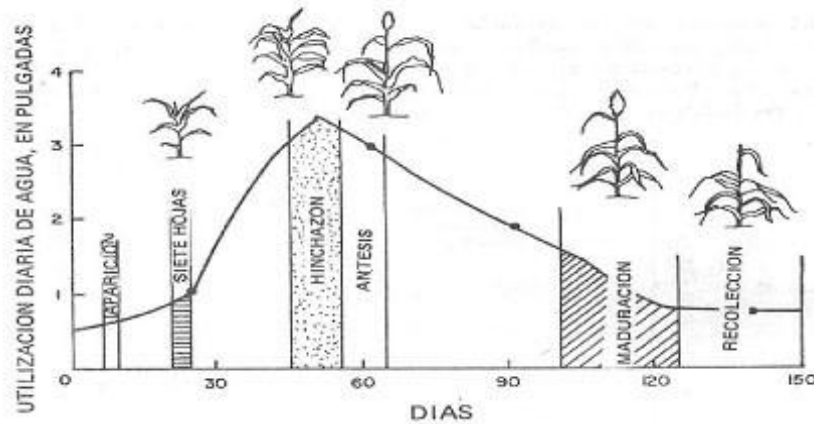


Figura No. 1 Utilización diaria de agua por la planta de sorgo desde la germinación hasta la cosecha (Pérez et al., 2010).

2.4.2 Consumo y requerimientos diarios

La utilización del agua por la planta de sorgo granífero depende parcialmente del AD en el suelo (Bennett y Tucker, 1986). Ésta a su vez depende de las precipitaciones y en particular, de la distribución de las mismas en la estación de crecimiento del cultivo, las cuales pueden determinar que exista o no producción de grano.

Bennett y Tucker (1986), explican el consumo de agua diario del cultivo de la siguiente manera:

Las semillas comienzan su germinación al embeberse de humedad. Después de la germinación y emergencia la utilización del agua es baja, oscilando entre los 0,05 y 0,1 cm/ha/día durante las primeras 2 a 4 semanas.

Cuando el cultivo alcanza la etapa de 6 a 7 hojas alrededor de la cuarta semana, el consumo de agua comienza a crecer abruptamente. Promedia cerca de 0,5 cm/ha/día por alrededor de 10 días y alcanza 0,8 cm/ha/día durante el estado de formación de la panoja. El pico de utilización de agua puede ser tan alto como 0,9 a 1 cm/ha/día durante la etapa de panojamiento y principios de floración. Desde este punto la cantidad consumida decrece aproximadamente a 0,8 cm/ha/día a los 60 a 70 días.

La cantidad de agua consumida continúa decreciendo hasta el punto de “madurez fisiológica”, donde es tan solo de 0,25 cm/ha/día. Después de alcanzar este punto, la planta puede seguir absorbiendo agua y utilizar menos de 0,25 cm/ha/día hasta la muerte.

La humedad absorbida después de la maduración no tiene valor para el crecimiento de la planta, por lo tanto es deseable interrumpir el “flujo de agua” inmediatamente después de la cosecha para evitar pérdidas de humedad del suelo.

2.5 PRÁCTICAS DE MANEJO DEL CULTIVO Y SU RELACIÓN CON LA DISPONIBILIDAD HIDRICA

2.5.1 Población

Según Carrasco (1989) en las condiciones del Uruguay, donde el agua no es tan limitante, se trata de que el agua utilizada deje el máximo rendimiento en grano, es decir, maximizar la eficiencia de uso.

Cuanto más seco es el año, la respuesta a la densidad de siembra hasta la óptima recomendada es mayor. En estos años las deficiencias hídricas limitan antes el rendimiento por planta que la respuesta a la población. Es decir, que una planta en un año seco no rinde lo que puede en un año húmedo, pero ello no implica que no pueda soportar otra planta creciendo a su lado. Con un menor rendimiento por planta por causa de un año seco, la única forma de aumentar el número de granos por metro cuadrado es con mayor número de plantas. En un año lluvioso ocurre exactamente lo contrario. El potencial de producción por planta es elevado y una omisión en la densidad de siembra, en general, no tiene demasiadas consecuencias (Carrasco, 1989).

El trabajo de Antelo y Mermot (1988) aporta información que indica que el rendimiento crece al aumentar la población hasta 210.000 pl./ha. A partir de esta población el rendimiento permanece estable.

Existen trabajos más recientes, como los de Schaffner y Sprunck (2009), donde se evalúa un rango de poblaciones de entre 80.000 a 260.000 pl./ha, en siembra de segunda; Bentancur y Bentancur (2010), con un rango de poblaciones entre 24.000 a 204.000 pl./ha, en siembra de primera; y Medina y Olivera (2012), con poblaciones de 6, 12 y 18 pl./m², en siembra de segunda. En ninguno de los trabajos mencionados se encuentran diferencias significativas en rendimiento, dadas las diferentes poblaciones. Se considera que las precipitaciones durante los ciclos del cultivo en los tres trabajos

estuvieron por debajo del promedio de la serie histórica 1961-90, categorizándose como “años secos”.

Bertea y Ortiz (2010) demuestran que por encima de 12,6 tallos/m² el sorgo presenta una alta capacidad de compensación, lo que se traduce en valores estables de rendimiento. Saine et al. (2010) en un año con deficiencias hídricas observan resultados diferentes, con variaciones de rendimiento significativas en función de la población y el espaciamiento entre hileras.

Ghironi et al. (2010) demuestran que ante condiciones de déficit hídrico, en el rango de 70.000 a 140.000 pl./ha no se observan diferencias en los rendimientos máximos, lo cual se explica por cambios en la cantidad de panojas por planta y número de granos/panoja. En tanto que no se observan modificaciones significativas en el número de granos/m² y peso promedio de los mismos.

En conclusión, si bien es posible que se generen mermas en rendimiento por una omisión en el número de plantas por hectárea en años secos, tal como destaca Carrasco (1989), dicho número es tan bajo como 60 mil (Medina y Olivera, 2012), 24 mil (Bentancour y Bentancour, 2010) u 80 mil (Schaffner y Sprunck, 2009) para las condiciones del Uruguay, en concordancia con datos registrados en la Argentina. La explicación es una alta capacidad de compensación del cultivo (Bertea y Ortiz, 2010), dada por un cambio en la cantidad de panojas por planta y en el número de granos/panoja.

2.5.2 Nitrógeno

La disponibilidad de nutrientes afecta el rendimiento y la producción de biomasa a través de alteraciones tanto en la fuente como en los destinos. A nivel de fuente una deficiencia de nitrógeno (N) genera una menor expansión foliar y acelera el proceso de senescencia, lo que disminuye la duración del área foliar y la intercepción de radiación (Borrell et al., citados por Ortiz, 2010).

El efecto de los nutrientes en los destinos reproductivos se manifiesta tanto en el número como en el peso de los granos. Una deficiencia de N afecta la tasa de crecimiento en el período crítico y por lo tanto la fijación de granos y el rendimiento (Gerik et al., citados por Ortiz, 2010).

Battista (2010) no encuentra respuesta al agregado de N en IAF y biomasa aérea en sorgo, siendo significativo el efecto sobre el rendimiento para 100 Kg/ha de N frente al testigo sin agregado, lo cual se explica por un mayor número de granos/m² en el primero.

Ghisellini y Holtz (1985) verifican un aumento significativo del índice de cosecha (IC), a la vez que la producción de materia seca (MS) total no se modifica, obteniéndose eficiencias de uso del N de hasta 11 Kg. de grano por Kg. de N.

Zaongo et al. (1997), evalúan dosis de N y riego sobre un suelo Ustifluent, de textura franco arenoso, derivado de depósitos aluviales y eólicos, con 2 % de MO. En el mismo se demuestra que el rendimiento en grano se incrementa en un 41 % por el uso de riego, siendo solo de un 20 % por efecto del agregado de N. Para dicho experimento la respuesta en términos de MS acumulada es de un 30 % cuando sólo se agrega N y del 55 % cuando se hace riego como única medida de manejo.

Por otra parte, la fertilización nitrogenada incrementa la eficiencia de uso del agua (EUA) en un 21 % (Zaongo et al., 1997), mientras que también se registra respuesta al riego entre 9 y 40 %, pero sin incrementar en gran medida la cantidad de agua transpirada (Zaongo et al., 1997).

2.6 EFECTOS DE LAS DEFICIENCIAS HIDRICAS SOBRE EL POTENCIAL PRODUCTIVO DEL SORGO

Moura et al., citados por Peiter y Carlesso (1996), Agboma et al., citados por Ali et al. (2009b), destacan que la falta de agua tiene diversos efectos sobre el rendimiento, según la etapa del desarrollo en la que se produce, siendo necesaria la aplicación de la cantidad requerida de agua en el momento adecuado del ciclo para maximizar el rendimiento.

Al respecto Kashiwagi et al., citados por Ali et al. (2009b), señalan que la incidencia del estrés hídrico en la etapa de plántula produce un mayor peso seco de la raíz, raíces y coleóptiles más largos y una mayor relación parte aérea/raíz.

En cuanto al efecto sobre la producción de biomasa, Peiter y Carlesso (1996) aseveran que, la reducción en el área foliar es una adaptación morfológica irreversible cuando ocurre durante el crecimiento y desarrollo del cultivo, particularmente en cultivos de crecimiento determinado. Una disminución en el área foliar de las plantas ocasionada por estrés hídrico, disminuye la interceptación y absorción de radiación solar fotosintéticamente activa y genera una menor producción de carbohidratos. Así, el crecimiento del cultivo y el rendimiento potencial que fueron perdidos en esta etapa, no pueden

ser recuperados si el cultivo es nuevamente sometido a condiciones ideales de crecimiento.

Borrell et al. (2000) no observan efecto del régimen hídrico sobre la cantidad de MS acumulada hasta la iniciación de la panoja. Sin embargo, la producción de MS post-floración es 44 % mayor cuando el cultivo crece sin déficit hídrico en comparación con el que tiene deficiencias hídricas en pre y post-floración.

En ensayos de Craufurd y Peacock (1993), en los cuales se evalúa el comportamiento de líneas de floración temprana y tardía, en respuesta a tres períodos de déficit hídrico (20-42, 43-69 y 20-69 días post siembra), se concluye que la máxima reducción en el total de MS ocurre cuando la deficiencia hídrica se da entre inicios del periodo reproductivo y llenado de grano temprano.

En relación al efecto sobre el rendimiento que se genera por el déficit hídrico, Kebede et al., citados por Ali et al. (2009b) mencionan que, el estrés hídrico que tiene lugar en las etapas de pre-floración y post-floración tiene efectos más adversos en el rendimiento cuando se da durante y después de la antesis. Cuando el estrés se da durante floración y principios de antesis genera fracasos en la fertilidad, debido a la alteración de la función del polen y el óvulo (Prasad et al., citados por Ali et al., 2009b), que a su vez resultan en rendimientos de grano inferiores (Ali et al., 2009b).

Bentrano et al. (1999) indican que el estrés por sequía grave durante la etapa de floración como pre antesis y post antesis causa pérdidas en la clorofila, fuga de electrolitos de la célula, hoja bandera amarilla y pérdidas de granos antes de la maduración.

Lewis et al. (1973) evalúan la respuesta al déficit hídrico generado en tres etapas del ciclo del cultivo de sorgo granífero, donde encuentran que el rendimiento en grano de sorgo se redujo un 17 % cuando el potencial de agua del suelo fue menor a -12,9 bar durante la fase vegetativa, hasta antes de la emergencia de la panoja. Los niveles de agua del suelo similares durante la etapa de floración y de grano lechoso a grano pastoso, ocasionan pérdidas del 34 y el 10 %, respectivamente. Estos valores demuestran que déficits moderados de agua tienen efectos mayores en el rendimiento, cuando ocurren durante el periodo de floración. En contraste, el mismo déficit hídrico ocasionado en llenado de grano, genera pérdidas de rendimiento menores.

Craufurd y Peacock (1993) muestran que el estrés causado por falta de agua reduce en un 87 % los rendimientos en grano, cuando éste se produce en el comienzo de la floración, hasta el llenado de grano. Este trabajo también muestra que el estrés durante estado vegetativo no reduce el rendimiento en grano. Mientras que el tamaño de los granos solo se reduce cuando el estrés es producido durante el llenado de grano.

En el trabajo citado anteriormente, llevado a cabo por Craufurd y Peacock (1993), se destaca que el número de panojas por metro cuadrado y los granos por panoja se reducen a causa del estrés producido entre inicios del periodo reproductivo y llenado de grano temprano. Borrell et al. (2000) comprueban también, que el número de granos fue menor en el tratamiento con déficit en torno a floración, en comparación con los tratamientos sin déficit y con déficit post floración.

Craufurd y Peacock (1993) comprueban que se produce un incremento en el número de granos por panoja, compensándose parcialmente un bajo número de panojas por m². Por otra parte el peso de los granos es afectado solamente cuando el estrés se ocasiona durante el llenado de grano. En todas las líneas y tratamientos de dicho trabajo, el rendimiento se correlaciona fuerte y positivamente con el número de granos por m² ($r^2=0,97$).

Peiter y Carlesso (1996) evalúan la respuesta del sorgo a distintos valores de AD en el suelo, con el uso lisímetros de drenaje y niveles de AD contrastantes (0,95, 0,85, 0,75, 0,65) durante todo el ciclo del cultivo. En dicho experimento se observa que con 65 % de AD en el suelo se reduce el peso de las panojas y el peso de los granos, en respuesta a una menor área fotosintéticamente activa y una menor producción de carbohidratos.

2.6.1 Índice de cosecha

El IC es la porción de grano en relación de la biomasa total (MS del grano/MS total; Cubero, 2003). Éste es diferente para distintas variedades de una misma especie y puede variar entre lugares de acuerdo con la disponibilidad de nutrientes y con las condiciones dominantes durante el tiempo de llenado de los granos (Wild, 1989).

En zonas de sequías progresivas, según Carrasco (1989), el rendimiento tiene una estrecha relación con el IC, a diferencia de lo que ocurre en regiones más lluviosas. Frente a restricciones severas en la disponibilidad de agua, muchas de las plantas no alcanzan el estado reproductivo y por lo tanto

pasan a ser materia seca vegetativa o no cosechada. Esto aumenta la fracción del IC que no resulta económicamente de interés.

Craufurd y Peacock (1993) señalan que no existe relación entre la reducción relativa de la producción de MS total (%) y el IC, incrementándose la partición en las condiciones más severas. Se destaca también que no hay relación entre el tamaño de la planta individual y el IC, mientras que la máxima reducción del IC se da en los tratamientos en los cuales el estrés ocurre durante floración.

Borrell et al. (2000) verifican que cuando no hay déficit hídrico, el rendimiento está altamente correlacionado con la producción de MS aérea y no con el IC, siendo más importante la producción de biomasa, en comparación con la partición hacia el grano. En relación a lo anterior, se ve un mayor IC en los tratamientos con déficit hídrico, comparado con el que no tiene déficit en todo el ciclo.

En contraposición a lo mencionado en los párrafos anteriores, Farré y Faci (2006) encuentran que el efecto del déficit hídrico en el rendimiento en grano, es mayor que en la producción total de biomasa, reflejándose en un bajo IC bajo estrés hídrico. De esta forma, concluyen que para el sorgo existe un rango de deficiencia hídrica moderada en el cual el IC es poco afectado, reduciéndose solo en los tratamientos con déficit hídrico severo.

A nivel nacional Alcoz et al. (1988) no encontraron diferencias significativas en el IC entre tratamientos que evaluaron distintas dosis de N, variaciones en el no. de plantas por metro lineal y distintos espaciamientos entre hilera. A su vez, identificaron diferentes IC entre dos híbridos de sorgo, con largos de ciclo distintos.

En referencia a las diferencias existentes con el maíz, Farré y Faci (2006) llevan a cabo experimentos donde se comparan maíz y sorgo, y se demuestra que la MS aérea total, el rendimiento en grano y el IC, son mayores en maíz que en sorgo en tratamientos con nulo o mínimo déficit hídrico. Sin embargo, el déficit hídrico reduce la producción de MS y el rendimiento en grano más en maíz que en sorgo, resultando en mayores rendimientos de sorgo en tratamientos con déficit hídrico moderado a severo. En los niveles altos de riego el maíz tiene mayor IC que el sorgo, pero éste decrece marcadamente cuando se incrementa el déficit hídrico.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El ensayo se realizó en el campo experimental de riego de la Estación experimental “Dr Mario A. Cassinoni” (EEMAC), en el año agrícola 2011-12. La EEMAC está ubicada sobre la ruta nacional No. 3 “General José Gervasio Artigas” km 363, cercana a la ciudad de Paysandú, Uruguay.

El suelo donde se realizó el ensayo fue un Brunosol sub-eutrítico típico de la Unidad San Manuel, cuyo análisis químico en el año 2011 indicó MO= 3,5%, P-PO₄= 33 ppm, N-NO₃= 6 ppm. La capacidad de almacenamiento de AD para este suelo fue de 111 mm.

3.2 MANEJO EXPERIMENTAL

El laboreo realizado fue de tipo convencional y constó de dos pasajes de rastra excéntrica y uno de vibro cultivador. La siembra se realizó el 11 de noviembre del 2011 con una sembradora experimental (Wintersteiger PLOTMAN, Gesellschaft m.b.n. &CO, Austria). El material genético utilizado fue el híbrido M 102, la población objetivo fue de 300.000 pl./ha, la que se logró ajustadamente mediante raleo manual en los estadios V3-V4. Las parcelas constaron de 5 hileras de cultivo y con distancia entre hileras de 0,4 m.

El manejo de la fertilización consistió en el agregado de 300 kg de N ha⁻¹ en V6. El control de malezas se realizó pre-siembra con una aplicación de 2 L ha⁻¹ de pc de Acetoclor. En relación al control de plagas se realizó una aplicación de insecticida Clorpirifos a razón de 1 L ha⁻¹ para lagarta cogollera (*Spodoptera frugiperda*), en el estadio V4-V5.

Cuadro No. 2 Etapas fenológicas del cultivo

Fecha	Evento	Días post-emergencia
11/11/2011	Siembra	
25/11/2011	Emergencia	0
25/11/2011 al 4/01/2012	Etapa vegetativa	0 a 41
5/01/2012 al 5/02/2012	Entorno a Floración (PC)	42 a 72
6/02/2012 al 5/03/2012	Llenado de grano entre fase lag y madurez fisiológica.	73 a 101
16/03/2012	Cosecha	112

3.3 TRATAMIENTOS

El experimento incluyó 5 tratamientos con distintos regímenes hídricos a lo largo del ciclo, planteado en 3 bloques distribuidos totalmente al azar.

Tratamientos:

- T1= Tratamiento testigo, sin deficiencias hídricas en todo el ciclo (60 % AD o más durante el PC y 40 % AD o más durante los PNC).
- T2= Deficiencias hídricas durante el PC (40 % AD o más durante los PNC y entre 20-40 % AD durante el PC).
- T3= Deficiencias hídricas durante el llenado de grano (entre 20-40 % AD durante el llenado de grano, 60 % AD o más durante el PC y 40 % AD o más en la etapa vegetativa).
- T4= Deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y PC (entre 20-40 % AD durante la etapa vegetativa y el PC, y 40 % AD o más durante el llenado de grano).
- T5= Secano

PC= período crítico (15 días antes, hasta 15 días después de la floración), PNC= período no crítico, AD= agua disponible.

Para lograr los umbrales de AD en el suelo, en los tratamientos definidos, se realizaron dos tipos de intervenciones: riego suplementario y contención de las PP en los tratamientos con déficit hídrico, a través de la utilización de simuladores de sequía parcelarios y móviles. Los mismos consisten en estructuras construidas en hierro con cubiertas de lona impermeable. Las dimensiones de estos se adecuaron al tamaño de las parcelas (2m x 5m, ver Anexo 1).

Los simuladores se colocaron inmediatamente antes de los eventos de PP y se retiraron inmediatamente después a los mismos, para afectar lo menos posible las condiciones de radiación solar incidente y temperatura. Para la colocación de los simuladores se usaron distintos pronósticos meteorológicos de PP de corto plazo, nacionales e internacionales.

Las aplicaciones de riego se decidieron de acuerdo a un balance hídrico de suelo de paso diario, a la profundidad radicular estimada en cada etapa de desarrollo. Éste consideró la siguiente expresión: $\Delta H = PP + R - ET_c$, siendo ΔH = variación de agua en el suelo (mm), R = mm agregados de agua de riego, PP = mm de lluvia y ET_c = mm de evapotranspiración del cultivo, calculado como $ET_c = ET_o \times K_c$, donde ET_o = evapotranspiración del cultivo de referencia y K_c = coeficiente del cultivo. Los K_c utilizados fueron los recomendados por FAO (Allen et al., 1998). La ET_o se estimó a través del método Penman-Monteith. Los datos climáticos requeridos fueron obtenidos diariamente en la estación meteorológica automática Vantage Pro 2TM modelo 6510 (Davies Instruments), ubicada en la EEMAC. El agua agregada se midió a través de un medidor volumétrico y en función del tiempo de riego a presión de trabajo constante.

3.4. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

3.4.1 Hipótesis biológica

En el sorgo granífero las disponibilidades hídricas iguales o superiores a 60 % AD durante el PC, y superiores o iguales a 40 % AD en los PNC, permiten obtener rendimientos potenciales para el ambiente de producción en el que se desarrolla.

3.4.2 Hipótesis estadística

Ho: las medias de los tratamientos son iguales: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$ ó los efectos de los tratamientos son iguales $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5$

Ha: Existe al menos una diferencia entre las medias de los tratamientos.

3.4.3 Diseño experimental

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar, con tres repeticiones ubicadas en el sentido de las variaciones edáficas (ver Anexo 2).

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde

Y_{ij} : es el valor del i-esimo tratamiento, en el j-esimo bloque

i=1, 2, 3, 4, 5 tratamientos

j=1, 2, 3 bloques

μ = media poblacional

τ_i =efecto del tratamiento

β_j =efecto del bloque

ε_{ij} =error experimental

Las variables a evaluar fueron: rendimiento (kg ha^{-1}) en grano, peso promedio de 100 granos, número de granos m^{-2} , IC y MS aérea a floración, llenado de grano y cosecha (kg ha^{-1}).

3.5 DETERMINACIONES

3.5.1 Mediciones a campo

Para estimar la producción de MS se realizaron cortes al ras del suelo de todas las plantas en un metro lineal de las hileras linderas a la central. Los cortes fueron hechos el 9 de enero 2012 (46 DPE), 13 de febrero del 2012 (81 DPE) y el 16 de marzo 2012 (113 DPE, cosecha). Las muestras de cada muestreo (todas las plantas del metro lineal), fueron pesadas con balanza electrónica en el laboratorio de la EEMAC. De estas se sacaron las sub-muestras (una planta representativa de la muestra), siendo pesadas antes y después de permanecer en la estufa a 60°C hasta alcanzar un peso constante.

3.5.2 Mediciones a cosecha

Para la estimación de rendimiento y sus componentes se cosecharon a mano 2 metros lineales de la hilera central de cada parcela, para evitar los efectos de competencia que generan los bordes. Los 2 m no fueron continuos porque todos los tratamientos y todas sus repeticiones fueron afectados por el ataque de pájaros, que redujeron la cantidad de granos en forma significativa.

Luego de la cosecha se estimó rendimiento, número de granos m^{-2} , peso de 100 granos y % de humedad de los mismos. Dada la pérdida desigual de granos en las panojas por el ataque de los pájaros, para poder estimar los componentes antes mencionados, fue necesaria la elaboración de un método que permitiera estimar las pérdidas producidas (ver Anexo 3).

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron analizados con el software estadístico INFOSTAT, versión para Estudiantes del año 2008.

Se realizaron los análisis de varianzas (ANAVA) para cada variable evaluada. Dicho análisis realiza una descomposición de la variabilidad total en la muestra (suma de cuadrados totales de las observaciones) en componentes (suma de cuadrados), asociados cada uno a una fuente de variación reconocida. Para ello se utilizó la prueba de comparación múltiple Tukey, al 5 % de significancia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CONDICIONES CLIMATICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO

4.1.1 Precipitaciones

La primavera y verano del año agrícola 2011-12 en Paysandú, se caracterizó por presentar precipitaciones (PP) promedio mayores que para la serie histórica 1980-2009. No obstante, la mayor proporción de las PP se concentró en los meses de febrero y marzo, registrándose, como puede observarse en la Figura No. 2, valores por encima del promedio histórico para dichos meses (126 %). En cambio en los meses de diciembre y enero las PP fueron inferiores a las de la serie histórica mencionada.

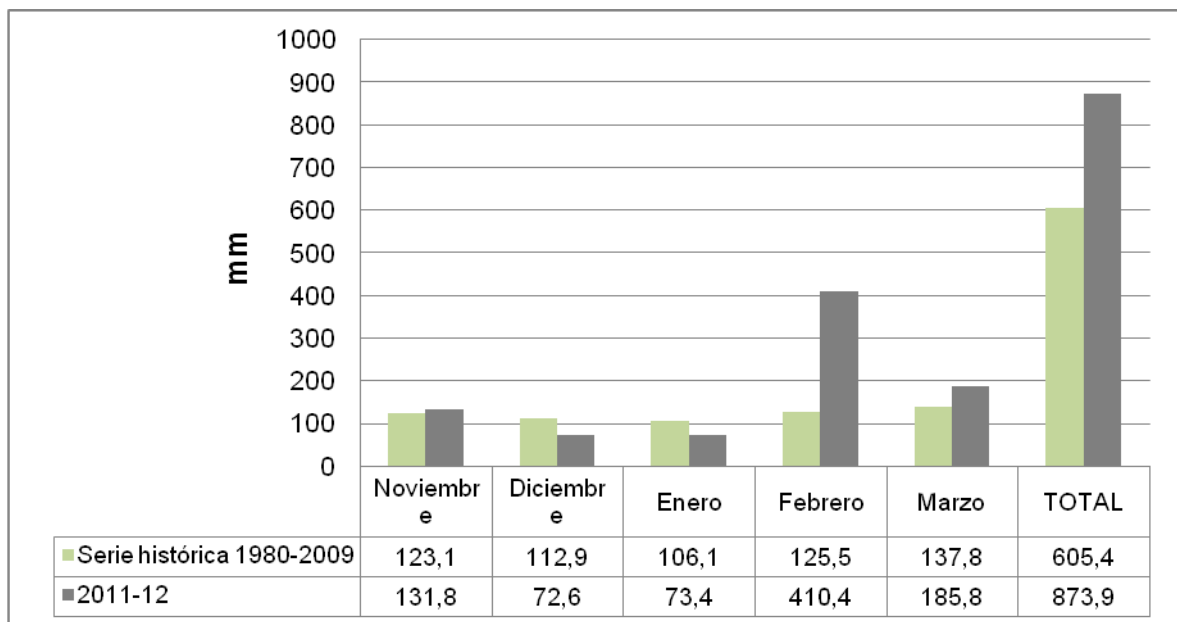


Figura No. 2 Precipitaciones (mm) en el ciclo del cultivo año 2011-12, EEMAC, y promedios mensuales para Paysandú de la serie histórica de 1980-2009 (elaborado en base a datos de INIA. GRAS, s.f.).

En la Figura No. 3 se observan las PP agrupadas por tercios mensuales durante el ciclo del cultivo, destacándose las lluvias que se registraron en la etapa de llenado de grano (febrero), las cuales superaron los 400 mm. En tanto que durante el PC, ubicado en el entorno de la floración, las PP fueron

inferiores a la media histórica, ocurriendo más del 60 % de las mismas sobre el fin de dicha etapa.

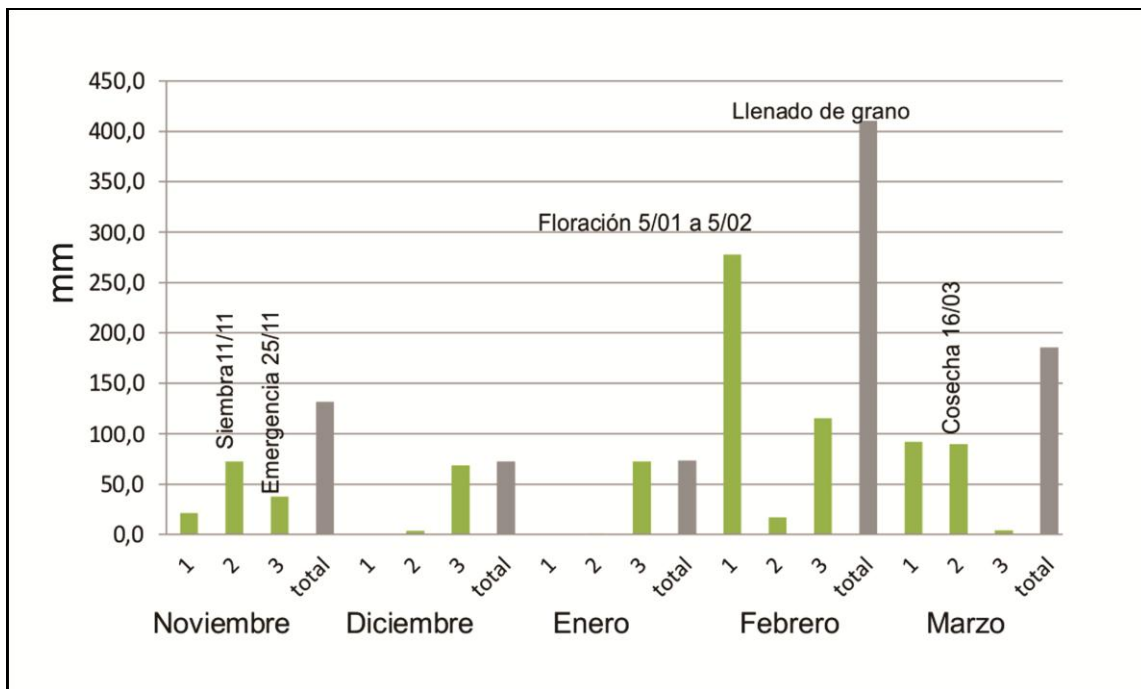


Figura No. 3 Distribución de las precipitaciones decádicas y totales mensuales en las distintas etapas del cultivo, 2011-12 (elaborado en base a datos de INIA. GRAS, s.f.).

4.1.2 Radiación solar

En la Figura No. 4 se muestran los valores diarios promedios de radiación solar para los meses en los que se desarrolló el cultivo, durante el año agrícola 2011-12, y para el promedio de la serie histórica 2002-12, registrados en la EEMAC.

Como se puede observar en la Figura No. 4, en los meses de noviembre, diciembre y enero, se presentaron valores de radiación solar mayores que los promedios de la serie histórica considerada, generando condiciones apropiadas para el crecimiento del cultivo en las etapas vegetativas y el PC. Estas diferencias en radiación solar, se explican por las menores PP

ocurridas durante dichos meses, y como consecuencia de un nivel menor de nubosidad.

Durante los meses de febrero y marzo, en los cuales transcurrió el llenado de grano, no ocurrieron diferencias en la radiación solar con respecto a la serie histórica, siendo las mismas adecuadas para el llenado de grano y la madurez.

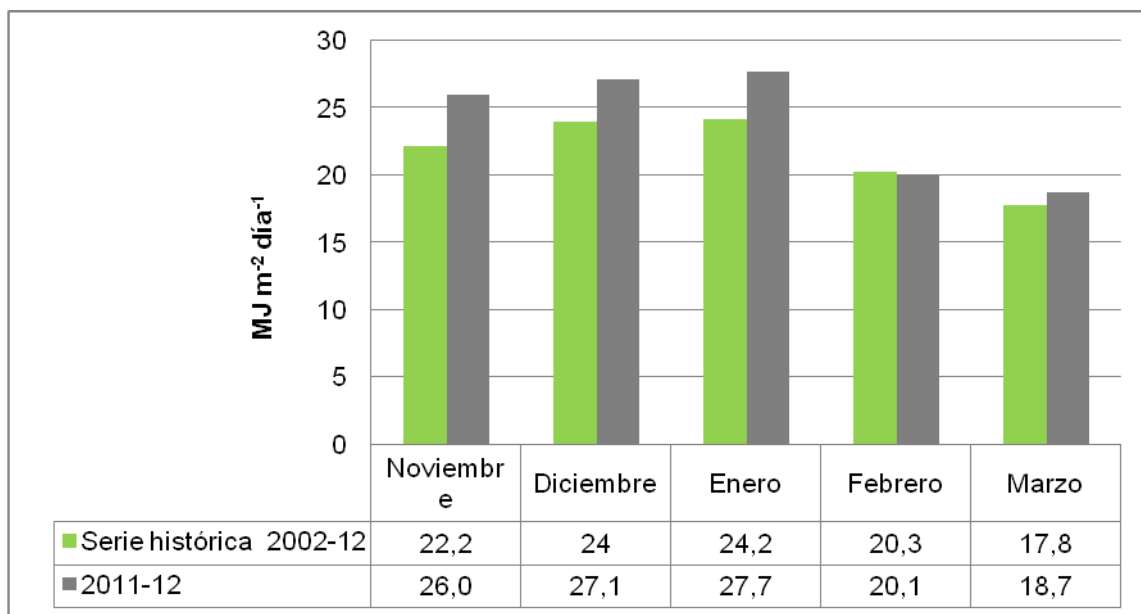


Figura No. 4 Radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) durante el ciclo del cultivo del año 2011-12 en la EEMAC y promedios anuales para Paysandú de la serie histórica de 2002-2012 (Estación Agro meteorológica EEMAC).

El sorgo es un cultivo de tipo fotosintético C4 con alto punto de saturación en luz, por lo que los aumentos en la radiación solar incidente durante el ciclo provocan incrementos en la producción de biomasa, por un proceso de fotosíntesis eficiente y una fijación de CO_2 elevada. Según Carrasco (1989), a mayor producción de biomasa, mayores rendimientos, por lo que el aumento en la radiación solar ocurrido durante el ciclo del cultivo, podría haber generado rendimientos en grano mayores en relación a un año con radiación solar promedio.

4.2. AGUA DISPONIBLE

A continuación se presentan los porcentajes de AD a la profundidad radicular estimada, durante el ciclo del cultivo, en los distintos tratamientos, con los umbrales utilizados para cada etapa.

Los umbrales de % AD utilizados fueron tomados en base a información obtenida en maíz, debido a la inexistencia de información para sorgo y a la similitud del maíz y el sorgo ya que ambas especies son gramíneas estivales y de tipo fotosintético C₄. En este sentido, se utilizó información de Shaw, citado por Andrade y Sadras (2000), quienes reportaron valores de % de AD limitantes para el crecimiento de los cultivos por debajo de 40-60 %.

En la Figura No. 5 se muestra la evolución del % AD durante el ciclo del cultivo en el T1. Como se puede observar, en los últimos días del llenado de grano se produjeron disminuciones en el % AD, por debajo del umbral establecido para dicha etapa. Sin embargo, éstas ocurrieron durante un lapso de tiempo corto, no considerándose como significativo para la determinación de los resultados.

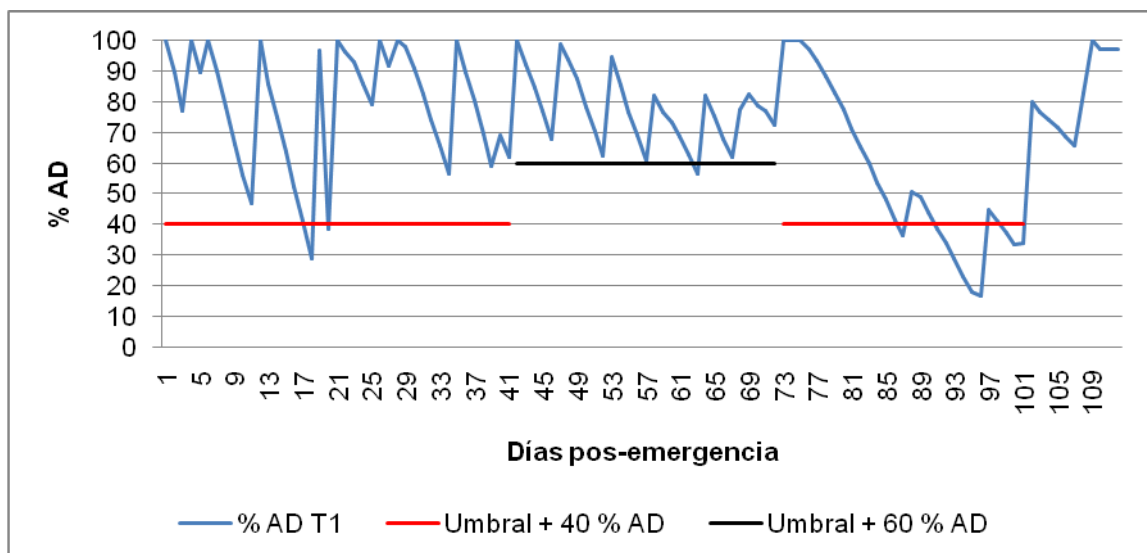


Figura No. 5 Evolución del porcentaje de agua disponible durante el ciclo del cultivo en el T1.

En la Figura No. 6 se representan los resultados de la evolución del % AD en el T2, en el ciclo del cultivo. Durante el final del llenado de grano se produjo una disminución en el % AD. Por tratarse de un lapso corto de tiempo se supone que no afectó la planificación para dicho tratamiento.

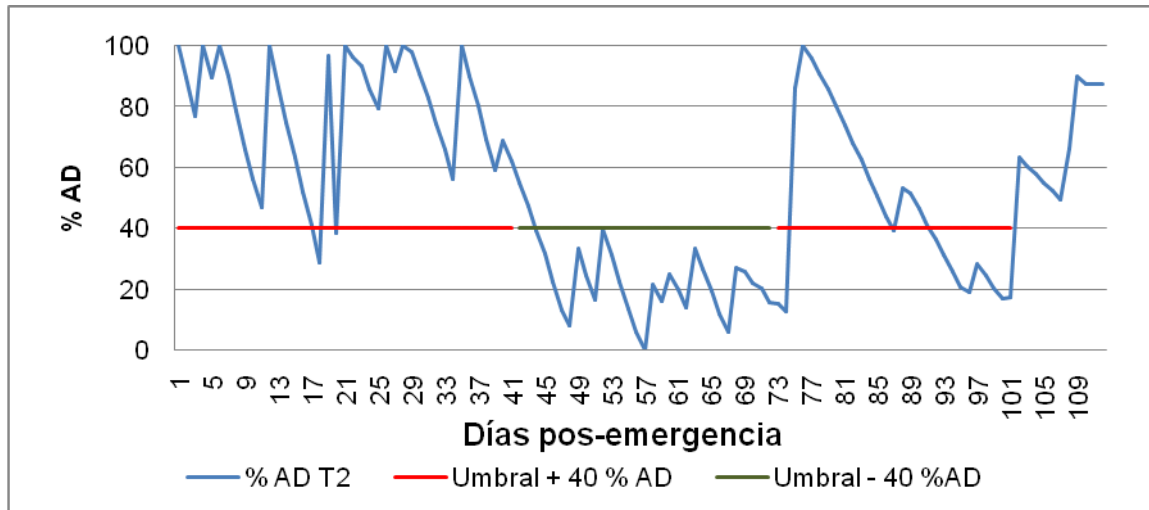


Figura No. 6 Evolución del porcentaje de agua disponible en el ciclo del cultivo en el T2.

En la Figura No. 7 se observa la distribución de % AD para el T3. Como se puede apreciar, durante la etapa de llenado de grano el % AD superó el umbral planteado para el T3 durante los primeros 18 días de la misma, aproximadamente. En los apartados siguientes se puede ver que este valor de % AD por sobre el umbral preestablecido, pudo haber afectado los resultados obtenidos. En este caso, el lapso de tiempo en que se dieron estas condiciones fue lo suficientemente extenso, y como consecuencia no se logró el tratamiento como fuera planeado.

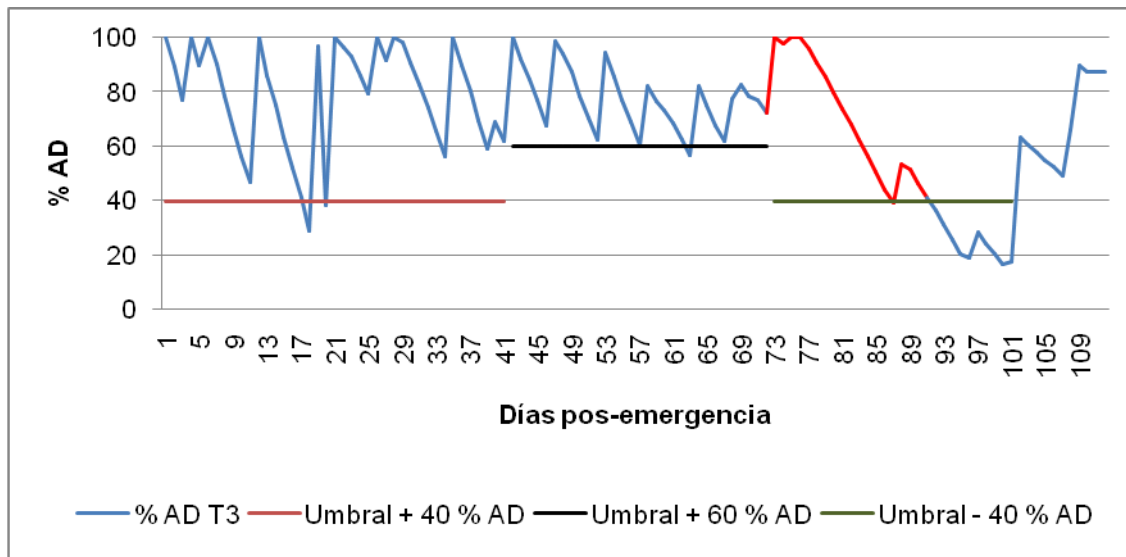


Figura No. 7 Evolución del porcentaje de agua disponible en el ciclo del cultivo en el T3.

En la Figura No. 8 se presenta la evolución del % AD para el T4. En la misma se observa que se cumplió con los umbrales de % AD planeados, a pesar de haber existido una disminución del % AD hacia el final del llenado de grano. En este tratamiento se esperó un rendimiento inferior al de los demás tratamientos.

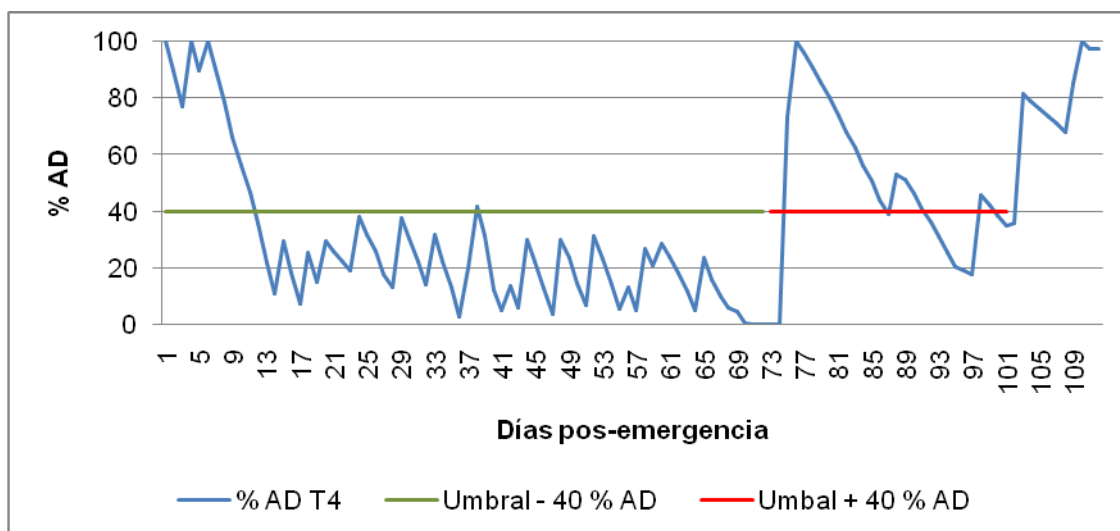


Figura No. 8 Evolución del porcentaje de agua disponible en el ciclo del cultivo en el T4.

A continuación, se presentan los valores de % AD para el T5, el cual se manejó en seco, sin intervenciones para modificar el % AD del suelo. Por lo tanto, el gráfico representa los valores de agua acumulada, propios de la situación climática del año.

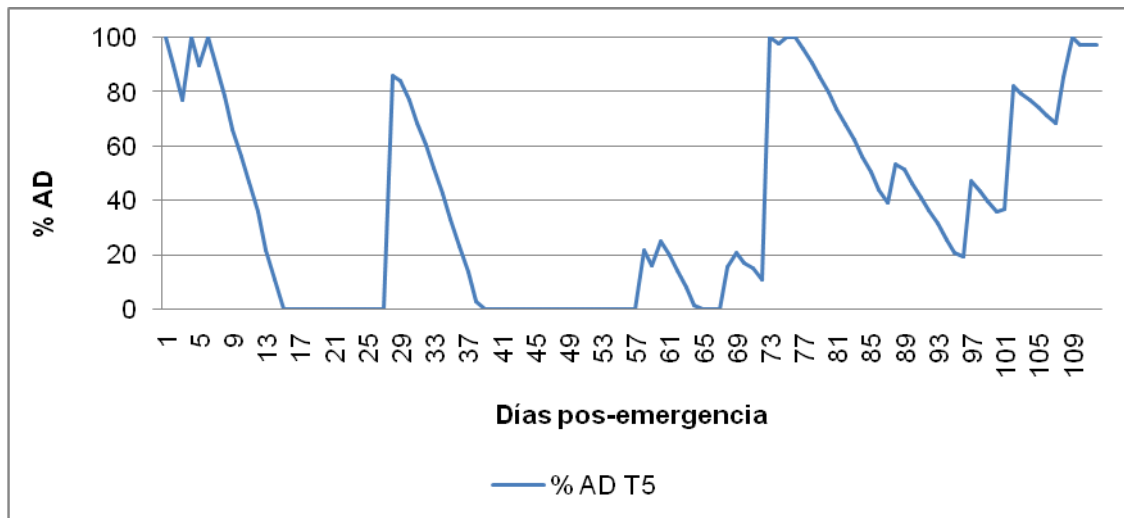


Figura No. 9 Evolución del porcentaje de agua disponible en el ciclo del cultivo en el T5.

4.3. PARÁMETROS DE CRECIMIENTO

4.3.1 Evolución de la materia seca

En la Figura No. 10 se presenta la evolución de la MS aérea en los diferentes tratamientos evaluados, en la cual se observa que la misma aumentó hasta la cosecha. Este aumento sostenido hasta la madurez fisiológica, se debió a que, a diferencia de otros cultivos, el sorgo mantiene sus hojas activas y verdes posteriormente incluso a la cosecha.

En concordancia con los resultados obtenidos por Craufurd y Peacock (1993), Borrell et al. (2000), se observa que hasta inicios del PC no hubo diferencias en la acumulación de MS. A partir de dicha etapa, las diferentes disponibilidades hídricas generaron diferencias, siendo el T4 significativamente inferior al T1 a comienzos de llenado de grano y a cosecha. En la etapa entorno a la floración ocurrió la máxima acumulación de MS.

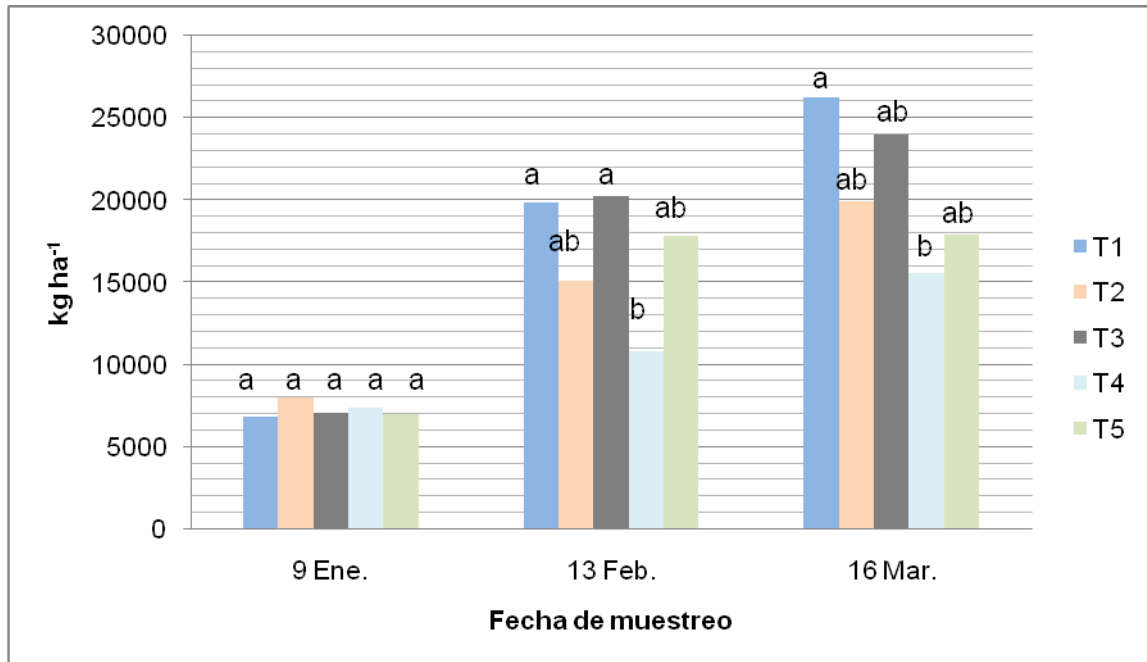


Figura No. 10 Evolución de la materia seca durante el ciclo del cultivo. Columnas con igual letra no difieren entre sí para una misma fecha de muestreo ($p < 0,05$: Tukey).

Como se puede observar en la Figura No. 11, se constató una relación entre la acumulación de MS total y el rendimiento en grano, de forma que los tratamientos con mayor cantidad de MS total obtuvieron los rendimientos más altos. En este sentido Craufurd y Peacock (1993) lograron relaciones similares entre la acumulación de MS y el rendimiento en líneas de sorgo de floración tardía, siendo más baja la acumulación de MS con déficits hídricos durante el periodo vegetativo y la floración, superado por los tratamientos con déficit tardío (durante floración) y temprano (periodo vegetativo). Por su parte, Carrasco (1989) aseveró que para el Uruguay, con condiciones aceptables desde el punto de vista hídrico, la estrategia en sorgo debería consistir en producir mayor cantidad de MS para maximizar la producción de grano.

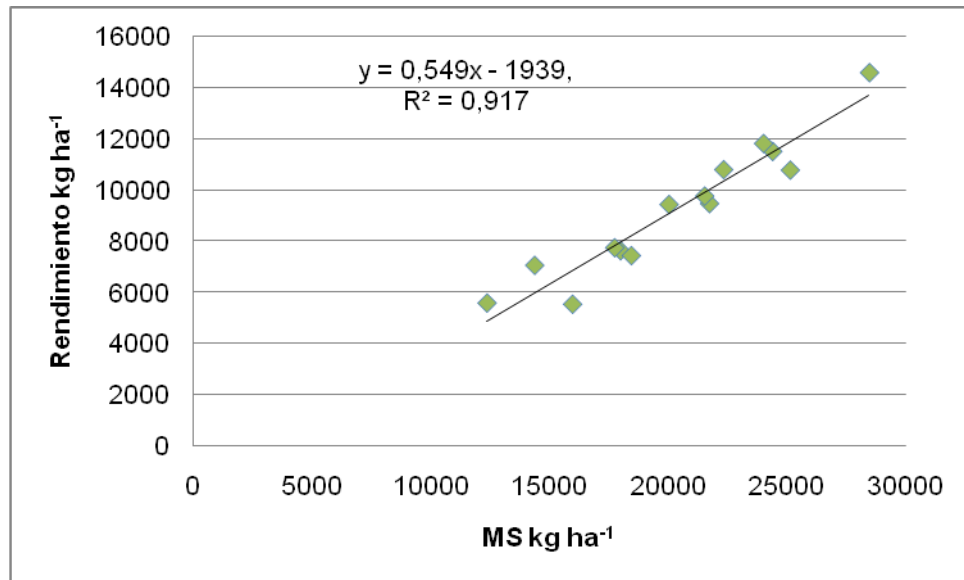


Figura No. 11 Rendimiento (kg ha⁻¹) en función de la MS total (kg ha⁻¹) producida.

En relación a lo expuesto anteriormente, el rendimiento se correlacionó de forma positiva con la acumulación de MS aunque el factor determinante fue la disponibilidad hídrica durante la etapa entorno a la floración, dado que en esta etapa se produce la máxima acumulación de MS.

4.3.2 Rendimiento en grano

En la Figura No. 12 se muestran los rendimientos alcanzados en función de las diferentes disponibilidades hídricas. En la misma se observa que las deficiencias hídricas en torno a la floración produjeron las mayores pérdidas de rendimiento, tal como mencionan Lewis et al. (1973), Kebede et al., citados por Ali et al. (2009b), Bentrano et al., citados por Ali et al. (2009a).

El déficit hídrico producido en el T2 generó un rendimiento promedio 33 % inferior al del T1. Este resultado concuerda con resultados aportados por Lewis et al. (1973), quienes encontraron una diferencia en rendimiento de 34 % con deficiencias hídricas provocadas en el PC.

Las deficiencias hídricas durante el período entorno a la floración generaron las pérdidas de rendimiento mayores, por ser la etapa en la que éste

se concreta. Durante dicha etapa los primordios florales, formados entre las etapas de diferenciación del ápice de crecimiento y el embuche, se transforman en granos. Por lo tanto, se determina la cantidad total de granos que se van a llenar durante la etapa de llenado de grano. Como fuera comentado anteriormente, la etapa del entorno a la floración fue la de mayor acumulación de MS y la que tuvo las tasas de crecimiento del cultivo más altas. Si el suministro de agua en dicha etapa no es ajustado a los requerimientos del cultivo, la actividad fotosintética se ve restringida, afectando la fijación de CO₂ y la formación de granos.

El rendimiento en el T4 fue 53 % inferior al del T1 y 20 % inferior al del T2. Esto indica que existió un efecto acumulado entre las deficiencias hídricas producidas durante la etapa vegetativa y del entorno a la floración, y demuestra que las restricciones hídricas ocurridas en las etapas previas al PC, tuvieron efecto en la determinación del rendimiento.

Como se observa en la Figura No. 12, las deficiencias hídricas generadas en el T3 produjeron pérdidas menores en rendimiento que las generadas en el T2, coincidiendo con los resultados obtenidos por Lewis et al. (1973). La explicación a este comportamiento es que el número de granos final por m², que es el componente más importante del rendimiento (Borrell et al., 2000), se concreta durante la etapa entorno a floración. Las deficiencias hídricas en esta etapa, redujeron el rendimiento por una merma en la cantidad de granos fijados, no pudiendo ser compensada con un mayor peso de los mismos en la etapa de llenado de grano (Lewis et al., 1973).

Por otra parte, no se encontraron diferencias significativas entre los rendimientos del T1 y el T3. Como se muestra en la Figura No. 7, durante los primeros 18 días de la etapa de llenado de grano el T3 experimentó condiciones hídricas favorables, no planeadas. Durante esta etapa del cultivo, el componente de rendimiento afectado es el peso de grano. Sin embargo, como se verá en el apartado siguiente, no hubo una disminución significativa en el peso de grano del T3, lo cual explica que su rendimiento no se diferenciara estadísticamente del T1.

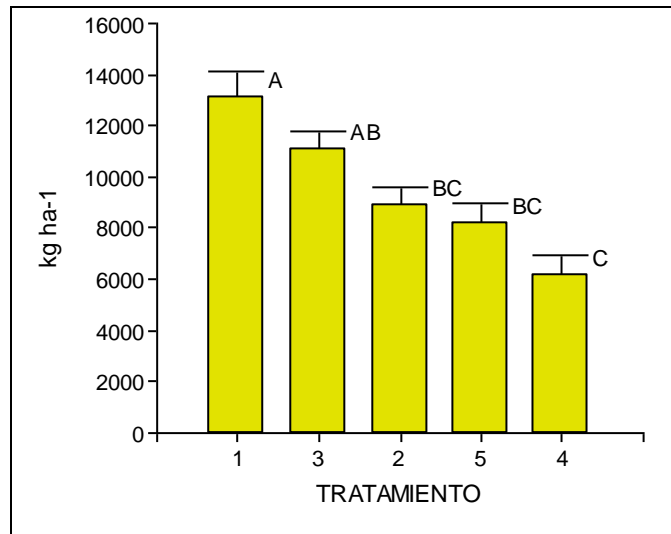


Figura No. 12 Rendimiento (kg ha⁻¹) en función de diferentes disponibilidades hídricas, con sus respectivos errores estándar. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$: Tukey).

En la Figura No. 12 se presentan los promedios de los tratamientos con sus respectivos errores estándar. En la misma se observa que el T1 presentó un mayor error estándar, como consecuencia de la pérdida de una de sus repeticiones (ver Anexo 4).

4.4 COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

4.4.1 Número de granos por superficie

En la Figura No. 13 se presentan los valores del número de granos por m⁻² en los diferentes tratamientos evaluados. En la misma se observa que solo se provocaron disminuciones significativas cuando el déficit hídrico fue más severo, mientras que el T1 y el T3 tuvieron la mayor cantidad de granos por superficie.

En el T2 se observa una tendencia a disminuir el número de granos por superficie. No obstante, no se detectaron diferencias significativas, y por lo tanto, no coincide con lo reportado por Craufurd y Peacock (1993) y por Borrell et al. (2000), quienes sí encontraron que el número de granos por superficie fue menor, cuando el déficit hídrico ocurrió durante el PC. Es posible que dicha falta

de coincidencia se haya debido a un alto error experimental, a causa de un coeficiente de variación (CV) próximo a 14 % (ver Anexo 4), dado que la correlación entre el número de granos y el rendimiento fue elevada ($r^2=0,76$), mientras que también se produjo una diferencia significativa entre el rendimiento del T2 y el T1.

En el T4 se detectó una reducción significativa en el número de granos por superficie en comparación con el T1. Esto induce a pensar que el déficit hídrico únicamente durante la etapa entorno a la floración, no fue suficiente para que el número de granos disminuyera en forma significativa en relación al T1. Siendo factible que una reducción en el potencial de rendimiento, como consecuencia de un menor número de estructuras reproductivas fuera provocado en la etapa previa al PC.

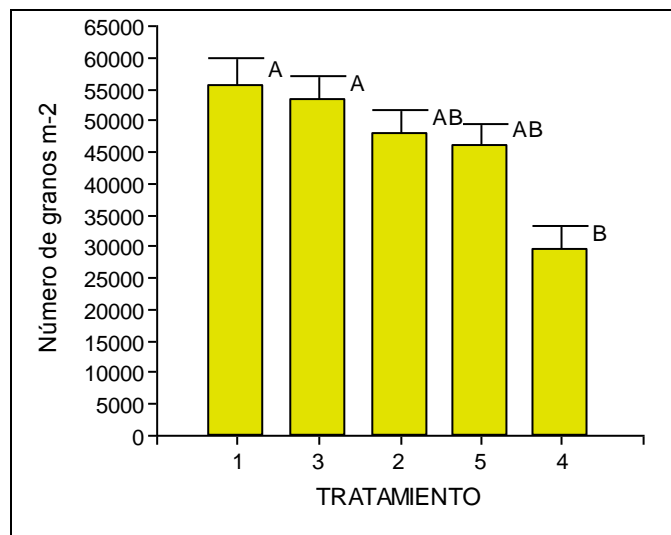


Figura No. 13 Número de granos m² para los tratamientos evaluados. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$: Tukey).

4.4.2 Peso de 100 granos

En la Figura No. 14 se presentan los valores de peso de grano en los diferentes tratamientos. En la misma se observa que no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, a diferencia de lo registrado en los trabajos realizados por Craufurd y Peacock (1993), Borrell et al. (2000), quienes comprobaron que el peso promedio de los granos disminuyó cuando las

deficiencias hídricas se presentaron en el llenado de grano. Estos resultados pueden ser explicados, porque durante los días anteriores al comienzo del llenado de grano ocurrieron PP, que no pudieron ser interceptadas mediante la metodología experimental utilizada. Por lo tanto, el periodo de llenado de grano comenzó con 100 % de AD en suelo, en el T3. De esta forma, a mitad de la etapa se presentaron las condiciones planeadas para dicho tratamiento (40 % AD o menos durante el llenado de grano), favoreciéndose positivamente el peso de grano.

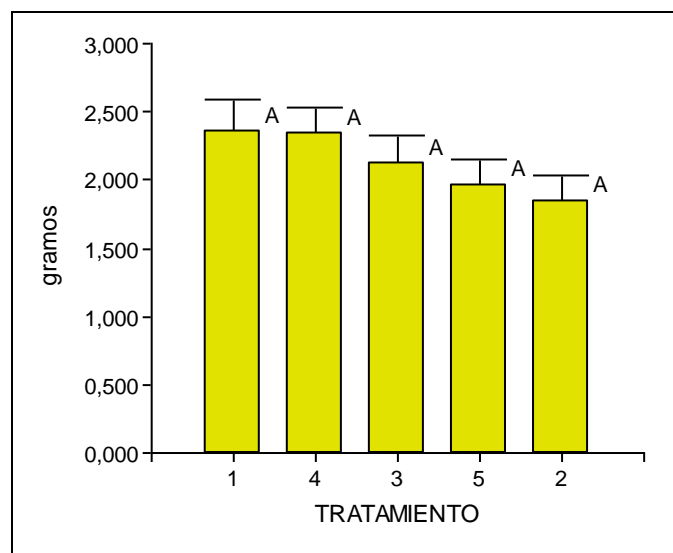


Figura No. 14 Peso (g) promedio de 100 granos en los tratamientos evaluados. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$: Tukey).

4.5 RELACIONES ENTRE EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES

En las Figuras No. 15 y 16, se pueden observar las relaciones del rendimiento en función del número de granos por superficie y el peso promedio de granos. En las mismas, se verifica lo reportado por Borrell et al. (2000), Díaz et al. (2010), Ghironi et al. (2010), quienes encontraron una alta correlación positiva entre el rendimiento y el número de granos por superficie, con coeficientes de correlación r^2 de 0,77, 0,58 y 0,96 respectivamente, sin mostrar correlación con el peso de los mismos.

Como se vio en los apartados anteriores, el peso de los granos no varió significativamente, mientras que el rendimiento sí presentó diferencias entre

tratamientos. Esto explica que la relación encontrada entre el componente peso de los granos y el rendimiento haya sido baja ($r^2=0,09$).

Las condiciones para el crecimiento durante el llenado de grano tuvieron un efecto menor sobre el rendimiento. Éstas no lograron que la planta compensara un bajo número de granos, por medio de un aumento en el peso de los mismos. No obstante, dichas condiciones tampoco fueron lo suficientemente deficitarias como para que las pérdidas de rendimiento fueran de una magnitud tal como la provocada por deficiencias hídricas durante la etapa entorno a la floración.

Por otra parte, el entorno a la floración fue la etapa en que las deficiencias hídricas afectaron mayoritariamente el rendimiento. Durante dicha etapa, se genera el número de granos total, por lo tanto, éste componente fue el que más correlacionó con el rendimiento ($r^2=0,76$).

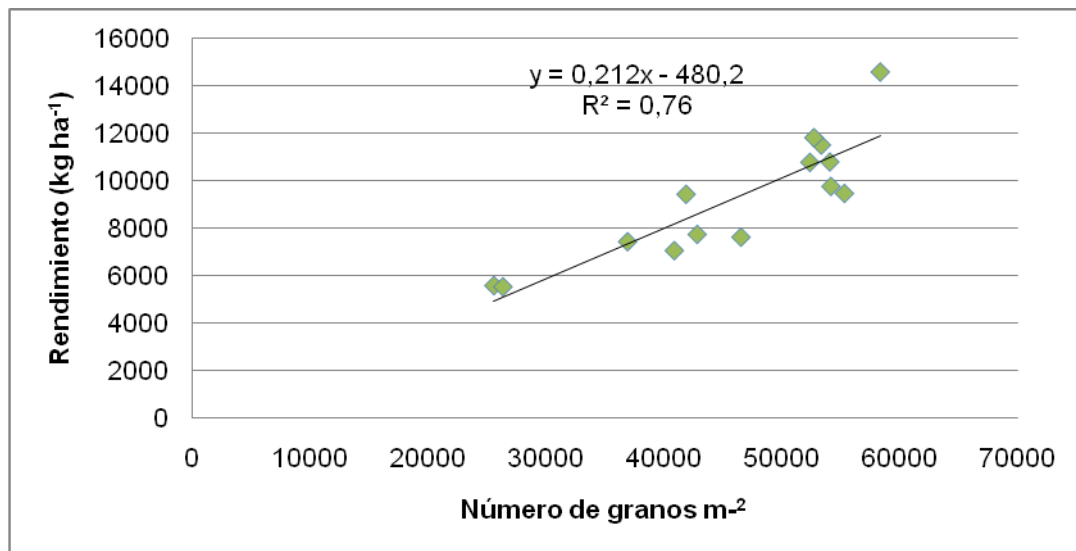


Figura No. 15 Rendimiento en función del número de granos m^{-2} .

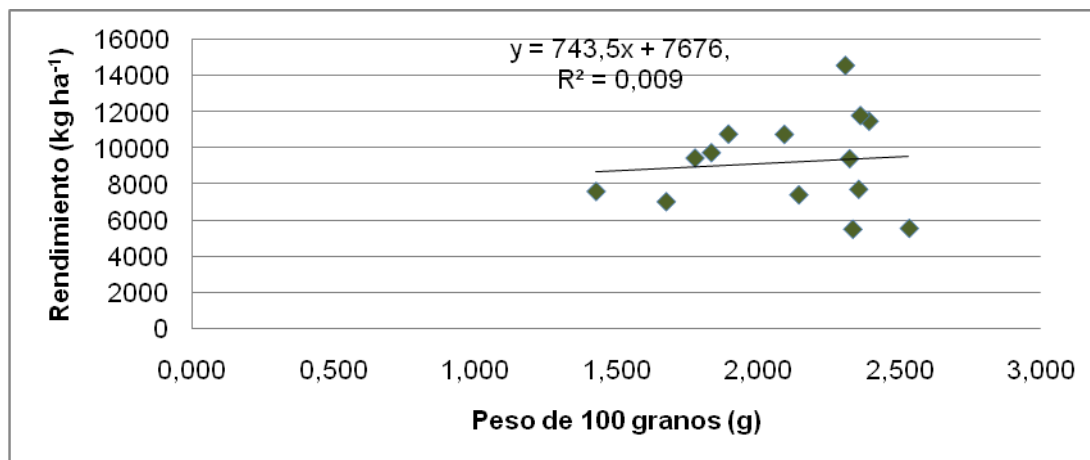


Figura No. 16 Rendimiento en función del peso de 100 granos (g).

4.6 EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SOBRE EL IC

En la Figura No. 17 se presentan los IC en función de las diferentes disponibilidades hídricas. En la misma se observa que el IC fue significativamente menor en el T4 en relación al T1, tal como exponen Ferré y Faci (2006). Al mismo tiempo, se ratifica que con deficiencias hídricas moderadas no se modificó el IC significativamente.

En contraste con lo encontrado por Craufurd y Peacock (1993), Borrell et al. (2000), donde a mayor déficit hídrico el IC se incrementó, se constató que en el T4 el IC fue menor que en el T1. Esto se debió a que el déficit hídrico durante la etapa anterior el PC, generó un estrés en las plantas que determinó menores tamaños potenciales de panoja. Este efecto sumado al estrés sufrido durante la etapa entorno a la floración, provocó una merma en el rendimiento proporcionalmente mayor a la disminución ocurrida en la MS total.

El déficit hídrico generado en el T2, no provocó diferencias significativas en el IC respecto a los demás tratamientos, a diferencia de lo que encontraron Craufurd y Peacock (1993). No obstante, se observó una tendencia a presentar IC menores, en particular cuando se lo comparó con el T1.

Dado que el IC no se redujo en forma significativa, a excepción de cuando las deficiencias hídricas fueron más severas, se demuestra que la producción de grano en el sorgo está altamente correlacionada con la

producción de MS. Por lo tanto, ante deficiencias hídricas moderadas todos los componentes de la planta se ven afectados en una proporción similar, manteniéndose el IC poco variable.

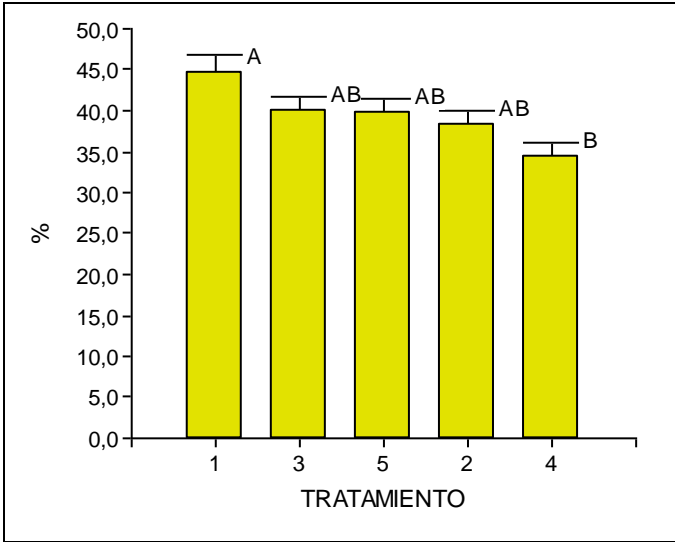


Figura No. 17 Índice de Cosecha en los diferentes tratamientos evaluados. Valores seguidos de igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$: Tukey).

5. CONCLUSIONES

El año agrícola 2011/12 se caracterizó por presentar PP mensuales por debajo del promedio histórico para los meses de diciembre y enero, durante los cuales el sorgo en el experimento desarrolló las etapas vegetativas y la floración. A su vez, las PP del mes de febrero (410 mm) fueron superiores a las de la serie histórica, momento en que el cultivo se encontraba en la etapa de llenado de grano. Estas condiciones de escasas PP en los meses de diciembre y enero, provocaron que los niveles de radiación solar incidente fueran mayores a los niveles promedios, e igual en el mes de febrero por la ocurrencia de elevadas lluvias.

El rendimiento alcanzado por el cultivo de sorgo sin restricciones hídricas, que fuera evaluado en el T1, fue de 13148 kg ha⁻¹.

En lo que respecta a los efectos de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento, se encontró que éstos fueron mayores durante la etapa entorno a la floración. Las pérdidas de rendimiento más importantes se produjeron en el tratamiento con deficiencias en etapa vegetativa y PC (T4), en el cual hubo una disminución del 53 % en relación al logrado en el tratamiento sin restricciones hídricas (T1). Las disminuciones del rendimiento producidas en el tratamiento con deficiencias hídricas en PC (T2) en relación al T1, fueron de 33 %. Por otra parte, las deficiencias hídricas provocadas durante el llenado de grano y evaluadas en el T3, no tuvieron un efecto tan importante en el rendimiento y alcanzaron al 16 % de disminución en relación al logrado en el T1.

Durante la etapa vegetativa los tratamientos no presentaron diferencias estadísticas en la producción de MS. Sin embargo, sí se produjeron diferencias durante el entorno a la floración y el llenado de grano. En este sentido, el tratamiento con deficiencias en etapa vegetativa y PC (T4) fue significativamente inferior al tratamiento sin deficiencias hídricas (T1) al terminar el PC y al momento de la cosecha. La producción de MS aérea a cosecha se correlacionó alta y positivamente con el rendimiento en grano ($r^2=0,91$).

Con relación a los componentes del rendimiento, el número de granos por superficie se vio afectado en forma significativa únicamente en el tratamiento con deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC (T4). No se

produjeron diferencias entre tratamientos, en el peso promedio de grano. No obstante, se encontró una alta correlación positiva entre el número de granos por superficie y el rendimiento ($r^2=0,76$), no siendo así entre el peso de grano y el rendimiento ($r^2=0,09$).

En relación al IC, solo se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento sin deficiencias hídricas (T1) y el tratamiento con deficiencias en etapa vegetativa y PC (T4). De esta manera, se comprobó que el IC es poco variable en sorgo, con la excepción de los casos en que las deficiencias hídricas sean severas, determinándose una disminución en el mismo.

6. RESUMEN

En la primavera y verano del año 2011-12 en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC), Paysandú, Uruguay, se llevó a cabo un experimento para cuantificar las pérdidas en rendimiento ocasionadas por deficiencias hídricas en distintas etapas del ciclo del sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Monch). Para ello se realizaron cinco tratamientos: T1=sin deficiencias hídricas en todo el ciclo, T testigo; T2= deficiencias hídricas durante PC; T3= deficiencias hídricas durante el llenado de grano; T4= deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC; y T5= secano. La metodología utilizada para generar las condiciones hídricas planteadas en cada tratamiento consistió en el uso de simuladores de sequía móviles y riego suplementario. Las variables evaluadas fueron MS, rendimiento, número de granos por superficie, peso de 100 granos e IC. El diseño utilizado fue en bloques completos al azar con tres repeticiones y cinco tratamientos. Se realizaron análisis de varianza y prueba de comparación múltiple Tukey (0,05) para evaluar las diferencias entre tratamientos. Los resultados obtenidos indican que la producción de MS a inicios de llenado de grano y cosecha fue significativamente inferior en el T4, en relación al T1. El rendimiento fue significativamente inferior en el T2, T5 y T4 (8,8 t ha⁻¹, 8,2 t ha⁻¹ y 6,2 t ha⁻¹ respectivamente) con respecto al T1 (13,1 t ha⁻¹). En relación al número de granos por superficie, el T4 fue significativamente inferior al T1, mientras que en el peso de grano no se encontró diferencias entre tratamientos. En cuanto al IC se encontró que las deficiencias hídricas severas, como las generadas en el T4, generaron disminuciones de consideración en el mismo. Los resultados demuestran que el cultivo de sorgo sin restricciones hídricas genera altos rendimientos como consecuencia de una alta producción de MS y un elevado valor de número de granos.

Palabras clave: Sorgo granífero; Deficiencias hídricas; Riego; Agua.

7. SUMMARY

In the spring and summer of 2011-12 at the Experimental Station Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC), Paysandu, Uruguay, was carried out an experiment to quantify yield losses caused by water deficiency in different stages of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Monch). For this there were five treatments: T1 = no water deficiencies throughout the cycle, T witness; T2 = water deficiencies in PC, T3 = water deficiencies during grain filling, T4 = water deficiencies in vegetative stage and PC, and T5 = rainfed. The methodology used to generate the water conditions raised in each treatment consisted of the use of mobile drought simulators and supplementary irrigation. The variables evaluated were MS, yield, number of grains per surface, weight of 100 grains and IC. The design used was randomized complete block with three replications and five treatments. Variance analysis was performed and Tukey's multiple comparison test (0.05) to evaluate differences between treatments. The results indicate that the production of MS in early grain filling and harvest was significantly lower in T4 compared to T1. The yield was significantly lower in the T2, T5 and T4 (8.8 t ha⁻¹, 8.2 t ha⁻¹ and 6.2 t ha⁻¹, respectively) compared to T1 (13.1 t ha⁻¹). In relation to the number of grains per surface, the T4 was significantly lower than T1, whereas grain weight was not different between treatments. Regarding the IC was found that severe water deficiencies, such as those generated in the T4, resulted in significant decreases in IC. The results show that sorghum optimal water generates high yields as a result of high production of MS and high grain number value.

Keywords: Sorghum; Water deficiency; Irrigation; Water.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ALI, M.A.; NIAZ, S.; ABBAS, A.; SABIR, W.; JABRAN, K. 2009a. Genetic diversity and assessment of drought tolerant sorghum landraces based on morph-physiological traits at different growth stages. *Plant Omics Journal*. 2(5): 214-227.
2. _____.; ABBAS, A.; NIAZ, S.; ZULKIFFAL, M.; ALI, S. 2009b. Morpho-physiological criteria for drought tolerance in sorghum (*sorghum bicolor*) at seedling and post-anthesis stages. *International Journal of Agriculture and Biology*. 11(6): 674-680.
3. ALCOZ, M.M.; SHABLICO, D.B.; SOBRAL, L.M. 1988. Factores de manejo que afectan la productividad potencial del sorgo granífero en el Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 106 p.
4. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration; guidelines for computing crop water requirements. Roma, FAO 300 p. (Irrigations and Drainage. Paper 56).
5. ANDRADE, F.H.; SADRAS, V.O. 2002. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarce, INTA. 450 p.
6. ANTELO, J.F.; MERMOT, C.A. 1988. Efecto de la densidad y la distribución en el cultivo de sorgo granífero. Tesis. Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.
7. ARKIN, G.F.; VANDERLIP, R.L.; RITCHIE, J.T. 1976. A dynamic grain sorghum growth model. *Transactions of ASAE* .19 (4): 622-626.
8. BATTISTA, J.J.; ALALUF, A.C; ARIAS, N.M.; CASTELLÁ, M. 2010. Efecto del nitrógeno sobre el crecimiento y rendimiento de sorgo granífero *Sorghum bicolor (L.) Moench*. In: Congreso Nacional de Maíz y Simposio Nacional de Sorgo (9º, 2010, Rosario, Argentina). Trabajos presentados y resumen de conferencias. s.n.t. pp. 408-410.
9. BENNETT, W.F.; TUCKER, B. 1986. Producción moderna de sorgo granífero. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 127 p.

10. BENTANCOR, E.; BENTANCOR, P. 2010. Respuesta a la población de dos híbridos de sorgo granífero. Tesis. Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 101 p.
11. BENTRANO, J.; RONCO, M.G.; MONTALDI, E.R. 1999. Drought stress síndrome in wheat is provoked by ethylene evolution imbalance and reversed by rewatering, Aminoethoxyvinglycine, or sodium benzoate. *Journal of Plant Growth Regulation*. 18:59-64.
12. BERTTEA, D.; ORTIZ, D. 2010. Efecto de la densidad de siembra sobre procesos de compensación y rendimiento en genotipo de sorgo granífero. In: Congreso Nacional de Maíz y Simposio Nacional de Sorgo (9º, 2010, Rosario, Argentina). Trabajos presentados y resumen de conferencias. s.n.t. pp. 397-398.
13. BORRELL, A.K.; HAMMER, G.L; HENZELL, R.G. 2000. Does maintaining green leaf area in sorghum improve yield under drought? II Dry matter production and yield. *Crop Science*. 40 (4): 1037-1048.
14. CARRASCO, P. s.f. Sorgo granífero. Paysandú, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Mario A. Cassinoni. 156 p.
15. _____. 1989. Potencial de producción de sorgo granífero en el litoral Norte. Manejo de la densidad y distribución en sorgo granífero para la obtención de altos rendimientos. Facultad de Agronomía (Montevideo). Serie Documentos no. 1. 78 p.
16. COMITÉ INTERGUBERNAMENTAL COORDINADOR DE LOS PAÍSES DE LA CUENCA DEL PLATA (CIC). 2004. Preparación de la visión para el desarrollo sustentable de la cuenca y su relación con los recursos hídricos. (en línea). s.n.t. 91 p. Consultado 16 feb. 2012. Disponible en http://www.cicplata.org/marco/pdf/vision_3a/uruguay/vision_uruguay.pdf
17. CRAUFURD, P.Q.; PEACOCK, J.M. 1993. Effect of heat and drought stress on sorghum (*Sorghum bicolor*). II. Grain Yield. *Explo Agriculture*. 29: 77-86.
18. CUBERO, J.I. 2003. Introducción a la mejora genética vegetal. (en línea). Madrid, Arte Gráfico Cuesta. 533 p. Consultado 27 feb. 2013.

Disponible en

http://books.google.com.uy/books?id=R7BbEm3uQ2kC&pg=PA453&dq=indice+de+cosecha&hl=en&sa=X&ei=s_wtUb3LLanl0QH0qoDQCw&ved=0CCoQ6AEwAA#v=onepage&q=indice%20de%20cosecha&f=false

19. DÍAZ, M.G.; KUTTEL, W.; LÓPEZ, R. 2010. Rendimiento y componentes numéricos de híbridos de sorgo granífero en el centro oeste de la Provincia de Entre Ríos. *In*: Congreso Nacional de Maíz y Simposio Nacional de Sorgo (9º, 2010, Rosario, Argentina). Trabajos presentados y resumen de conferencias. s.n.t. pp. 417-419.
20. ERNST, O. s.f. Sorgo granífero en sistemas de producción sin laboreo. s.n.t. 6 p.
21. FARRÉ, I.; FACI, J.M.; 2006. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 83. 135-143.
22. GHIRONI, E.; CORRÓ MOLAS, A.; ÁLVAREZ, C. 2010. Ajustes de densidades en el cultivo de sorgo en diferentes ambientes de la región semiárida Pampeana central. *In*: Congreso Nacional de Maíz y Simposio Nacional de Sorgo (9º, 2010, Rosario, Argentina). Trabajos presentados y resumen de conferencias. s.n.t. pp. 425-427.
23. GHISELLINI, N.L.P.; HOLTZ, I.W. 1985. Alternativas de manejo en el cultivo de sorgo granífero. Tesis. Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 109 p.
24. GIMÉNEZ, L.; GARCÍA PETILLO, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia*. 15 (2): 100-108.
25. GIRMA, F.S.; KRIEG, D.R. 1992. Osmotic adjustment in sorghum. I. Mechanisms of diurnal osmotic potential changes. *Plant Physiology*. (99): 577-582.

26. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA (INIA).GRUPO AGROCLIMA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN (GRAS). s.f. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 12 mar. 2013. Disponible en http://www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara_agro/
27. LEWIS, R.B.; HILER, E.A.; JORDAN, W.R. 1974. Susceptibility of grain sorghum to water déficit at three growth stages. *Agronomy Journal*. 66: 589-591.
28. LUDLOW, M.M.; SANTAMARIA, J.M.; FUKAI, S. 1990. Contribution of osmotic adjustment to grain yield in *Sorghum bicolor* (L.) Moench under water-limited conditions. II. Water stress after anthesis. *Australian Journal Research*. (41): 67-78.
29. MEDINA, G.; OLIVERA, B. 2012. Respuesta a la población en sorgo en ambientes con diferente potencial de producción. Tesis. Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 55 p.
30. MOLFINO, J.H.; CALIFRA, A. 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay; segunda aproximación. (en línea). Montevideo, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. División Suelos y Agua. s.p. Consultado 7 ene. 2013. Disponible en <http://www.cebra.com.uy/renare>
31. ORTIZ, D. 2010. Bases eco-fisiológicas para la producción de sorgo granífero. In: Congreso Nacional de Maíz y Simposio Nacional de Sorgo (9º, 2010, Rosario, Argentina). Trabajos presentados y resumen de conferencias. s.n.t. pp. 390-391.
32. PEITER, M.X.; CARLESSO, R. 1996. Comportamento do sorgo granífero em função de diferentes frações da água disponível no solo. *Ciência Rural*. 26 (1): 51-55.
33. _____.; _____.; PETRY, M.T.; WOSCHICK, D. 1997. Respuesta do sorgo granífero a déficits hídricos aplicados durante o ciclo de desenvolvimento da cultura. *Ciência Rural*. 27 (2): 211-215.

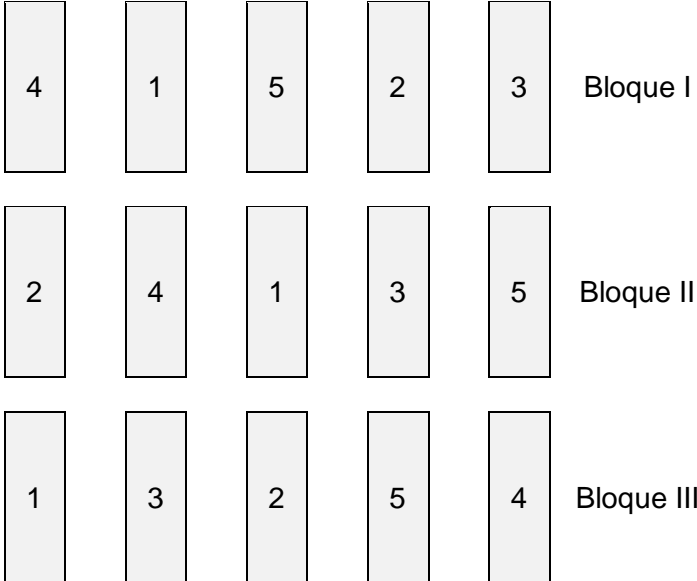
34. PEREZ, A.; SAUCEDO, O.; IGLESIAS, J.; WENCOME, H.B.; REYES, F.; OQUENDO, G. 2010. Caracterización y potencialidad del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Pastos y Forrajes*. 33 (1): 1-26.
35. SAINÉ, A.L.; MASIERO, B.; DE ELÍA, A.; FERESIN, O.J.; GIORDA, L.M. 2010. Efecto de la densidad y espaciado sobre la productividad de cultivares de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] en la región central de Córdoba, Argentina. In: Congreso Nacional de Maíz y Simposio Nacional de Sorgo (9º, 2010, Rosario, Argentina). Trabajos presentados y resumen de conferencias. s.n.t. pp. 437-438.
36. SCHAFFNER, V.; SPRUNCK, M. 2009. Respuesta a la población en sorgo granífero de segunda zona sur. Tesis. Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 83 p.
37. SINGH, B.R.; SINGH, D.P. 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum maize and pearl millet to irrigation. *Field Crops Research*. (42): 57–67.
38. SIRI, G. 2004. Sorgo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 96 p.
39. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. OPYPA. 2012. Anuario 2012. Montevideo. 404 p.
40. WILD, A. 1989. Condiciones de suelo y desarrollo de las plantas según Russell. (en línea). Londres, Eleventh. 1024 p. Consultado 27 feb. 2013. Disponible en <http://books.google.com.uy/books?id=gE6x5iluhGYC&pg=PA55&dq=indice+de+cosecha&hl=en&sa=X&ei=XgAuUfq7Elqx0AG3uoHqDQ&ved=0CEEQ6AEwBA#v=onepage&q=indice%20de%20cosecha&f=false>
41. WRIGHT, G.C.; SMITH, C.G. 1983. Differences between two grain sorghum genotypes in adaptation to drought stress. II. Root water uptake and water use. *Australian Journal Research*. (34): 627–636.
42. ZAONGO, C.G.L.; WENDT, C.W.; LASCANO, R.J.; JUO, A.S.R. 1997. Interactions of water, mulch and nitrogen on sorghum in Niger. *Plant and Soil*. 197: 119-126.

9. ANEXOS

Anexo No. 1: Bloque de sorgo, donde se observan los simuladores de sequía que se utilizaron para generar el déficit hídrico provocado en los diferentes tratamientos.



Anexo No. 2: Croquis del campo experimental



Anexo No. 3: ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS CAUSADAS POR PÁJAROS

Para que los valores de los rendimientos estuvieran lo menos afectados posibles por factores ajenos a las condiciones hídricas de cada tratamiento, se intentó estimar las pérdidas causadas por el daño que generaron los pájaros al comer los granos de las panojas. Para esto se usaron panojas sin daños por pájaros y se cortaron en secciones a distintas longitudes desde la punta hacia la base de la panoja. A cada sección de panoja cortada con tijera de podar, se le conto la cantidad total de granos y el peso de los mismos, de forma de obtener una relación entre la longitud de la panoja, desde el ápice a la base, con la cantidad o el peso de granos.

Dado que, el tamaño de las panojas variaba significativamente por efecto de los distintos factores de producción que afectaron el crecimiento, fue necesario tomar porcentajes de longitud comida, porcentajes de granos y porcentaje de peso de granos comidos. Es por esto que se enfrentaron en un Excel los datos de porcentaje comidos en longitud, con los porcentajes comidos en números de granos y peso de los mismos.

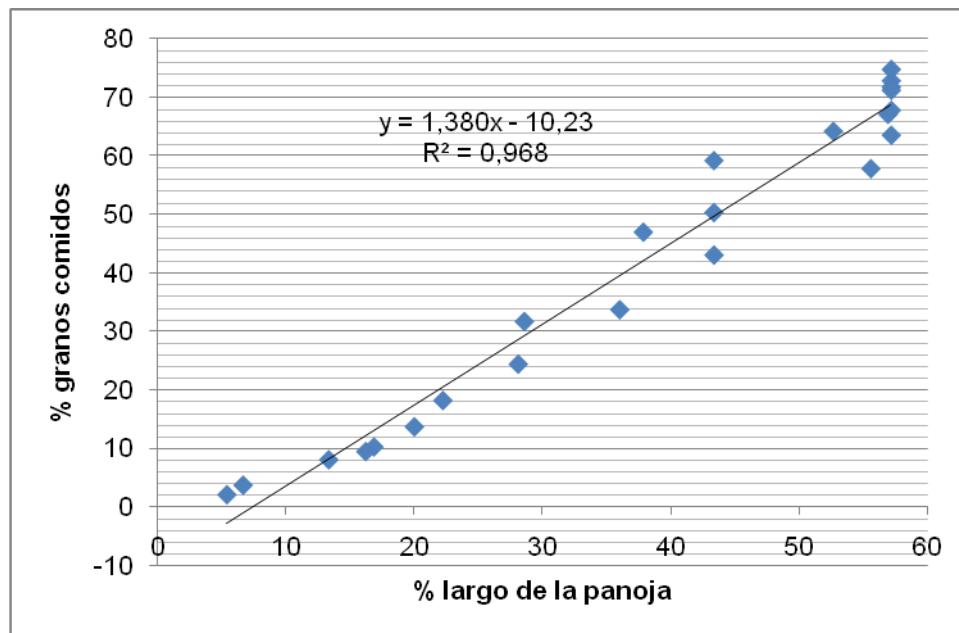
Al observarse la relación existente entre los parámetros a usar, se decidió tomar el número de granos y no el peso, verificándose que la relación es mayor entre la primera y la longitud de la panoja comida.

A continuación se muestran los datos que se obtuvieron de cortar las panojas enteras:

% longitud comida	% granos comidos
57,14286	72,77125
57,14286	74,70449
57,14286	63,48155
57,14286	71,70022
57,14286	71,13594
57,14286	67,71753
56,88889	67,03563
55,55556	57,76173
52,63158	64,14068

28,08989	24,36137
43,33333	50,2693
43,33333	59,13979
43,33333	42,99666
28,57143	31,65196
22,22222	18,15981
16,85393	10,21807
20,00000	13,65473
36,00000	33,66051
37,83784	46,90873
16,21622	9,421001
5,405405	2,060844
13,33333	8,034026
6,66667	3,6862

Porcentaje del número de granos comido en función del porcentaje de la longitud comida.



Con los datos analizados se obtiene la función $Y=1,3807x-10,23$, con $Y=$ % de granos comidos y $x=$ % de la longitud total de la panoja, que fue comida.

Anexo No. 4: ANAVA

Análisis de varianza y test de Tukey para Rendimiento

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rend. kg/ha	14	0,85	0,73	14,48

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	73272783,29	6	12212130,55	6,82	0,0116
BLOQUE	3844727,34	2	1922363,67	1,07	0,3920
TRATAMIENTO	69428055,96	4	17357013,99	9,69	0,0055
Error	12533467,45	7	1790495,35		
Total	85806250,75	13			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=4070,91451

Error: 1790495,3505 gl: 7

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.			
1	13148,65	2	984,81	A		
3	11047,54	3	772,55	A	B	
2	8858,80	3	772,55		B	C
5	8203,02	3	772,55		B	C
4	6195,87	3	772,55			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

Análisis de varianza y test de Tukey para Número de granos

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
No de granos/m ²	14	0,81	0,64	13,80

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1168996818,63	6	194832803,11	4,87	0,0284
BLOQUE	35522424,59	2	17761212,30	0,44	0,6582
TRATAMIENTO	1133474394,04	4	283368598,51	7,09	0,0132
Error	279874002,68	7	39982000,38		
Total	1448870821,31	13			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=19237,01318

Error: 39982000,3831 gl: 7

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
1	55341,58	2	4653,70	A	
3	53278,01	3	3650,66	A	
2	47919,91	3	3650,66	A	B
5	45970,07	3	3650,66	A	B
4	29631,64	3	3650,66		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

Análisis de varianza y test de Tukey para peso de 100 granos

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso de 100 granos	14	0,44	0,00	15,98

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,61	6	0,10	0,91	0,5398
BLOQUE	0,07	2	0,03	0,30	0,7519
TRATAMIENTO	0,55	4	0,14	1,21	0,3861
Error	0,79	7	0,11		
Total	1,41	13			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1,02285

Error: 0,1130 gl: 7

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
1	2,35	2	0,25
4	2,34	3	0,19
3	2,13	3	0,19
5	1,96	3	0,19
2	1,84	3	0,19

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

Análisis de varianza y test de Tukey para IC

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
IC	14	0,71	0,45	7,32

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	136,48	6	22,75	2,79	0,1026
BLOQUE	8,72	2	4,36	0,54	0,6078
TRATAMIENTO	127,77	4	31,94	3,92	0,0558
Error	57,02	7	8,15		
Total	193,51	13			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=8,68332

Error: 8,1463 gl: 7

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
1	44,70	2	2,10 A
3	40,04	3	1,65 A B
5	39,86	3	1,65 A B
2	38,28	3	1,65 A B
4	34,50	3	1,65 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)