

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**RESPUESTA DEL CULTIVO DE SORGO FORRAJERO AL RIEGO Y AL
NITRÓGENO**

por

Marcos ALGORTA ANTÍA

Juan Martín LEÁNIZ RUETE

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2014

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Jorge Sawchik

Ing. Agr. Claudio García

Ing. Agr. Mario García Petillo

Fecha:

17 de marzo de 2014

Autor:

Marcos Algorta Antía

Juan Martín Leániz Ruete

AGRADECIMIENTOS

A nuestra familia, por su confianza y constante estímulo durante nuestra formación agronómica y a Sabrina por su apoyo incondicional.

A Mario, Claudio, Jorge y al personal de INIA La Estanzuela e INIA Las Brujas por su dedicación y buena voluntad para llevar a cabo el trabajo.

Al personal de biblioteca por su cordial atención, en especial a Sully Toledo, encargada de la presentación formal de este documento.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VII
I. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
II. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
A. ECOFISIOLOGÍA Y ADAPTACIÓN.....	3
1. <u>Tasa de crecimiento y estado fenológico del cultivo</u>	3
2. <u>Radiación</u>	8
B. TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN	9
1. <u>Nutrientes</u>	9
2. <u>Rendimiento y efecto de época de siembra</u>	10
3. <u>Influencia de las malezas</u>	11
C. AGUA. RESPONSABLE DEL RENDIMIENTO	13
1. <u>Contenido del agua en el suelo</u>	13
2. <u>Capacidad de campo (CC)</u>	13
3. <u>Punto de marchitez permanente (PMP)</u>	13
4. <u>Agua disponible (AD)</u>	13
5. <u>Requerimientos hídricos</u>	14
6. <u>Demanda de agua según el estado de crecimiento. Enfoque del coeficiente del cultivo en condiciones no estándar</u>	15
7. <u>Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar</u>	17
a. Coeficiente de estrés hídrico (ks.)	18
D. NITRÓGENO RESPONSABLE DEL RENDIMIENTO	19
1. <u>Función del N en la planta</u>	19
2. <u>Absorción y translocación del N</u>	20

3. <u>Pérdidas de N</u>	21
a. Pérdida de NH^{+4} por volatilización.....	21
b. Pérdida de NO^{-3} por lixiviación	22
c. Pérdida de NO^{-3} por desnitrificación.....	22
4. <u>Respuesta en el crecimiento del sorgo forrajero</u>	22
5. <u>Eficiencia de utilización del nitrógeno</u>	23
6. <u>Momento de aplicación de N</u>	24
7. <u>Concentración de N en planta</u>	24
E. EFECTO DEL SORGO SOBRE EL SUELO	25
III. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	26
A. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL	26
B. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	28
C. PROCEDIMIENTO A CAMPO	30
1. <u>Manejo del riego</u>	30
2. <u>Manejo de nitrógeno</u>	31
D. DETERMINACIONES REALIZADAS	32
1. <u>Previo a la instalación del experimento</u>	32
2. <u>Durante el experimento</u>	34
IV. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	36
A. CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	36
B. CORTE DE LIMPIEZA	39
C. RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN DE N	40
1. <u>Respuesta en producción de materia seca</u>	40
2. <u>Respuesta en altura de planta</u>	43
3. <u>Respuesta en porcentaje de materia seca</u>	44
4. <u>Respuesta en porcentaje de nitrógeno en planta</u>	45
D. RESPUESTA AL RIEGO.....	47
1. <u>Respuesta en producción de MS</u>	47

2. <u>Respuesta en altura de planta</u>	50
3. <u>Respuesta en porcentaje de materia seca</u>	51
4. <u>Respuesta en porcentaje de nitrógeno en planta</u>	52
E. RESPUESTA A LA CALIDAD DE FORRAJE	54
F. DINÁMICA DE N EN EL SUELO	55
1. <u>Concentración de N-NO₃ de 0-20 cm de profundidad</u>	56
2. <u>Concentración de N-NO₃ de 20-40 cm de profundidad</u>	57
3. <u>Concentración de N-NO₃ de 40-60 cm de profundidad</u>	58
4. <u>Concentración de N-NO₃ en todo el perfil estudiado</u>	59
F. BALANCE HÍDRICO REAL	60
1. <u>Agua disponible en el perfil</u>	60
2. <u>Cálculo de kc</u>	61
3. <u>Cálculo del balance hídrico real</u>	62
V. <u>CONCLUSIONES</u>	64
VI. <u>RESUMEN</u>	65
VII. <u>SUMMARY</u>	67
VIII. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	69
IX. <u>ANEXOS</u>	72

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Requerimiento y extracción de nutrientes, en Kg, por tonelada de sorgo producida.	9
2. Unidades de N agregadas por ha.	28
3. Análisis de suelo previo a la instalación del experimento.	32
4. Resumen de las actividades realizadas.	35
5. Resultados del corte de limpieza.	39
6. Análisis de calidad de planta.	54
7. Parámetros hídricos del suelo.	60
8. Valores de kc para el sorgo forrajero de FAO Penman-Monteith.	61
Figura No.	
1. Definición de rendimiento.	7
2. Absorción acumulada de N y P durante el ciclo del cultivo de sorgo.	10
3. Efecto de la competencia sobre el rendimiento en grano de sorgo.	12
4. Coeficiente de estrés hídrico, K_s .	19
5. Croquis de grupos de suelo CONEAT.	27
6. Distribución de los tratamientos en el campo	29
Gráfico No.	
1. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada en función del tiempo.	33
2. Lluvias y riegos realizados durante el experimento.	37
3. Precipitaciones y Eto durante el experimento.	38

4. Eto y riegos realizados en el período de crecimiento del primer corte.	39
5. Producción de MS en función de la dosis de N aplicada según el tratamiento.	40
6. Tasa de crecimiento en función de la dosis de N aplicada según tratamiento.	41
7. Eficiencia de uso del nitrógeno en función de la dosis de nitrógeno aplicada.	42
8. Altura de planta en función de la dosis de nitrógeno aplicada.	43
9. Porcentaje de MS en función de la dosis de nitrógeno aplicada.	44
10. Porcentaje de N en planta en función de la dosis de nitrógeno aplicada.	45
11. N total absorbido en función de la dosis de nitrógeno aplicada.	46
12. Producción de MS según tratamiento de riego.	47
13. Tasa de crecimiento según tratamiento de riego.	48
14. Eficiencia de uso del agua según tratamiento de riego.	49
15. Altura de planta según tratamiento de riego.	50
16. Porcentaje de MS según tratamiento de riego.	51
17. Porcentaje de N en planta según tratamiento de riego.	52
18. Nitrógeno total absorbido según tratamiento de riego	53
19. Calidad de forraje en función de tratamiento.	55
20. Concentración de N-NO ₃ de 0-20 cm de profundidad en función de los tratamientos de riego y nitrógeno.	56
21. Concentración de N-NO ₃ de 20-40 cm de	

profundidad en función de los tratamientos de riego y nitrógeno.	57
22. Concentración de N-NO ₃ de 40-60 cm de profundidad en función de los tratamientos de riego y nitrógeno.	58
23. Concentración de N-NO ₃ en el perfil de suelo (0-60 cm de profundidad) en función de los tratamientos de riego y nitrógeno.	59
24. Curva del K _c del sorgo.	62
25. Balance hídrico real para los tres tratamientos de riego. Contenido de agua en el suelo en función de los días.	63

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de los precios de los commodities debido a la creciente demanda de los mismos tanto para consumo humano como para la producción de las energías renovables, sumado esto a un crecimiento de los costos de producción, lleva a los productores a plantearse cada vez más la intensificación del uso de los recursos. Es aquí donde del riego en sistemas como por ejemplo la producción de carne o leche juega un rol fundamental.

A pesar de que nuestro país presenta un régimen isohigro de precipitaciones, la demanda atmosférica en los meses del verano genera un balance hídrico negativo y consigo una disminución en el crecimiento de los cultivos y pasturas, provocando una deficiencia de alimento para los animales.

Las plantas necesitan para su crecimiento agua, luz y nutrientes. Dentro de estos últimos el nitrógeno es uno de los principales limitantes y el cual provoca una importante respuesta en el crecimiento de la planta. Por su dinámica biológica y su estrecha relación a las condiciones ambientales es importante poder evaluarlo en diferentes condiciones hídricas, para poder saber cuál es su eficiencia de uso y la repuesta en la planta.

El surgimiento de materiales genéticos de buena producción tanto de cantidad como de calidad, sumado a la utilización del riego con una fertilización adecuada generaría una solución al déficit de producción de alimento para el ganado.

El sorgo surge como alternativa forrajera verdadera dada sus características:

- Especie C4, característica que le otorga más eficiencia que las C3.

- Excelente en macollaje, teniendo por ello gran poder de compensación a pérdidas de población ante reiterados pastoreos o problemas a la siembra.
- Cultivares: tipo sudan, híbridos (sudan x graníferos) y graníferos que se adecuan a distintos sistemas de manejo.
- Su gran capacidad dada por diversos mecanismos, que le confieren mayor tolerancia a periodos de déficits hídricos.
- Su capacidad de aportar altos volúmenes de forraje ante un buen manejo y su no despreciable calidad.

Por lo antes mencionado el principal objetivo del trabajo es determinar cuál es la respuesta, medida como producción de materia seca de forraje en sorgo, con distintos niveles de nitrógeno interaccionando con distintas láminas de riego aplicada.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A. ECOFISIOLOGÍA Y ADAPTACIÓN

El sorgo es un cultivo adaptado a regiones de clima cálido y es particularmente considerado más resistente a las sequías comparado con el maíz.

Con relación a la época de siembra, por su origen, el sorgo es más exigente que el maíz en temperatura (18 a 20 °C en los primeros cm de suelo), la germinación depende de la temperatura y el agua en la cama de siembra.

En la región, las fechas de siembra recomendadas son a partir de la primer quincena de octubre hasta la segunda quincena de noviembre, generalmente se siembra en línea a razón de 300.000 y 600.000 semillas en la hectárea para sorgo granífero y forrajero, respectivamente¹.

1. Tasa de crecimiento y estado fenológico del cultivo

La escala fenológica de Vanderlip y Reeves (1972) propone diez estados que tienen en cuenta aspectos como la germinación, la aparición de hojas, el desarrollo de estructuras reproductivas y, por último, el crecimiento y desarrollo del grano. Estos estados pueden ser agrupados en tres fases de crecimiento (FC): FC1= desarrollo vegetativo, FC2= desarrollo de la panoja, FC3= llenado de grano. En general pueden pasar entre 30-35 días a través de cada uno de estas fases dependiendo del híbrido y de las condiciones ambientales. Los híbridos graníferos modernos son insensibles a la duración del día, siendo sus tasas de desarrollo principalmente conducidas por la temperatura (Giorda et al., 1997).

¹ Ernst, O. 2011. Com. personal.

A continuación se resumen los estados de desarrollo del cultivo de sorgo (Vanderlip, 1993):

- Estado 0 - Emergencia: Sucede cuando la planta atraviesa la superficie del suelo, lo que generalmente ocurre de 3 a 10 días después de la siembra. El tiempo requerido depende de la temperatura del suelo, las condiciones de humedad, la profundidad de siembra y el vigor de la semilla.
- Estado 1 - Estado de tres hojas: Una hoja se cuenta como desarrollada cuando su collar es visible, o sea el lugar donde la lámina y la vaina de la hoja se unen. El punto de crecimiento todavía se encuentra por debajo de la superficie del suelo. Este estado generalmente ocurre 10 días después de la emergencia.
- Estado 2 - Estado de cinco hojas: Aproximadamente tres semanas después de la emergencia una planta de sorgo tiene 5 hojas desarrolladas. Generalmente no es complicado identificar las 5 hojas, ya que la primera es redondeada y la segunda con punta. A partir de este estado se produce un incremento en la tasa de crecimiento del cultivo.
- Estado 3 - Diferenciación del ápice de crecimiento: Alrededor de 30 días después de que el sorgo emergió, su ápice de crecimiento cambia de vegetativo a reproductivo. El número total de hojas ha sido determinado y el tamaño de la panoja va a ser pronto determinado. Cerca de un tercio del área fotosintética ha sido totalmente desarrollada (7-10 hojas).
- Estado 4 - Hoja bandera visible: Siguiendo a la diferenciación del ápice de crecimiento, ocurren simultáneamente una rápida elongación del tallo y desarrollo de las hojas hasta que la hoja bandera es visible en el cogollo. Para

este momento todas las hojas a excepción de las últimas 3-4 están totalmente expandidas y cerca del 80% del área foliar está presente. La intercepción de luz se acerca al máximo, y el crecimiento y la toma de nutrientes continúan a una tasa rápida. La panoja se está desarrollando. Las 2-5 hojas inferiores se han perdido. Cualquier referencia debe realizarse desde arriba, contando la hoja bandera como 1.

- Estado 5 - Embuche: Todas las hojas están totalmente expandidas, proveyendo la máxima área foliar e intercepción de luz. La panoja se encuentra desarrollada y cerca de su tamaño final, encerrada dentro de la vaina de la hoja bandera. A excepción del pedúnculo, la elongación del tallo se encuentra completa. La elongación del pedúnculo está comenzando y va a resultar en la separación de la panoja de la vaina de la hoja bandera. El tamaño potencial de la panoja ha sido definido.

- Estado 6 - Floración: Después del estado de embuche el pedúnculo crece rápidamente extendiendo la panoja a través de la vaina de la hoja bandera (exención). La floración se encuentra definida cuando la mitad de las plantas se encuentran en algún estado de floración. Sin embargo, tomando una planta individualmente, la panoja florece desde el ápice hacía abajo por 4-9 días. La floración de una planta individual es cuando el florecimiento ha progresado hacia la mitad inferior de la panoja. Hacia este estado la mitad del total de la materia seca de la planta ha sido producida. El tiempo requerido desde la siembra hasta floración depende del ciclo del híbrido y de las condiciones ambientales, sin embargo representa cerca de dos tercios del tiempo desde la siembra hasta madurez fisiológica.

- Estado 7 - Grano pastoso: Entre la floración y grano pastoso, el grano se llena rápidamente, acumulando aproximadamente la mitad de su peso seco durante

este periodo. Previamente ha alcanzado su máximo volumen en el estado de grano lechoso, aproximadamente 10 días después de la floración. El peso del tallo se incrementa un poco después de la floración, porque el grano se está formando rápidamente, mientras que el tallo pierde peso. La pérdida de peso en el tallo puede ser del orden de 10% del peso del grano. Las hojas inferiores se siguen perdiendo, quedando remanentes 8-12 hojas funcionales.

- Estado 8 - Grano duro: Este estado ocurre cuando el grano no puede ser comprimido entre los dedos. Alrededor de tres cuartas partes del peso seco del grano se ha acumulado. El tallo ha alcanzado su peso mínimo. Durante este estado las plantas son más susceptibles al vuelco.

Se ha alcanzado el peso máximo de materia seca de la planta. La madurez fisiológica puede determinarse por la mancha negra que ocurre opuesta al embrión. El tiempo de floración a madurez fisiológica varía con el híbrido y las condiciones ambientales, sin embargo representa un tercio del tiempo total desde la siembra. El contenido de humedad del grano también es variable, pero generalmente se encuentra entre 25- 35% de su peso.

En la figura 1, se presenta la evolución de la tasa de crecimiento en producción de biomasa, en función de la edad de la planta en días pos-emergencia. La fase inicial, donde se construye y determina la producción foliar, va desde emergencia hasta iniciación floral (V5-V6 para nuestras condiciones). Este período es relativamente corto, y presenta tasas de crecimiento muy bajas. Estas últimas, determinan que durante el período (V5-V6) donde se define el máximo rendimiento por panoja (entre doble arruga y espiguilla terminal), período relativamente corto (10 días), la competencia entre plantas puede ser

muy baja. Por lo tanto, el rendimiento máximo de la planta se puede llegar a definir sin problemas.

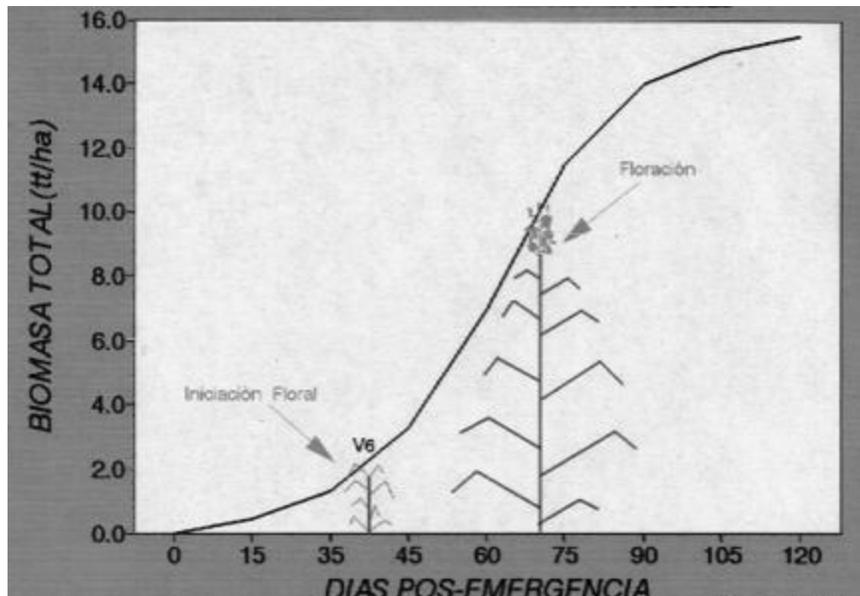


Figura 1. Definición de rendimiento (Ernst, 2011).

A partir de V5-V6 y hasta floración, ocurre la mayor tasa de crecimiento y producción de materia seca. Esta etapa es la más importante en definir el rendimiento ya que va a estar determinando el número de estructuras a llenar, es decir se está determinando el número de grano m^{-2} . Además es donde ocurre la mayor demanda del cultivo por los nutrientes, principalmente nitrógeno. Por lo cual es muy importante satisfacer esa demanda, ya que, según Echeverría y García (2005), cuando los requerimientos nutricionales no son satisfechos, se resiente el área foliar y la eficiencia fotosintética disminuyendo la tasa de crecimiento.

La etapa post-floración, conocida como período de llenado de grano, es de suma importancia para determinar el peso del grano. El 90% de la materia seca producida en esta fase termina en el grano. Pero el índice de cosecha del cultivo ronda los 50 % ya que es un balance entre el 90% durante el llenado de grano y el 10% que se deposita en el grano antes y durante la floración.

2. Radiación

La radiación es un factor importante en el cultivo de sorgo por dos razones: por la condición de especie C4 y por que el rendimiento en grano depende en última instancia de la fotosíntesis durante el llenado del grano.

En Uruguay existe la máxima radiación compatible con la agricultura de secano. Dicha radiación varía desde el este hacia el noroeste, explicado principalmente por la mayor nubosidad asociada a las masas de agua del océano atlántico. Pero como el sorgo responde en torno al 0.8-1 % de incremento por cada 1% de incremento en la radiación y la heliofanía relativa varía entre 3 y 5 puntos porcentuales, la variación máxima esperable en rendimiento por sembrar sorgo en cualquier parte del país ronda en un 3 a 5 % (Algorta y Carcabelos, 2007).

La adecuada capacidad del sorgo para captar la radiación puede ser explicada porque sus hojas tienen un arreglo opuesto con un bajo ángulo de inserción, características que se asocian a una mayor capacidad de captación de luz (Ayala y Sawchik, 1988).

B. TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN

1. Nutrientes

Para nuestras condiciones, la respuesta en el cultivo de sorgo es principalmente a la aplicación del nitrógeno seguido por el fósforo aunque nutrientes como potasio y azufre están siendo necesarios en sistemas erosionados y de continua extracción sin aporte de éstos².

Cuadro 1. Requerimientos y extracción de nutrientes por tonelada de MS de sorgo producido.

Kg tt ⁻¹				
	N	P	K	S
Requerimiento	30	4,4	20,8	3,7
Extracción	16,9	3,1	3,4	1,8

Fuente: IPNI (2007).

El efecto de estos nutrientes esta muy relacionado a la historia de la chacra y condicionado por el control de malezas y las características del año (Ernst y Siri, 2004).

La figura 2 muestra la acumulación de N y P a lo largo del ciclo del cultivo (Vanderlip, 1993). En los primeros 20 días la acumulación de nutrientes es baja, pero a partir del estado de cinco hojas (25-35 días), la demanda de N y P aumenta rápidamente. En floración el sorgo ha acumulado el 70% de N y el 60% de P, y cuando llega al estado de grano duro la acumulación de nutrientes prácticamente ha cesado. Conocer esta dinámica es importante para determinarlos momentos de aplicación de nutrientes.

² Hoffman, E. 2012. Com. personal.

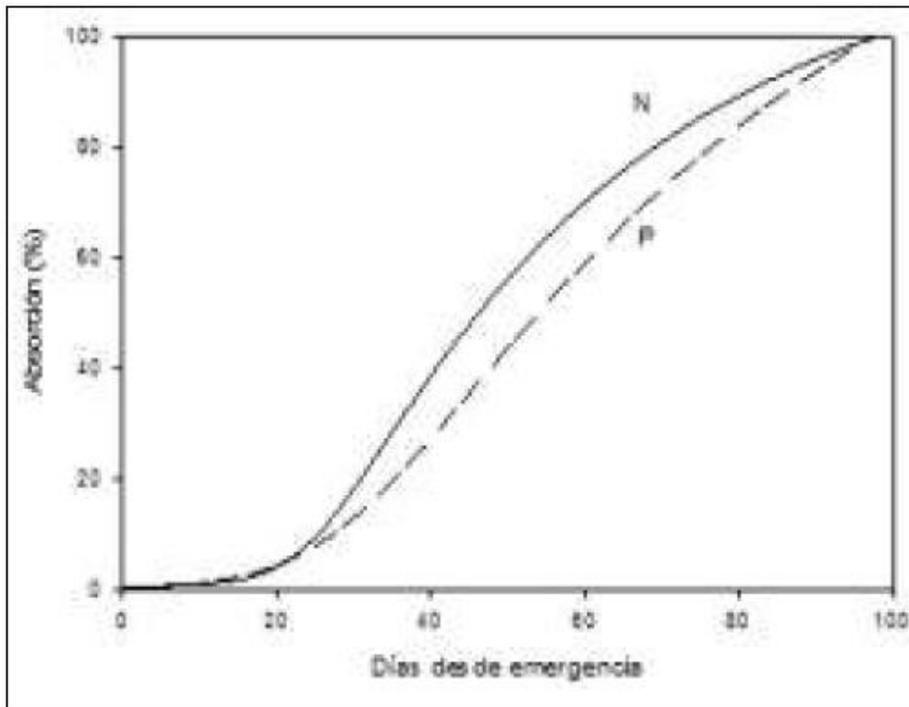


Figura 2. Absorción acumulada de N y P durante el ciclo del cultivo de sorgo (adaptado de Vanderlip, 1993).

2. Rendimiento y efecto época de siembra

Como antecedente se revisaron los rendimientos de los últimos 15 años (Fassio et al., 2002) tanto de los sorgos forrajeros (SF) como graníferos (SG), de distintos ensayos y ambientes con manejo similar, con el objetivo de encontrar los máximos y mínimos promedios, puntualizándose:

- El rendimiento total, en SF bajo manejo de cortes varió de 8 a 20 tt de MS por hectárea.
- El primer corte, para los mismos ensayos representa entre el 15 y 60 % de la MS total y varió de 1 a 6 tt de MS.
- El número de cortes realizados varió de 2 a 5.

- Los SG, ciclo medio, variaron de 3 a 10 tt de grano por hectárea.

Tratándose de rendimientos absolutos el ambiente juega un papel fundamental, dada la ya conocida variabilidad pluviométrica en cantidad y distribución en la región. Los máximos y mínimos difieren promedialmente un 300 % salvo el primer corte de los sorgos forrajeros en que la variación es mayor.

3. Influencia de las malezas

El sistema de malezas gramíneas y latifoliadas constituyen uno de los factores nocivos en los cultivos de sorgo, ocasionando pérdidas en rendimiento que oscilan entre un 30 a 70%, aumentando los gastos de manejo de los potreros destinados a producción y creando problemas en la rotación (Rodríguez et al., 2012).

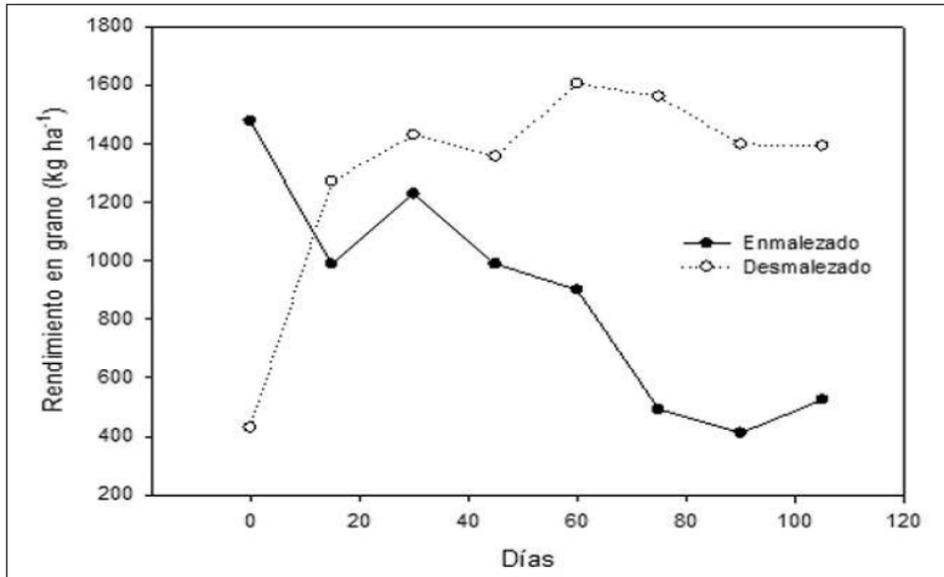


Figura 3. Efecto de la competencia sobre el rendimiento en grano de sorgo (Rodríguez et al., 2006).

En la Figura 3 se muestran distintas alternativas de manejo del sistema malezas y como ello se refleja en los rendimientos del cultivo. Si el cultivo se mantiene enmalezado los primeros 25-30 días desde su nacimiento (en relación a la presión del sistema de malezas) es previsible obtener rendimientos similares a los tratamientos sin malezas, siempre y cuando la intensidad de la intervención en ese momento sea eficaz en el control del sistema malezas. Cultivos enmalezados por períodos superiores a los 20-30 días pierden rendimiento en relación directa a la duración del período de enmalezado. Por otro lado el cultivo necesita para obtener rendimientos similares a los testigos limpios permanecer por lo menos sin malezas 30-40 días desde su nacimiento.

C. AGUA. RESPONSABLE DEL RENDIMIENTO

1. Contenido de agua en el suelo

El conocimiento del contenido de agua es fundamental para evaluar el estado hídrico de los cultivos y determinar los momentos óptimos de riego y su magnitud. Es la cantidad de agua expresada como porcentaje en base al peso seco del suelo, en base al volumen del suelo o como lámina en milímetros cada 10 cm de profundidad (García Petillo et al., 2010).

2. Capacidad de campo (CC)

Capacidad de agua máxima que el suelo puede retener, medida a las 48 horas después de una lluvia o riego (el contenido de agua continúa descendiendo a medida que pasa el tiempo pero más lentamente) (García Petillo et al., 2010).

3. Punto de marchitez permanente (PMP)

Es el contenido de agua retenida a una tensión de 15 Bar. Su valor depende del tipo de suelo. Este es el límite hasta el cual una planta de girasol puede extraer agua.

4. Agua disponible (AD)

Es el agua retenida entre CC y PMP. Es la máxima cantidad de agua que la planta puede disponer para su absorción en un determinado perfil. No toda el agua disponible es fácilmente disponible para las plantas.

5. Requerimientos hídricos

El factor más limitante para la producción de cultivos agrícolas en las regiones semiáridas es el agua. En el sorgo granífero existe una relación directamente proporcional entre el rendimiento en grano y la oferta de agua (Agua a la siembra + Precipitaciones), con una eficiencia en el uso del agua cercana a los 16 kg grano mm^{-1} (Stone y Schlegel, 2006). El sorgo, durante el periodo de su cultivo requiere un mínimo de 250 mm para producir grano; pueden obtenerse buenos rendimientos con 350 mm, pero para lograr una alta producción el requerimiento de agua varía entre 450 a 600 mm, dependiendo del ciclo del cultivar y de las condiciones ambientales (Giorda et al., 1997). Según Saeed y El-Nadi (1998), la eficiencia encontrada para el sorgo forrajero en una región semi-árida bajo riego fue entre 65-85 kgMS mm^{-1} .

Para Carrasco (2004), no basta con que las precipitaciones totales sean suficientes, ya que la distribución de las lluvias en la estación de crecimiento puede determinar que exista o no producción de grano a esos niveles de precipitación. Esto se explica teniendo en cuenta el consumo del cultivo en sus distintas etapas de desarrollo donde se observa que alrededor de la floración el consumo diario de agua se hace máximo (Carrasco, 2004). La mayor tasa de consumo de agua comienza en V5-6 haciéndose máxima en embuche y floración, decayendo en el llenado de grano y madurez hasta un mínimo en el momento de cosecha. Varios autores coinciden en que el embuche constituye el período máximo de consumo hídrico.

El sorgo presenta características fisiológicas y morfológicas muy importantes, lo cual hace de él un cultivo con buena respuesta a los problemas hídricos.

Su capacidad para comportarse como una especie tolerante al déficit hídrico está dado por:

- Sistema radicular eficiente, ya que presenta el doble de raíces en relación a la parte aérea.
- Presenta una capa de cera que recubre la parte aérea y, además, un elevado número de estomas de pequeño tamaño y en las nervaduras principales de las hojas se encuentran células motoras que le permiten enrollarse bajo condiciones adversas.
- Bajo condiciones adversas puede permanecer en estado latente durante cierto tiempo y reanudar el crecimiento cuando las condiciones vuelvan a ser favorables.

Pero por su característica de especie C4, el sorgo es capaz de responder al riego, tanto que el agua puede considerarse como principal limitante.

6. Demanda de agua según el estado de crecimiento. Enfoque del coeficiente de cultivo

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia, (ET_o) y el coeficiente del cultivo (K_c). La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de ET_o . Por lo tanto, mientras ET_o representa un indicador de la demanda climática, el valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas (Allen et al., 2006). A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el

área foliar varían progresivamente. Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de K_c correspondiente a un cultivo determinado, también variará a lo largo del periodo de crecimiento del mismo. Este periodo de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados de temporada y de final de temporada (Allen et al., 2006).

- Fase inicial: La etapa inicial está comprendida entre la fecha de siembra y el momento en que el cultivo alcanza el 10% de cobertura del suelo. Durante este periodo la evapotranspiración depende fundamentalmente de la evaporación del suelo, siendo el valor de K_c variable en función de la temperatura; y el tiempo y la magnitud de eventos de humedecimiento producidos por riego o precipitaciones. En el caso del sorgo se citan valores de $K_c = 0,4$ para este periodo, cuya duración es de aproximadamente 20 días.
- Fase de desarrollo del cultivo: La etapa de desarrollo del cultivo está comprendida desde el momento en que la cobertura de suelo es del 10% hasta alcanzarla cobertura completa efectiva. Para sorgo se citan valores de $K_c = 0,7-0,75$ para este período, cuya duración es de aproximadamente 35 días.
- Fase de mediados de temporada: La etapa de mediados de temporada comprende el periodo de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez, indicado por la senescencia de las hojas. Para sorgo se citan valores de $K_c = 1,10-1,20$ para este periodo, cuya duración es de aproximadamente 40 días. Este estado corresponde al comprendido entre embuche y grano pastoso, siendo el panojamiento y la floración las etapas más críticas (Giorda et al., 1997).

- Fase de fin de temporada: La etapa final o tardía decrecimiento comprende el periodo entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de K_c y ET_c finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas. Para sorgo se citan valores de $K_c = 0,55$ para este periodo, cuya duración es de aproximadamente 30 días.

7. Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar

En los casos donde las condiciones encontradas en el campo difieran de las condiciones estándar se requerirá de correcciones del valor de ET_c . Condiciones de baja fertilidad del suelo, toxicidad salina, suelos inundados, plagas, enfermedades y la presencia de horizontes duros o impenetrables en la zona radicular, pueden generar un crecimiento deficiente de la planta y una reducción de la evapotranspiración. Asimismo, condiciones de falta de agua y salinidad en el suelo pueden reducir la absorción del agua y limitar la evapotranspiración del cultivo (Allen et al., 2006).

Las fuerzas que actúan sobre el agua presente en el suelo disminuyen su energía potencial y la hacen menos disponible para su extracción por parte de las raíces de las plantas. Cuando el suelo se encuentra húmedo, el agua presente tiene una energía potencial alta, teniendo libertad de movimiento y pudiendo ser extraída fácilmente por las raíces de las plantas. En suelos secos el agua tiene una energía potencial baja, siendo retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que la hace menos extraíble por el cultivo (Allen et al., 2006).

Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que el cultivo se encuentra estresado. Los efectos del

estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico, K_s (Allen et al., 2006).

a. Coeficiente de estrés hídrico (k_s)

Los efectos del estrés hídrico sobre el valor la ET del cultivo se reflejan mediante la reducción del valor del coeficiente del cultivo. Esto se logra al multiplicar el valor del coeficiente del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico K_s (Allen et al., 2006).

El contenido de humedad en la zona radicular puede ser expresado en función del agotamiento de humedad en la zona radicular, D_r , es decir la cantidad de agua faltante con respecto a la capacidad de campo. En capacidad de campo, el agotamiento en la zona radicular es igual a cero ($D_r = 0$). Cuando se produce la extracción del agua a través de la evapotranspiración, aumentará el agotamiento de humedad y se iniciarán las situaciones de estrés cuando el valor de D_r sea igual a AFA. Después de que el agotamiento en la zona radicular exceda a AFA (o sea, el contenido de agua es menor al valor umbral θ_t), el agotamiento del agua será lo suficientemente alto como para limitar la evapotranspiración a valores menores que su potencial, por lo que la evapotranspiración del cultivo comenzará a disminuir en proporción a la cantidad de agua remanente en la zona radicular (Figura 4, Allen et al., 2006).

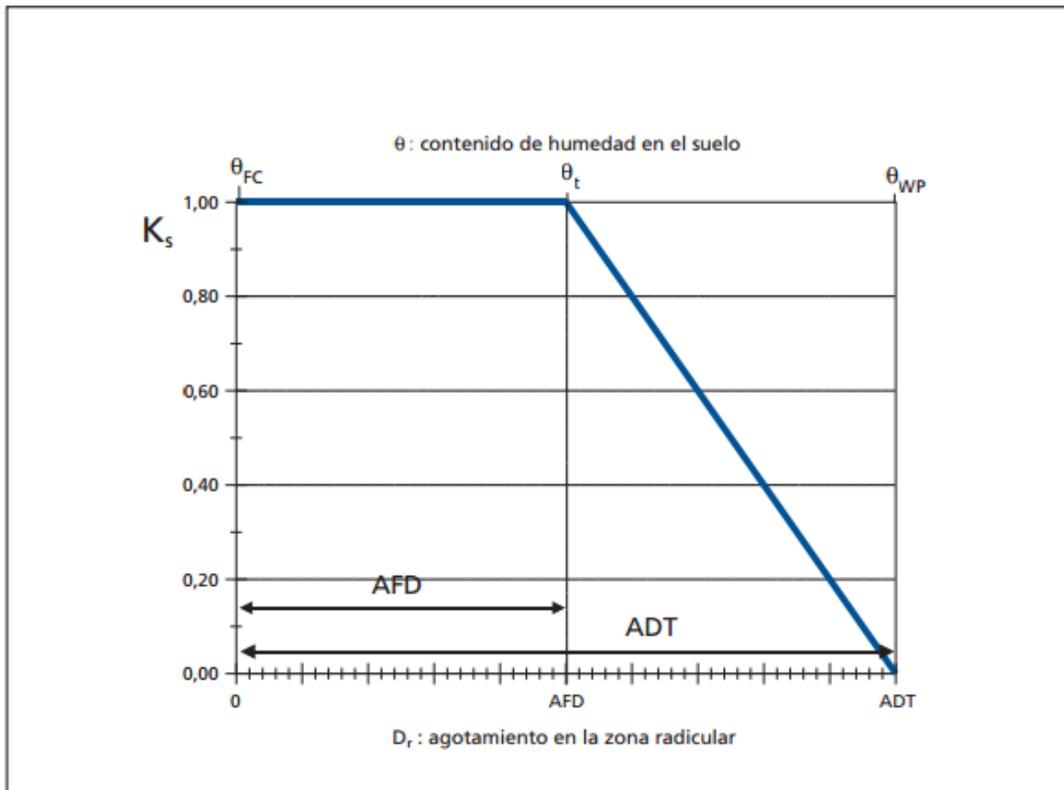


Figura 4. Coeficiente de estrés hídrico, K_s .

D. NITRÓGENO. RESPONSABLE DEL RENDIMIENTO

1. Función del N en la planta

El N cumple funciones vitales dentro de los seres vivos, encontrándose dentro de las plantas tanto en forma orgánica como inorgánica. Esta última en realidad es de escasa magnitud, siendo principalmente el NO^{-3} la única forma inorgánica capaz de ser almacenada. Por lo tanto, dentro de la planta la mayoría del N se encuentra en forma orgánica. Este nutriente juega un rol esencial en el crecimiento del vegetal, ya que es constituyente de moléculas

como: i) clorofila; ii) aminoácidos esenciales; iii) proteínas; iv) enzimas; v) nucleoproteínas; vi) hormonas; vii) trifosfato de adenosina (ATP). Además, el N es esencial en muchos procesos metabólicos, como por ejemplo, la utilización de los carbohidratos (Perdomo y Barbazán, 1999).

En condiciones de baja disponibilidad de N, el crecimiento del cultivo se resiente debido a una menor intercepción de la radiación incidente y en menor medida, por la reducción de la fotosíntesis (Etcheverría y García, 2005). Ocurre una disminución de la división y expansión celular, por lo cual se reduce el crecimiento, las hojas inferiores se tornan amarillentas y posteriormente mueren, las yemas laterales mueren o quedan en reposo y se reduce la floración (Fink et al., citados por Etcheverría y García, 2005).

2. Absorción y translocación del N

Los iones, como NO^{-3} alcanzan la zona de absorción de la raíz por difusión a través de la solución salina del suelo. Ellos son arrastrados por el movimiento del agua hacia la raíz o entran en contacto con las zonas de absorción a medida que la raíz crece. Los nutrientes minerales se distribuyen por toda la planta a través del xilema, impulsados por la corriente ascendente de agua que genera el flujo de la transpiración (Azcón-Bieto y Talón, 2000).

Las plantas pueden absorber N como NO^{-3} o NH^{+4} . Como en la mayoría de los suelos las condiciones permiten la acción de las bacterias nitrificantes, normalmente la mayoría de los cultivos absorben la mayor parte de su N como NO^{-3} . Algunas plantas, como por ejemplo los cereales, absorben N independientemente de la forma en que éste se encuentre, mientras que otras parecen haberse adaptado a una forma determinada de N. Existen trabajos que

indican que algunas plantas agrícolas crecen mejor si se les suministra una mezcla de NH^+4 o NO^-3 . En especial se ha detectado que algunas plantas no sólo pueden producir mayor nivel de rendimiento sino también mayor nivel de proteína. En la literatura aparecen ejemplos de esta respuesta positiva a ambas fuentes en cultivos de maíz y trigo (Perdomo y Barbazán, 1999).

3. Pérdidas de N

a. Pérdida de NH^+4 por volatilización

El nitrógeno, en los primeros centímetros del suelo puede perderse bajo la forma de NH^3 , por un proceso llamado volatilización. Esta forma de nitrógeno es frecuentemente consecuencia de la reducción del NH^+4 por procesos abióticos como la temperatura y la humedad. Por lo tanto, cuanto mayor sea la proporción de NH^+4 en el fertilizante mayor va a ser la probabilidad de que el N agregado se pierda por este proceso de volatilización, si las condiciones ambientales lo disponen.

Para Echeverría y García (2005) las pérdidas por volatilización son máximas cuando el contenido de humedad del suelo esta a capacidad de campo y cuando el mismo se seca lentamente, dado que el secado del suelo aumenta la concentración de NH^+4 en la solución. Según Chavallier y Toribio (2006), a mayor temperatura más rápido será el pasaje de amoníaco disuelto en la solución del suelo a amoníaco en el aire.

b. Pérdida de NO^{-3} por lixiviación

El ión NO^{-3} es muy soluble y no es adsorbido por los coloides del suelo, lo que lo hace altamente móvil en suelos con predominancia de carga neta negativa. En consecuencia, dicho ión está sujeto a elevada pérdida por lavado cuando la concentración del mismo y el movimiento de agua a través del perfil son elevados (Echeverría y García, 2005). Por lo que si las condiciones son de lluvia excesiva, se da la lixiviación del nitrógeno como nitrato (Tisdale y Nelson, 1970). Este proceso aumenta las probabilidades de pérdida del N al aplicar en el suelo fertilizante con proporciones considerables bajo forma de nitrato, pues precipitaciones importantes luego de la fertilización pueden llevar al N en profundidad, tornándose no disponible para las plantas.

Los suelos poseen diferente susceptibilidad a la lixiviación de nitratos, siendo usualmente más elevada en los de textura gruesa (Lavado y Rimski-Korsakov, s.f.)

c. Pérdida de NO^{-3} por desnitrificación

En condiciones de anegamiento, los microorganismos utilizan el O_2 del NO^{-3} y respiran N_2 el cual se pierde en la atmósfera. No se han encontrado justificaciones de las pérdidas por este proceso en el cultivo de sorgo; ello es entendible, si consideramos la evapotranspiración y las precipitaciones que ocurren en verano.

4. Respuesta en el crecimiento del sorgo forrajero

Los estudios del impacto de la fertilización nitrogenada sobre la calidad forrajera son aún más escasos que los ensayos sobre el rendimiento en grano.

Torrecillas y Bertoia (2008) estudiaron el efecto de momentos de aplicación y niveles de fertilización con N en tres híbridos de sorgo forrajeros en un Argiudol Típico de la provincia de Buenos Aires. Ellos encontraron que con dosis crecientes de N (de 0 a 150 kg N ha⁻¹) aumentó la digestibilidad (+2,7%) y el contenido de proteína bruta (+1,6%), y disminuyó el contenido de fibra (-2,2%) y lignina detergente ácido (-0,4%) en forraje, aunque la magnitud de las diferencias fue de escasa importancia práctica. Con respecto a la acumulación total de forraje, encontraron que una dosis de 50 kg de N ha⁻¹ aumentó en promedio el rendimiento comparado con el testigo (8800 vs 10500 kg MS ha⁻¹), siendo también la dosis más eficiente en cuanto al uso de N (34 kg MS kgN⁻¹), sin diferencias significativas para dosis mayores. Con respecto al momento, estos autores encontraron una mayor respuesta al aplicarlo 10 días post implantación (10d) respecto de una aplicación fraccionada en 10d y en el estado de 6 hojas, sugiriendo que estas diferencias se deberían a que la segunda aplicación se produjo en condiciones de baja humedad edáfica y probablemente a un mayor efecto sobre las estructuras reproductivas al aplicarlo en el momento más tardío. En la localidad de Coronel Dorrego, Zamora et al. (2009) reportaron un incremento de proteína en biomasa aérea de hasta 2,6% y de 2,9% en grano, con dosis de 120 kg de N ha⁻¹ (Figura 2d).

5. Eficiencia de utilización del nitrógeno

La eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) acumulado en todos los cortes, promedio de todos los años, disminuye a medida que se incrementa los niveles de aplicación. Con una dosis de 50 kgN ha⁻¹ la respuesta fue de 36.7 kgMS kgN⁻¹, en cambio cuando la dosis fue de 221 kgN ha⁻¹ la respuesta pasó a ser de 11.4 kgMS kgN⁻¹ (Beyaert y Roy, 2005). Esto coincide con lo publicado por Ketterings et al. (2007).

6. Momento de aplicación de N

El mejor momento de aplicación de N es durante el período de mayor exigencia, procurando sincronizarla oferta del nutriente con un sistema radicular capaz de absorberlo. Como se mencionó antes, el sorgo es un cultivo exigente de N entre los estadios de 6 hojas e inicio de floración. Es por eso que las aplicaciones complementarias deben realizarse siempre antes del estado de panojamiento, preferible dentro de los treinta días desde la emergencia, debido a que en este estadio se determinará el tamaño de la panoja (Díaz-Zorita, 1997). En planteos de secano y para demandas menores a 50-60 kg de N ha⁻¹, Gambaudo (2008) recomienda la aplicación al estado de 5-6 hojas. Cuando las demandas son mayores, debido al bajo contenido inicial de N, resulta aconsejable fraccionar la dosis: 30-50% a la siembra y el resto al estado de 5-6 hojas. También resulta eficiente el fraccionamiento de la dosis en sistemas bajo riego, en dos o más dosis por la mayor garantía de disponibilidad de agua y mayor rendimiento esperado. El fraccionamiento de la dosis es una estrategia eficiente de aprovechamiento del fertilizante en ambientes con facilidad de pérdidas por lavado.

7. Concentración de N en planta

En el trabajo realizado por Beyaert y Roy (2005), se obtuvo como resultado que la concentración de N en planta aumentó a medida que aumentó el nivel de N aplicado y, también, la concentración aumentó debido a la aplicación fraccionada.

E. EFECTO DEL SORGO SOBRE EL SUELO

El sorgo es una planta que produce una alta cantidad de rastrojo ($>10 \text{ Mg ha}^{-1}$) con una alta relación C/N (70-80), lo que permite producir altos niveles de cobertura en el suelo con una lenta descomposición³. Esto reduce las pérdidas por evaporación y mejora la infiltración de agua en el suelo, y por ende permite acumular una mayor proporción de agua para el cultivo siguiente. Sumado a la alta cantidad y calidad de su rastrojo, el sorgo posee un extenso sistema radicular, (Gregory, 2006), lo que le permite contribuir al contenido de materia orgánica mejorando la estructura del suelo. Varvel (1994) comparó el efecto de la monocultura de soja, maíz y sorgo sobre el secuestro de carbono en el suelo; y encontró que luego de ocho años solamente era positivo en el sorgo. En la región pampeana se han registrado incrementos promedios de 20-30% en los rendimientos de soja, cuando se realiza rotación con sorgo respecto al monocultivo de soja (Salas et al., 1997).

³ Ernst, O. 2011. Com. personal.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL

El experimento se realizó en el departamento de San José, en la zona de Puntas de Valdez (Ruta 1 km. 62), en el establecimiento del productor José Luis Avondet. El mismo comenzó a fines de diciembre de 2011 y terminó a fines de marzo del 2012.

El suelo donde se realizó el experimento corresponde al grupo CONEAT 10.8b, como se observa en el croquis a continuación. A este grupo corresponden la mayoría de las tierras onduladas suaves de los Dptos. de Canelones y San José. El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos de color pardo y normalmente con concreciones de carbonato de calcio. Los suelos corresponden a Vertisoles Rúpticos Típicos y Lúvicos y Brunosoles Eútricos y Subeútricos Típicos, textura franco arcillo limosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados.

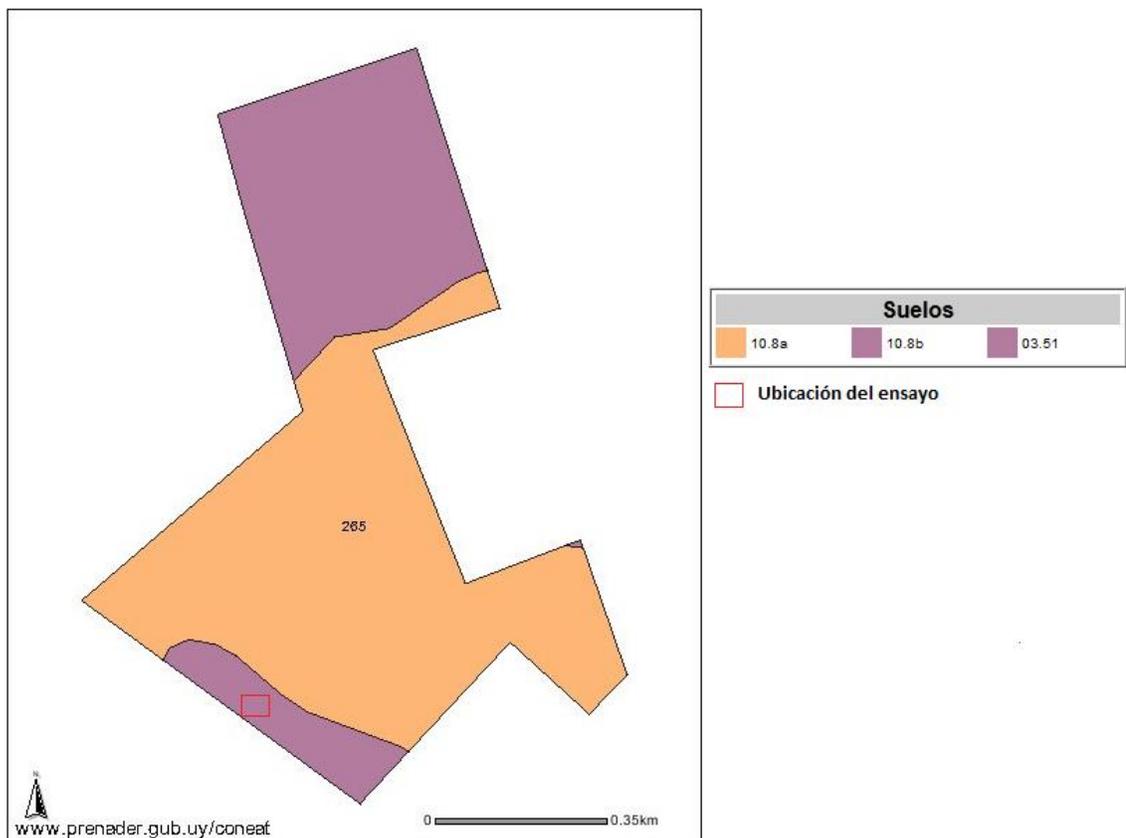


Figura 5. Croquis de grupos de suelo CONEAT.

La siembra se realizó el 15/11/2011, con una distancia entre hileras de 38 cm., una fertilización base de 150 kg de 18-46-0 y una densidad con el cultivo ya establecido de 375.000 plantas ha⁻¹.

El cultivar que se utilizó es un híbrido BMR de la empresa Agritec. El control de malezas se realizó aplicando 1 kg de atrazina y 1,5 litros de alfa-metolaclor en preemergencia.

Se procedió a ubicar el experimento en la chacra, delimitando mediante un alambrado el perímetro del mismo. Se comenzó con un primer corte de "limpieza".

B. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño utilizado fue de parcelas divididas con cuatro repeticiones en donde las parcelas mayores corresponden a los tratamientos de riego y las menores corresponden a los tratamientos de nitrógeno. Los tratamientos asignados a las parcelas mayores fueron: riego a demanda (R), riego intermedio (I) y seco (S). El tratamiento de riego a demanda cubre el 100 % de los requerimientos hídricos del cultivo, el tratamiento de riego intermedio cubre el 50 % de los requerimientos hídricos, mientras que el tratamiento de seco solamente recibe agua de las precipitaciones. Los momentos en el cual se riega, son determinados por el sistema IRRIGA, el cual se describe más adelante.

Los tratamientos asignados a las parcelas menores se dividieron según la dosis de nitrógeno a aplicar. Estas últimas se detallan a continuación.

Cuadro 2. Unidades de N agregadas por ha.

Unidades de N por ha	
1	Testigo S/N
2	50/0
3	50/50
4	100/0
5	100/50
6	200/0

C. PROCEDIMIENTO A CAMPO

1. Manejo del riego

Por el tamaño de parcela y la distribución del experimento el sistema de riego que mejor se adaptaba a estas condiciones fue el de los micro aspersores fijos.

Según los datos del catálogo, los aspersores utilizados erogaban un caudal de 27 L h^{-1} a 15 m.c.a. de presión lo que, con un marco de $3 \times 3 \text{ m}$ da una intensidad de precipitación de 3 mm h^{-1} .

Las parcelas con el tratamiento a demanda (R) se regaban durante el doble de tiempo que el tratamiento intermedio (I).

Después de finalizado el ensayo se realizó una prueba para determinar la uniformidad de la aplicación de los aspersores. La misma consistió en ubicar 16 pluviómetros en una distribución de cuadrícula. Se midió el volumen recogido por cada uno y se calculó el coeficiente de uniformidad de la aplicación. Se realizaron dos evaluaciones, en la primera se obtuvo como resultado que los aspersores aplicaban una lámina de 1.1 mm h^{-1} con un coeficiente de variación de 0.93, en la segunda evaluación se obtuvo como resultado una lámina de aplicación de 1.5 mm h^{-1} y un coeficiente de variación de 1.48.

El criterio para la aplicación de las láminas de riego se basó en el sistema IRRIGA utilizado por el INIA. En este sistema, los criterios de cuándo y cuánto regar son basados en parámetros agronómicos de cada cultivo (requerimiento hídrico, períodos críticos del cultivo, etc.), en características de suelo y de clima, particularmente las variaciones de las condiciones meteorológicas, en combinación con modelos matemáticos de determinación del balance hídrico del suelo, crecimiento y desarrollo de los cultivos,

evapotranspiración de referencia, entre otros. El Sistema Irriga es un portal WEB compuesto de varios módulos que auxilian en el manejo, monitoramiento y gerenciamiento de la aplicación de riegos. Este gerenciamiento lleva en consideración informaciones del cultivo irrigado, suelo y del clima del local de cultivo/riego. Este sistema es capaz de estimar la necesidad diaria de agua a ser aplicada en cada cultivo y con la probabilidad de necesitar riego para las próximas 24 a 48 horas.

Para poder conocer la humedad del suelo y así poder llegar al consumo de agua del cultivo se instalaron sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry), ubicados a 20 y 50 cm de profundidad en parcelas de riego a demanda, riego intermedio y seco.

Se observó que la información obtenida no era correcta, por lo que se decidió no utilizarla.

2. Manejo de nitrógeno

Luego del corte de limpieza se realizó la aplicación de los tratamientos de nitrógeno al voleo de forma manual, según la dosis correspondiente en cada uno. Luego de esta aplicación se aplicó una lámina de riego para incorporar el nitrógeno al suelo de manera de evitar posibles pérdidas no deseadas del mismo.

Lo mismo se realizó luego del primer corte de evaluación, según la dosis correspondiente a cada tratamiento.

D. DETERMINACIONES REALIZADAS

1. Previo a la instalación del experimento

En el área experimental seleccionada y previo a la instalación de los tratamientos se procedió a la toma de muestras compuestas de suelo en cada bloque a la profundidad de 0-20 cm para la posterior determinación de Carbono orgánico, pH (H₂O), fósforo asimilable, nitrógeno mineral bajo forma de nitratos y potasio intercambiable.

Cuadro 3. Análisis de suelo previo a la instalación del experimento.

pH	N-NO ₃	Bray I	K	C org
(H ₂ O)	µg N/g	µg P/g	meq/100g	%
6.85	8,6	47,35	1,16	2,74

Luego se realizó una prueba de infiltración con un infiltrómetro de doble anillo. La cual consiste en saturar una porción de suelo limitada por dos anillos concéntricos para a continuación medir la variación del nivel del agua en el cilindro interior para poder caracterizar el suelo y dimensionar el sistema de riego. Como resultado se obtuvo una tasa de infiltración básica de 2.96 mm h⁻¹ para el suelo estudiado. Los resultados de la prueba de infiltración realizada se presentan en el gráfico 1. En la misma se representa por un lado la velocidad de infiltración y por otro la infiltración acumulada desde el inicio de la prueba.

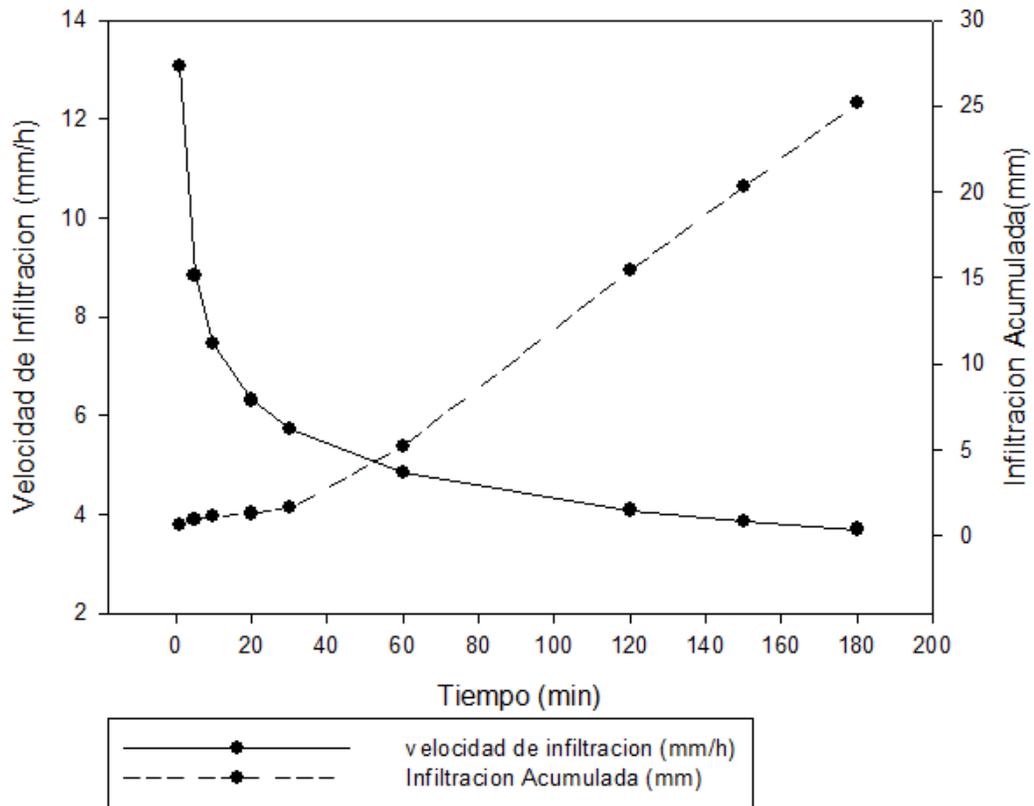


Gráfico 1. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada en función del tiempo.

Kostiakov (1962), fue el primero que propuso el uso de una ecuación empírica, para la velocidad de infiltración expresada normalmente en unidades de longitud por unidad de tiempo.

Con los datos recabados se ajustó la ecuación de Kostiakov la cual es la siguiente:

$$i = 0.029 t^{-0.243}$$

Donde i es la infiltración instantánea en mm h^{-1} , t es el tiempo de infiltración, 0.029 es la velocidad de infiltración en unidad de tiempo y -0.243 es un exponente adimensional (varía entre 0 y -1).

En la ecuación de Kostiakov la infiltración tiende a ser 0 a medida que el tiempo aumenta, como se puede observar en el gráfico anterior, lo cual no se verifica en la práctica donde se constata la existencia de una infiltración básica característica de cada suelo.

2. Durante el experimento

Al comienzo del experimento se estimó el número de plantas emergidas e implantadas por parcela mediante un muestreo que constó de un conteo en 2 metros lineales.

Cuando el cultivo alcanzó una altura aproximada de 60-70 cm se realizó el primer corte de evaluación. Previo al mismo se realizaron tres mediciones de altura de planta dentro de cada parcela.

Se muestreó un área de $9,12 \text{ m}^2$, la cual consistió en el corte de las plantas de las cuatro filas del centro de cada parcela. El mismo se realizó con una máquina de cuchillas suministrada por el INIA La Estanzuela, dejando un rastrojo remanente de unos 5 cm de altura.

La muestra obtenida se pesó inmediatamente con una balanza de campo para determinar el peso fresco. De la muestra original, se extrajeron dos submuestras para la determinación del peso seco y porcentaje de materia seca por un lado y nitrógeno total en planta por el otro. Dichos análisis se realizaron en el Laboratorio de INIA La Estanzuela. Por otro lado se extrajeron muestras del forraje, una por tratamiento, para la realización de análisis de calidad del forraje en el Laboratorio de Nutrición de INIA La Estanzuela.

Luego se realizó la segunda aplicación de nitrógeno según corresponda a cada tratamiento.

Posteriormente al primer corte de evaluación solo se tuvo que realizar un riego debido a la gran cantidad de lluvias registradas durante ese periodo.

Cuando nuevamente se llegó a la altura de planta requerida se realizó el segundo corte de evaluación, llevándose a cabo los mismos procedimientos antes descritos.

Al finalizar el experimento se realizó un muestreo de suelo de 0-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad para determinar nitratos en el mismo.

Cuadro 4. Resumen de las actividades realizadas.

Fecha	Actividad
20/12/2011	Primer corte limpieza.
29/12/2011	Instalación del experimento. Primera aplicación de N.
19/01/2012	Segundo corte, primer corte evaluación.
31/01/2012	Segunda aplicación de N.
16/03/2012	Tercer corte, segundo corte de evaluación. Prueba de los aspersores.
19/03/2012	Muestras de suelo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta los resultados del experimento basados únicamente en la información obtenida en el primer corte de evaluación. Esto se debió a que luego de realizado el primer corte existió una agresiva infestación de malezas, principalmente *Digitaria sanguinalis* (pasto blanco), a pesar de que como se mencionó anteriormente el productor había aplicado el paquete tecnológico de control preventivo de las mismas. Además del efecto provocado por la maleza, durante el período de crecimiento del segundo corte existieron precipitaciones abundantes y el riego no fue utilizado, como se puede observar en la gráfica 3 más adelante. Por todos estos motivos se decidió no considerar esta información y focalizar el análisis en el primer corte.

Lo primero que se desprende del análisis estadístico es que para el experimento planteado y para las condiciones dadas no existió interacción entre los tratamiento de nitrógeno (N) y riego, a diferencia de lo que se podría esperar. Por lo tanto, ambos tratamientos se analizarán por separado.

A. CONDICIONES CLIMÁTICAS

El factor año es una variable más en la investigación a campo a largo plazo. Por ello se analizó el comportamiento de dos parámetros climáticos, lluvia y evapotranspiración, durante el período que abarco el ciclo del cultivo.

Esta información fue obtenida de la estación agrometeorológica ubicada en la Central de Hereford de Kiyú, a pocos km del experimento.

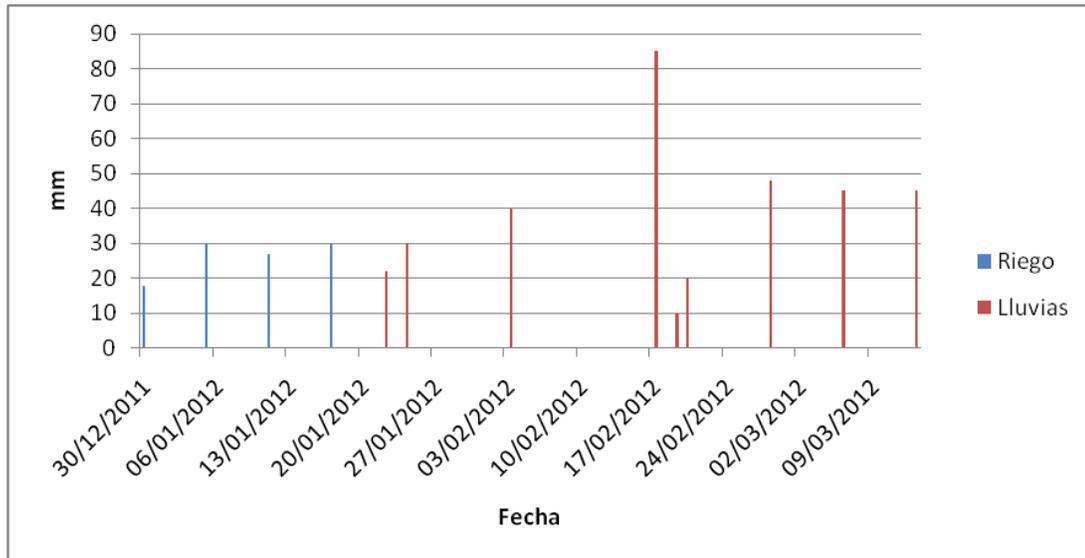


Gráfico 2. Lluvias y riegos realizados durante el experimento.

En el gráfico 2 se puede observar que no hubo lluvias en el periodo del primer corte (hasta 19/1). Es en este período donde se realizaron todos los riegos, totalizando 105 mm en el tratamiento a demanda y 61,5 mm para el tratamiento intermedio.

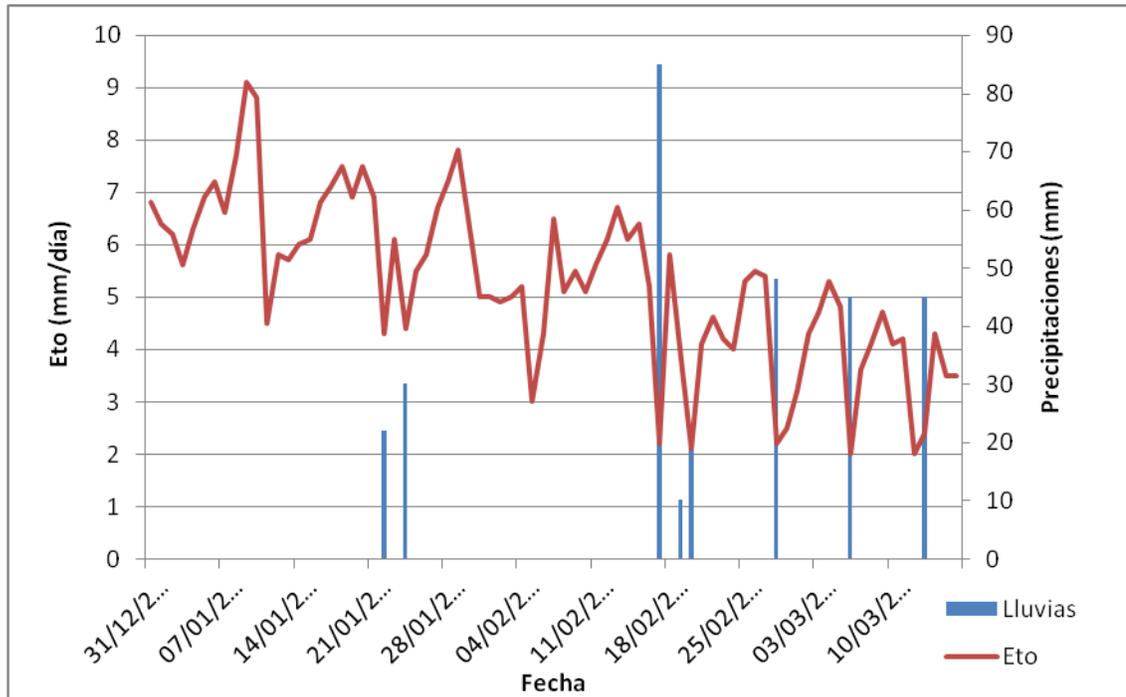


Gráfico 3. Precipitaciones y ETo durante el experimento.

Como observamos en el gráfico anterior la evapotranspiración potencial a pesar de variar día a día se observan grandes diferencias si lo analizamos por periodos. Así vemos que la demanda atmosférica que existe en el mes de enero es mayor a la de febrero y más aún que la de marzo. Como se mencionó en la revisión bibliográfica la Eto es un indicador de la demanda ambiental, el cual está fuertemente ligado a la radiación y a la temperatura.

El período de crecimiento del segundo corte (del 19/1 al 16/3), como se observa también en la gráfica, existen varios eventos de precipitaciones, totalizando 345 mm, por lo cual no fue necesario utilizar el riego.

Como se observa en el gráfico 4 en el período de crecimiento del primer corte, realizado el 19/1, no se registraron precipitaciones y fue en este período en el cual se realizaron los diferentes riegos.

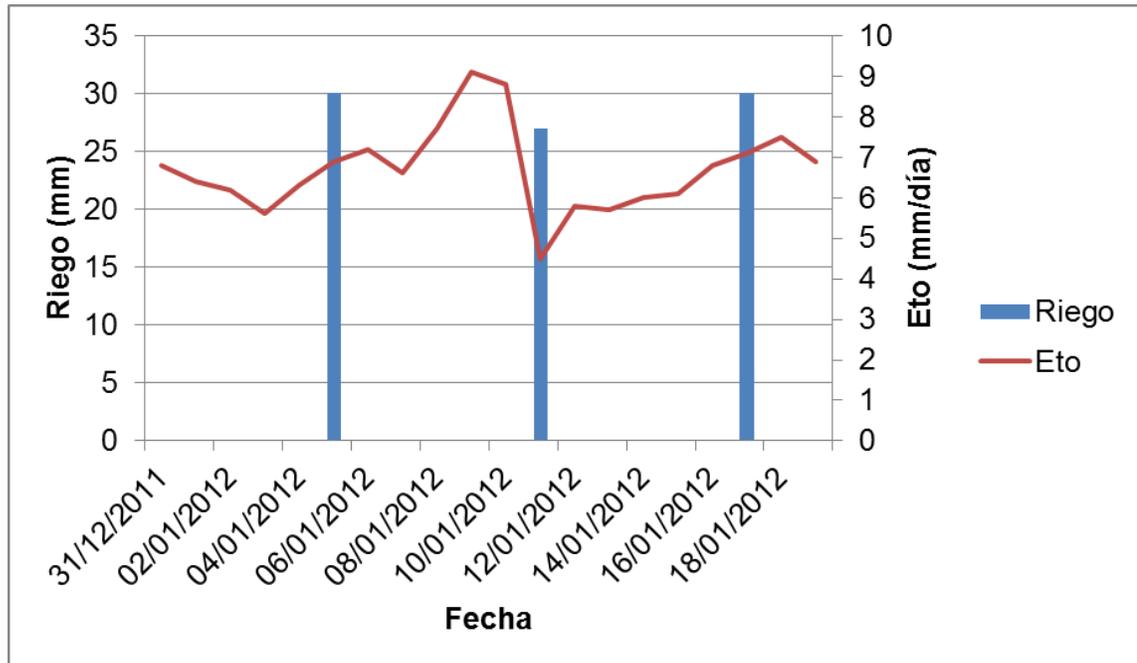


Gráfico 4. Eto y riegos realizados en el período de crecimiento del primer corte.

B. CORTE DE LIMPIEZA

Previo a la instalación del experimento se realizó un corte de limpieza. Los resultados se encuentran en el siguiente cuadro.

Cuadro 5. Resultados del corte de limpieza.

Bloque	Población/ha	MS (%)	Peso Seco/ha
1	381579	17	1423
2	236842	19	1474
3	407895	18	2231
4	236842	16	1561

C. RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN DE N

1. Respuesta en producción de MS

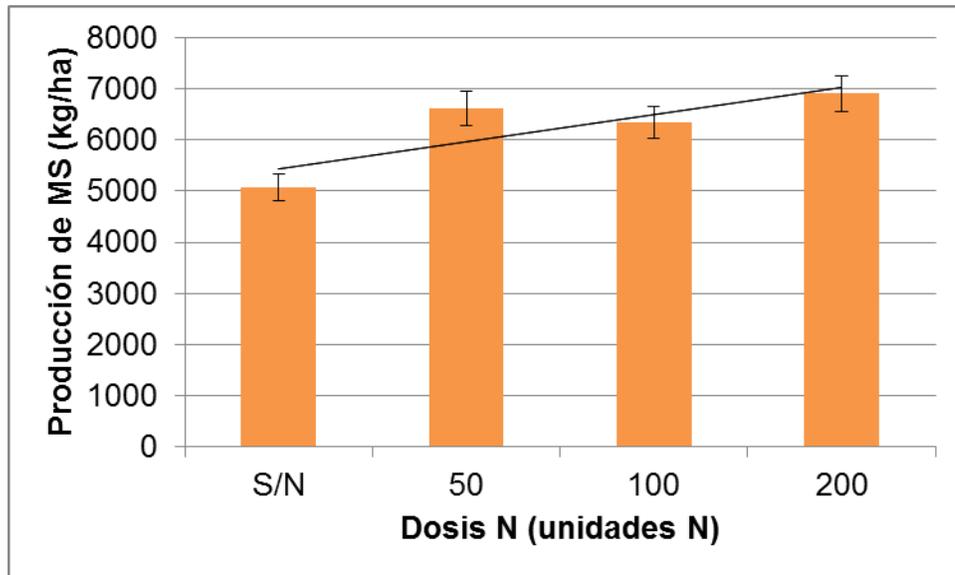


Gráfico 5. Producción de MS en función de la dosis de N aplicada según el tratamiento.

Como se observa en el gráfico existe respuesta en la producción de materia seca al agregado de N. Entre los tratamientos con agregado de N no hay diferencias significativas, véase cuadro ANAVA en anexos.

Analizando más detalladamente este período, que tiene una duración de 30 días, se desprende que la tasa de crecimiento del tratamiento S/N es muy buena, $167 \text{ kg MS día}^{-1}$. Esto junto con la no existencia de diferencias significativas entre los tratamientos con N, podría estar explicado por los altos niveles de nutrientes que presentaba el suelo (ver cuadro análisis de suelo), sobre todo por el buen nivel de materia orgánica. Quizás, si el experimento se hubiera realizado en un suelo más pobre, es decir con niveles de nutrientes y

materia orgánica inferiores, podría haber existido diferencia entre los tratamientos con N.

Estos resultados coinciden con el trabajo de Torrecillas y Bertoia en el 2008 en la provincia de Buenos Aires.

De estos resultados podemos obtener la tasa de crecimiento según los tratamientos de N y la eficiencia del uso del N (EUN).

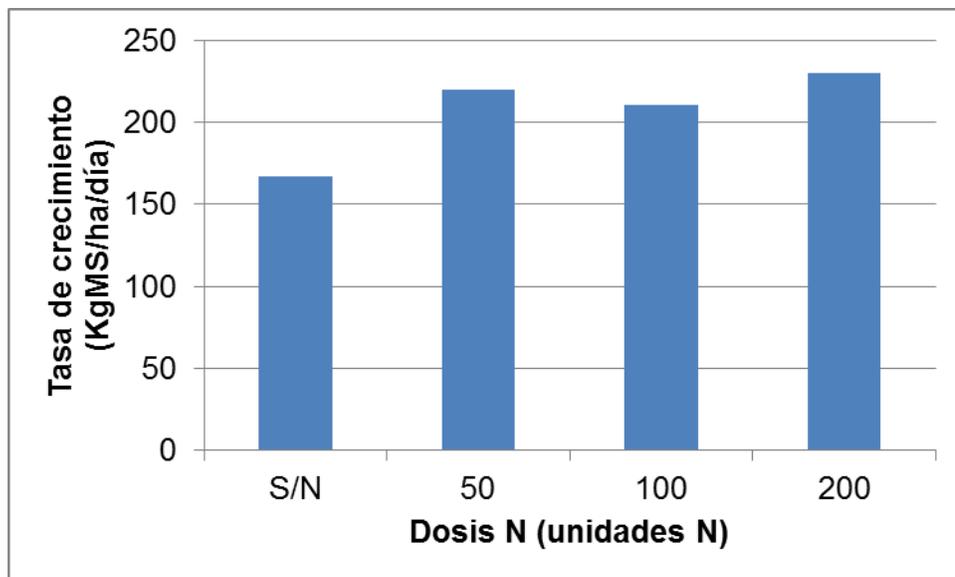


Gráfico 6. Tasa de crecimiento en función de la dosis de N aplicada según tratamiento.

Todos los tratamientos presentan tasas de crecimiento altas, la más baja es de 167 kgMS día⁻¹. Esto refleja el excelente potencial de crecimiento que presenta esta especie.

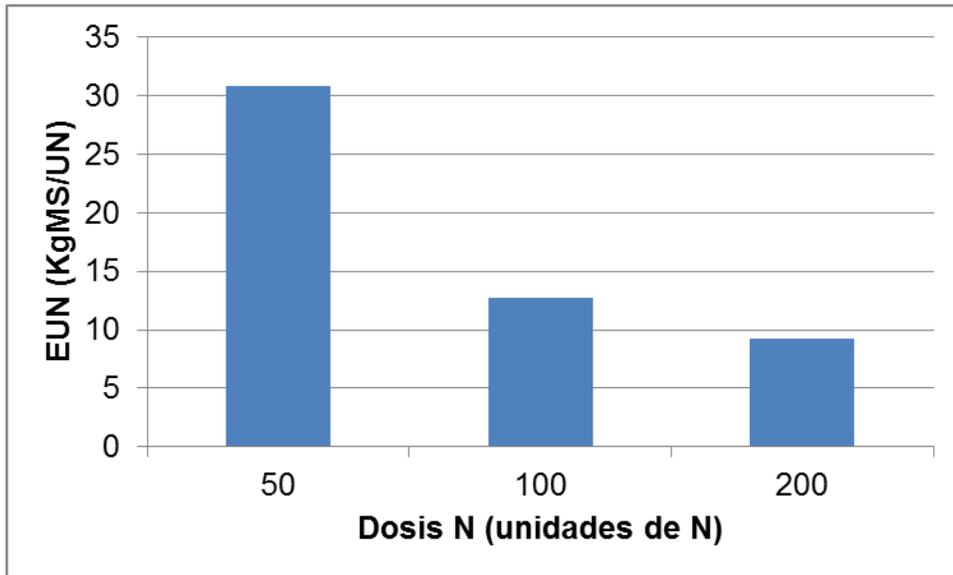


Gráfico 7. Eficiencia de uso del nitrógeno en función de la dosis de nitrógeno aplicada.

Se observa claramente como la eficiencia del uso de N de 50 unidades es significativamente superior a la de los otros tratamientos. Esto se debe a que no varió la producción entre estos tratamientos. Esto coincide con el trabajo realizado por Beyaert y Roy (2005).

2. Respuesta en altura de planta

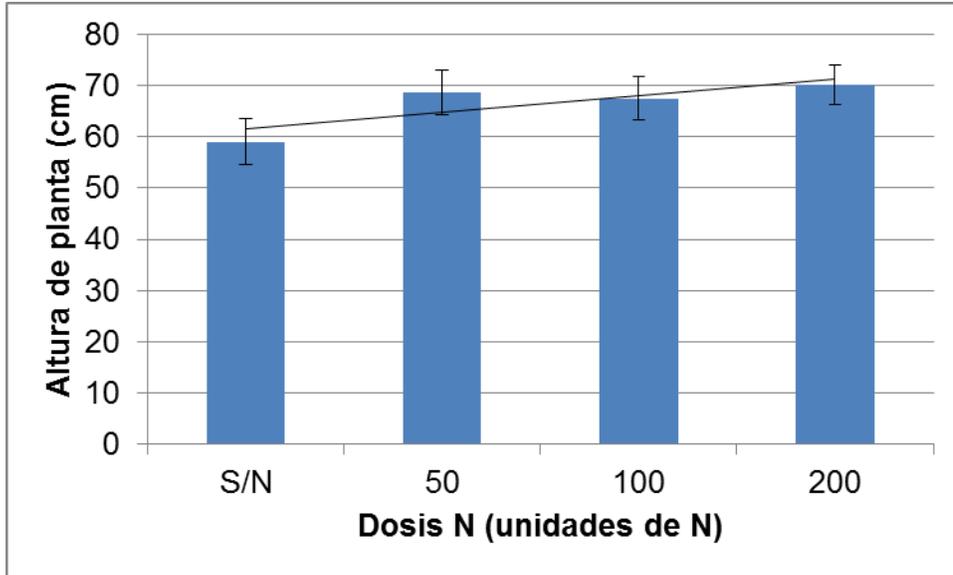


Gráfico 8. Altura de planta en función de la dosis de nitrógeno aplicada.

No se encontró diferencias significativas entre los tratamientos con nitrógeno pero sí entre estos y el testigo sin fertilizar. Esto puede explicar el mayor rendimiento de forraje de estos tratamientos.

3. Respuesta en porcentaje de materia seca

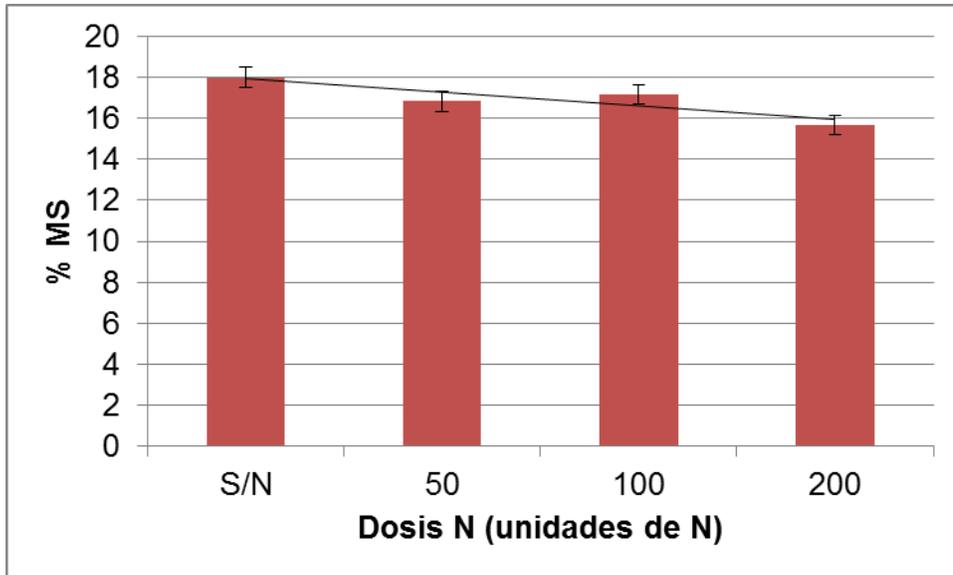


Gráfico 9. Porcentaje de MS en función de la dosis de nitrógeno aplicada.

Existe diferencia significativa entre la máxima dosis de N y los demás tratamientos. Esto se puede deber a que plantas con mayor disponibilidad de N se mantienen verdes por más tiempo (stay green)⁴.

⁴ Perdomo, C. 2013. Com. personal.

4. Respuesta en porcentaje de nitrógeno en planta

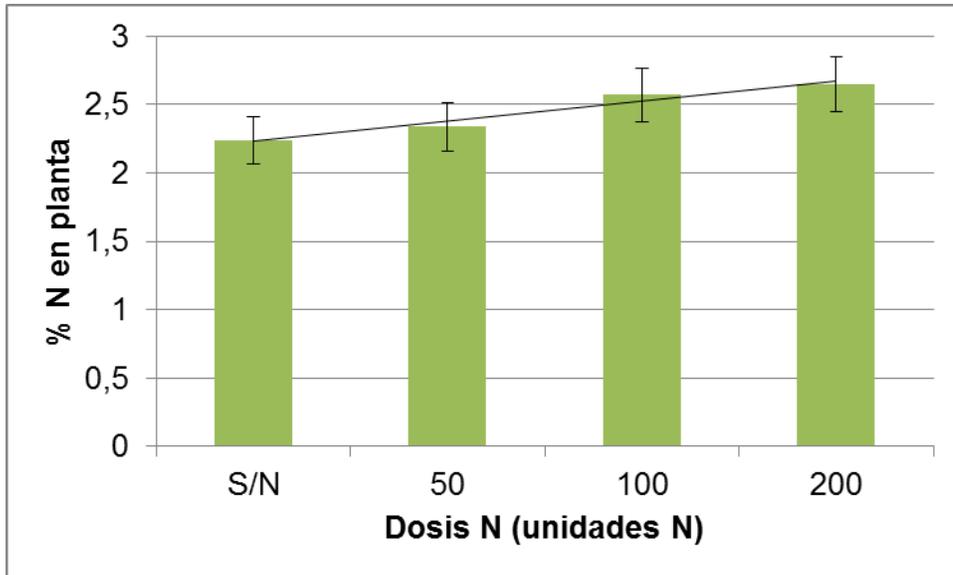


Gráfico 10. Porcentaje de N en planta en función de la dosis de nitrógeno aplicada.

Se puede observar una cierta tendencia a que a medida que aumentamos la dosis de fertilización nitrogenada, aumenta el porcentaje de N en planta. En este caso se obtuvieron los mismos resultados que en el trabajo de Beyaert y Roy (2005) en la provincia de Buenos Aires.

De estos resultados podemos obtener el nitrógeno total absorbido por la planta en el período de crecimiento estudiado.

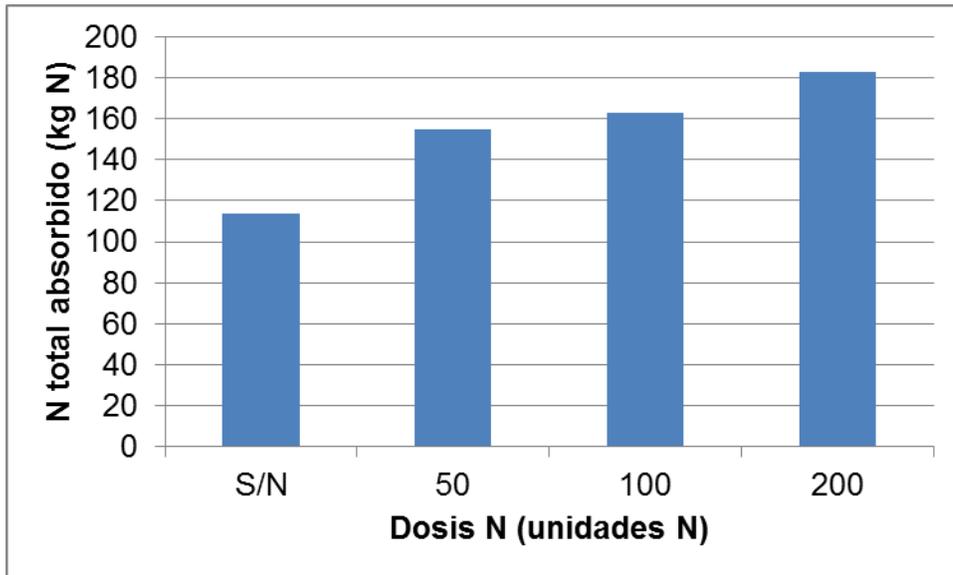


Gráfico 11. N total absorbido en función de la dosis de nitrógeno aplicada.

Como se puede observar el tratamiento que mas nitrógeno absorbió es el que se le aplicó la mayor dosis de fertilización. Pero a su vez, el tratamiento testigo S/N también absorbió una importante cantidad de nitrógeno, esto se puede deber al buen aporte del suelo, como se observa en el cuadro 3.

D. RESPUESTA AL RIEGO

1. Respuesta en producción de MS

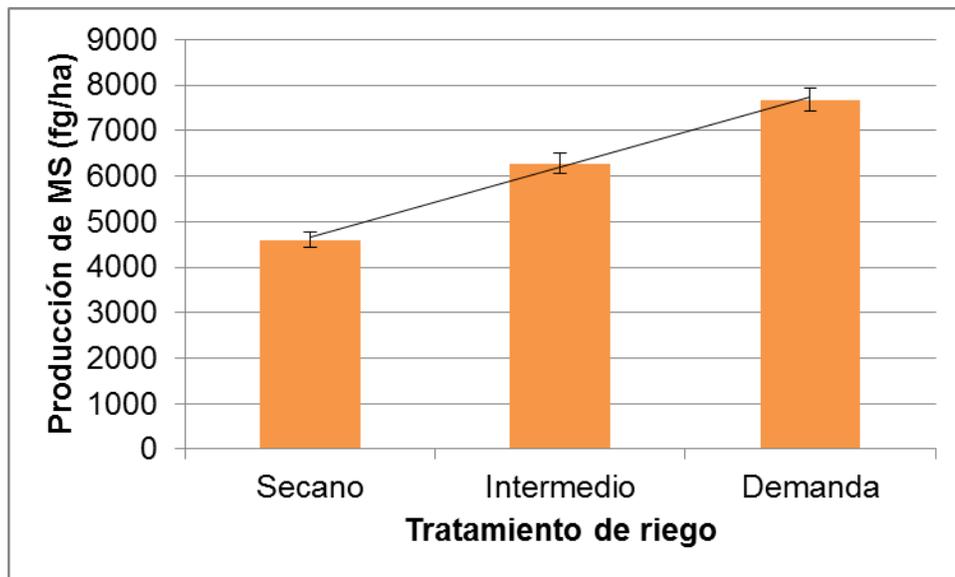


Gráfico 12. Producción de MS según tratamiento de riego.

Se observa claramente que existen diferencias significativas entre todos los tratamientos. Es decir, a medida que mejoramos las condiciones hídricas del suelo aumenta la producción de materia seca de la planta.

Como se observa en estas condiciones el agua es la principal limitante del cultivo. Cuando logramos vencer esta limitante, la producción de materia seca casi que se duplica.

De estos resultados podemos obtener la tasa de crecimiento según los tratamientos de riego y la eficiencia del uso del agua (EUA).

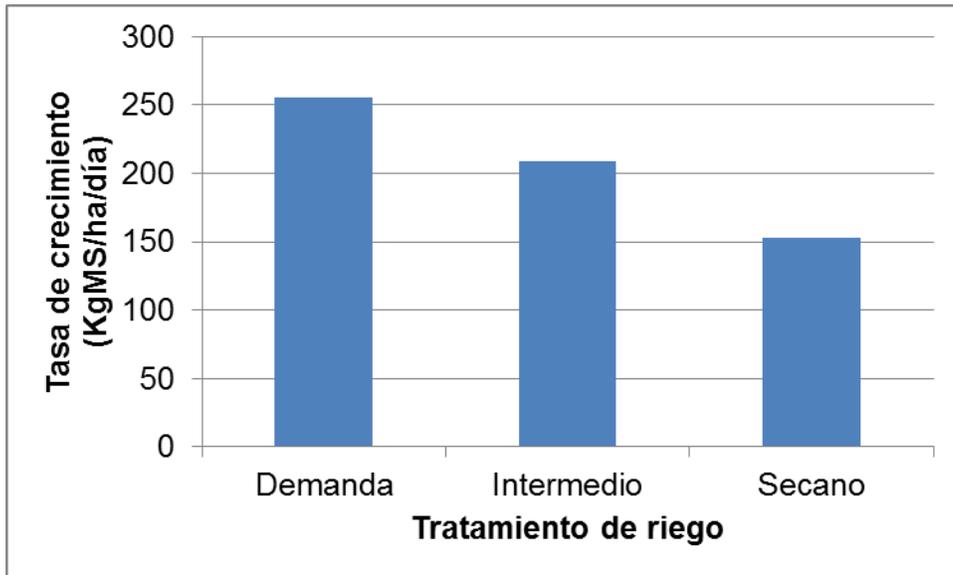


Gráfico 13. Tasa de crecimiento según tratamiento de riego.

La tasa de crecimiento del tratamiento seco es muy buena, lo que refleja el alto potencial de adaptación a condiciones hídricas adversas de este cultivo. Éste, también presenta una alta respuesta al agregado de agua, como se puede observar en el tratamiento a demanda que casi duplica la tasa de crecimiento del tratamiento seco.

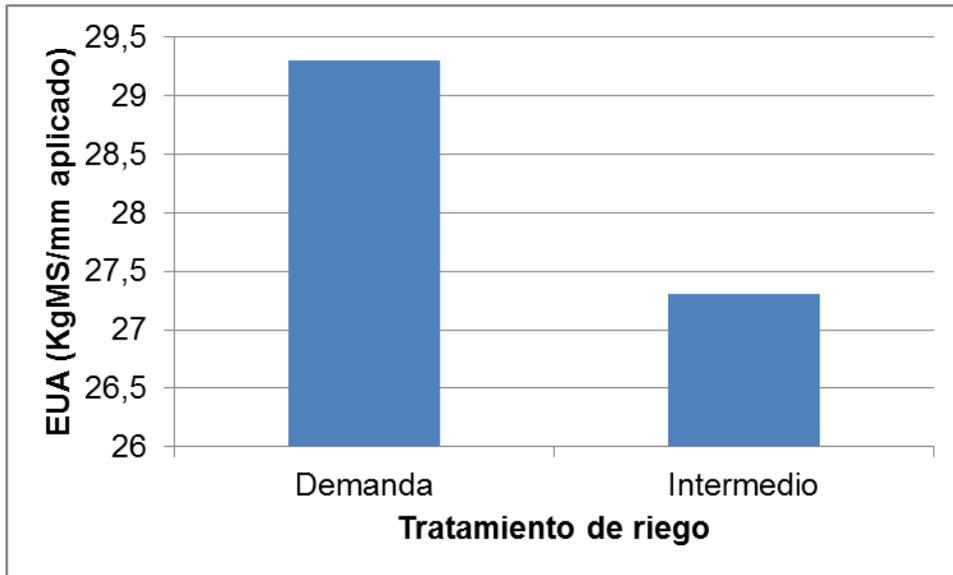


Gráfico 14. Eficiencia de uso del agua según tratamiento de riego.

En este caso la EUA del tratamiento a demanda es mayor a la de secano. Lo que quiere decir que todavía nos encontramos en un momento en el cual cada mm agregado genera una respuesta mayor en rendimiento. Por lo tanto, se podría plantear la hipótesis de que no se cubrió la demanda del cultivo.

2. Respuesta en altura de planta

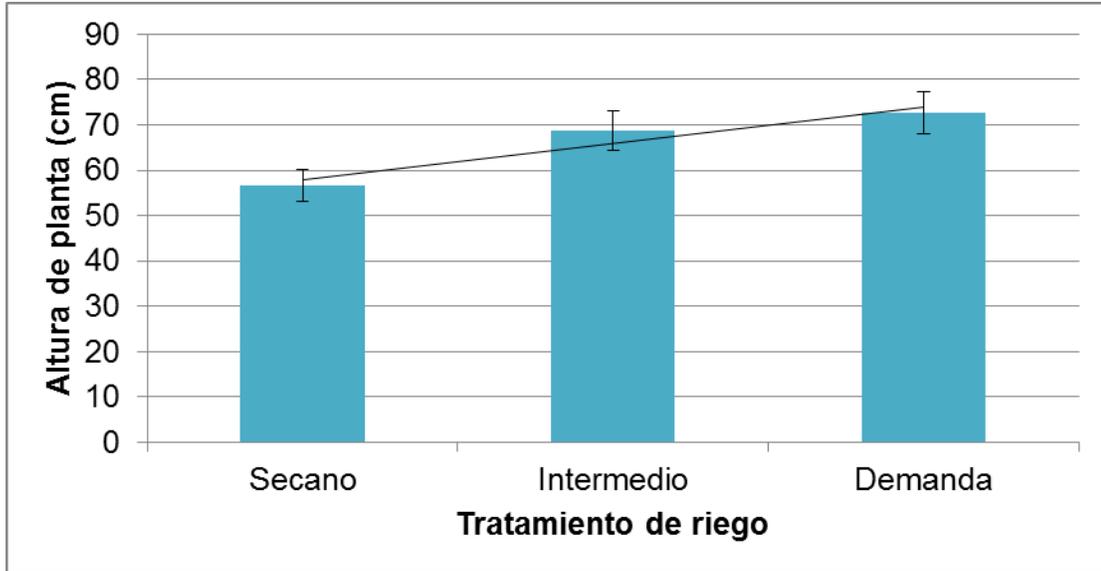


Gráfico 15. Altura de planta según tratamiento de riego.

En este caso se observan diferencias significativas entre los tratamientos regados y el de secano, no así entre los tratamientos bajo riego.

3. Respuesta en porcentaje de materia seca

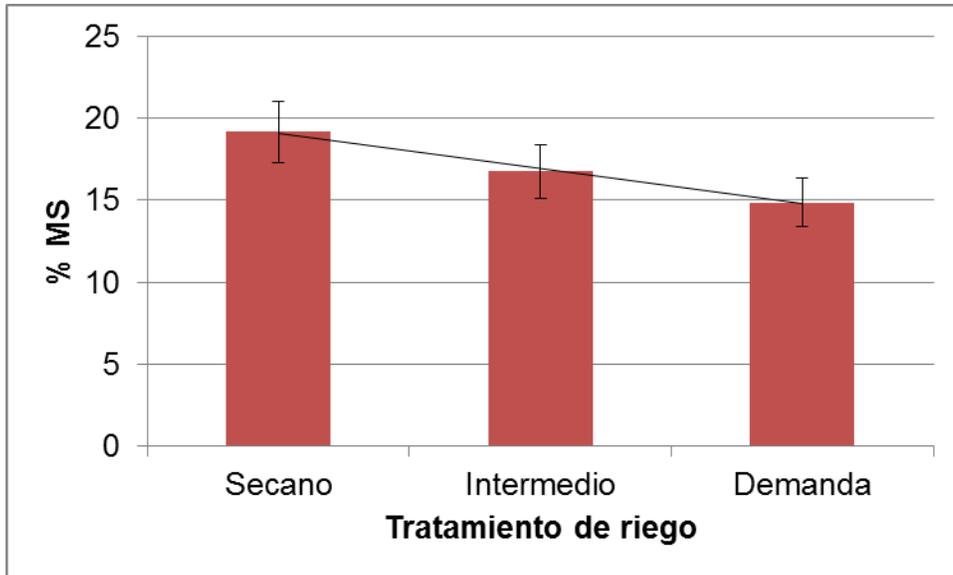


Gráfico 16. Porcentaje de MS según tratamiento de riego.

Para esta variable las diferencias fueron significativas entre todos los tratamientos, es decir a medida que aumenta la disponibilidad de agua disminuye el porcentaje de materia seca de la planta. Esto se debe a que las plantas con mayor crecimiento depositan menor pared celular en relación al contenido celular.

4. Respuesta en porcentaje de nitrógeno en planta

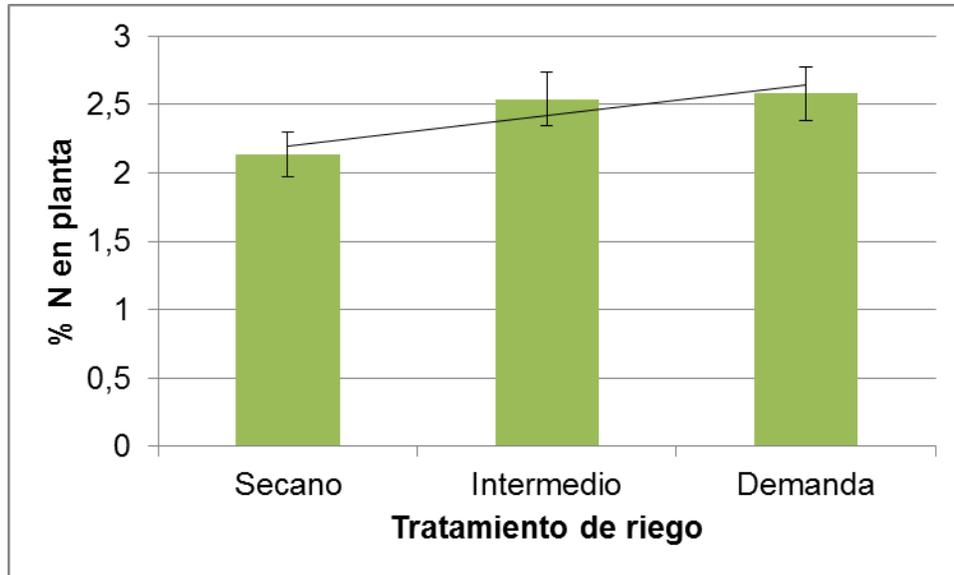


Gráfico 17. Porcentaje de N en planta según tratamiento de riego.

Se observa diferencias significativas entre el tratamiento seco y los tratamientos con riego.

Solo por el hecho de agregar agua, la planta absorbió más nitrógeno. Esto se puede explicar por dos motivos. Por un lado el suelo es capaz de aportar el nitrógeno suficiente para que la planta siga absorbiendo el mismo, lo cual está relacionado por el alto porcentaje de materia orgánica. La otra razón podría estar relacionada con la modalidad de absorción del nitrógeno, el cual se absorbe arrastrado por el movimiento del agua hacia la raíz, como mencionan Azcón-Bieto y Talón (2000).

De estos resultados podemos obtener el nitrógeno total absorbido por la planta en el período de crecimiento estudiado.

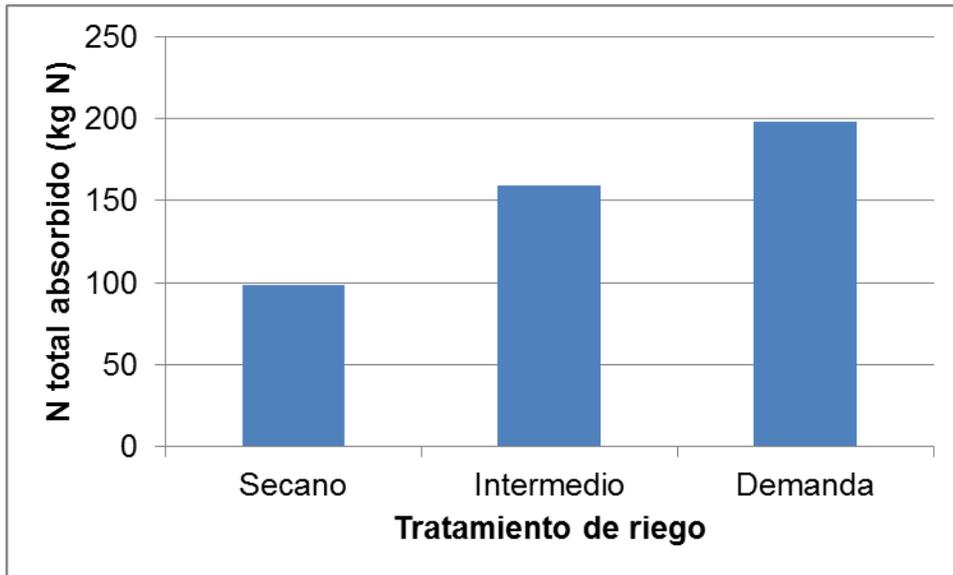


Gráfico 18. Nitrógeno total absorbido según tratamiento de riego.

Se puede observar que el tratamiento a demanda absorbió mayor cantidad de nitrógeno que los demás tratamientos, esto se debe principalmente a la mayor producción de MS que obtuvo el mismo, ya que el porcentaje de nitrógeno en planta no tenía diferencias con el tratamiento intermedio.

E. RESPUESTA A LA CALIDAD DE FORRAJE

Cuadro 6. Análisis de calidad de planta.

CALIDAD DE PLANTA				
TRATAMIENTO	MSP	FDA	FDN	C
SECANO	22,7	40,4	61,5	8,5
INTERMEDIO	21,1	39,4	62,9	8,7
RIEGO	21,1	40,3	63,4	9,2
S/N	21,4	40,1	64,1	8,7
50 UN	21,9	40,0	61,5	9,1
100 UN	21,3	40,0	64,0	8,5
200 UN	22,1	40,2	60,8	9,1

Donde MSP: Materia Seca de la Planta, FDA: Fibra Detergente Ácido, FDN: Fibra Detergente Neutro y C: Cenizas.

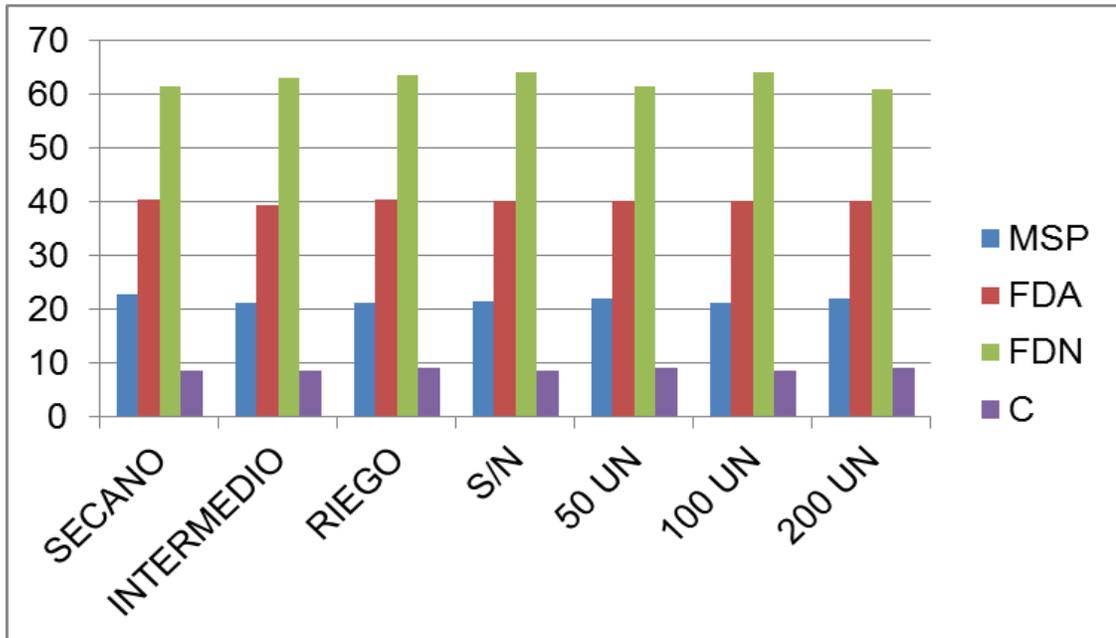


Gráfico 19. Calidad de forraje en función de tratamiento.

No se observan diferencias en la calidad de forraje.

La MS de los tratamientos de secano debería ser menores a las de riego por el hecho de que absorbieron menos agua, sin embargo en los resultados obtenidos no se puede observar diferencias claras.

En cuanto a FDN y FDA, el comportamiento debería de ser a aumentar los valores en los tratamientos de secano, debido a que las plantas crecen más lento y por lo tanto tienen mayor proporción de pared celular con respecto al contenido celular.

F. DINÁMICA DE N EN EL SUELO

Se realizaron análisis de suelo de 0-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad para saber cómo cambia la concentración de nitratos en los diferentes estratos del mismo. La muestra fue extraída al final del experimento, luego de un

período importante de lluvias. Por este motivo deben considerarse posibles pérdidas de nitrógeno por lixiviación.

1. Concentración de N-NO₃ de 0-20 cm de profundidad

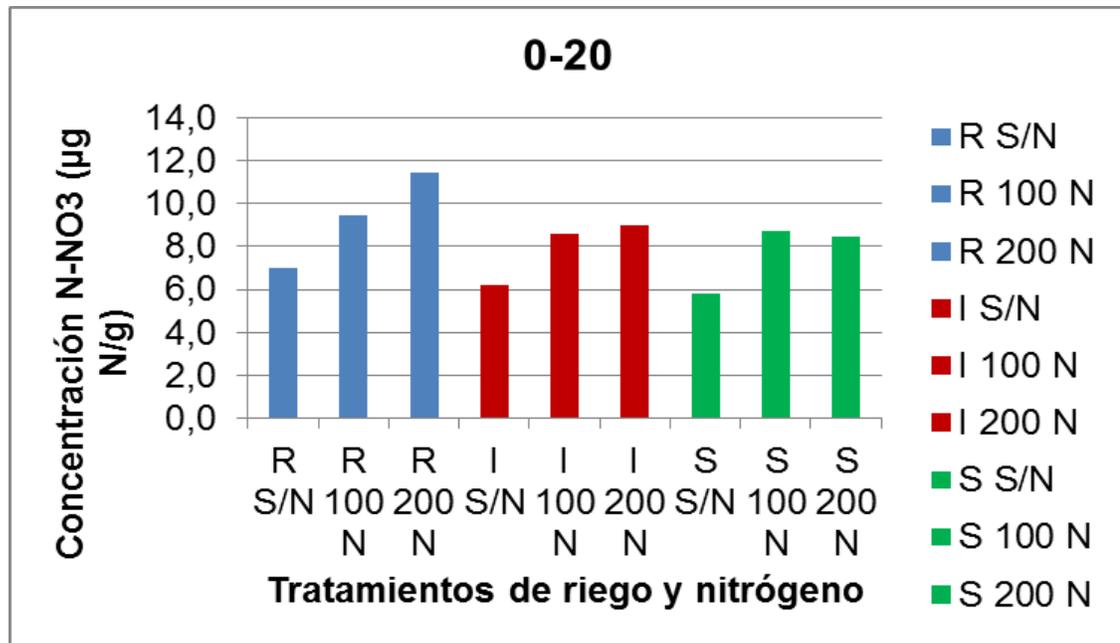


Gráfico 20. Concentración de N-NO₃ de 0-20 cm de profundidad en función de los tratamientos de riego y nitrógeno.

Donde R=Demanda, I=Intermedio y S=Secano, los siguientes números corresponden a la dosis de los tratamientos de nitrógeno.

Primero se puede observar una tendencia que a mayores dosis de nitrógeno, mayor es la concentración de nitratos en los primeros 20 cm. del suelo.

Luego puede observarse otra tendencia que los tratamientos con riego a demanda tienen mayor concentración que los tratamientos intermedio y secano, independientemente de la dosis de nitrógeno.

A diferencia de lo que podíamos esperar la concentración de nitratos en el tratamiento a demanda es mayor que en los demás tratamientos de riego. A pesar de que el riego podría generar pérdidas de nitratos por lixiviación y que además, la cantidad de nitrógeno extraído por el cultivo en el tratamiento a demanda fue mucho mayor.

2. Concentración de N-NO₃ de 20-40 cm de profundidad

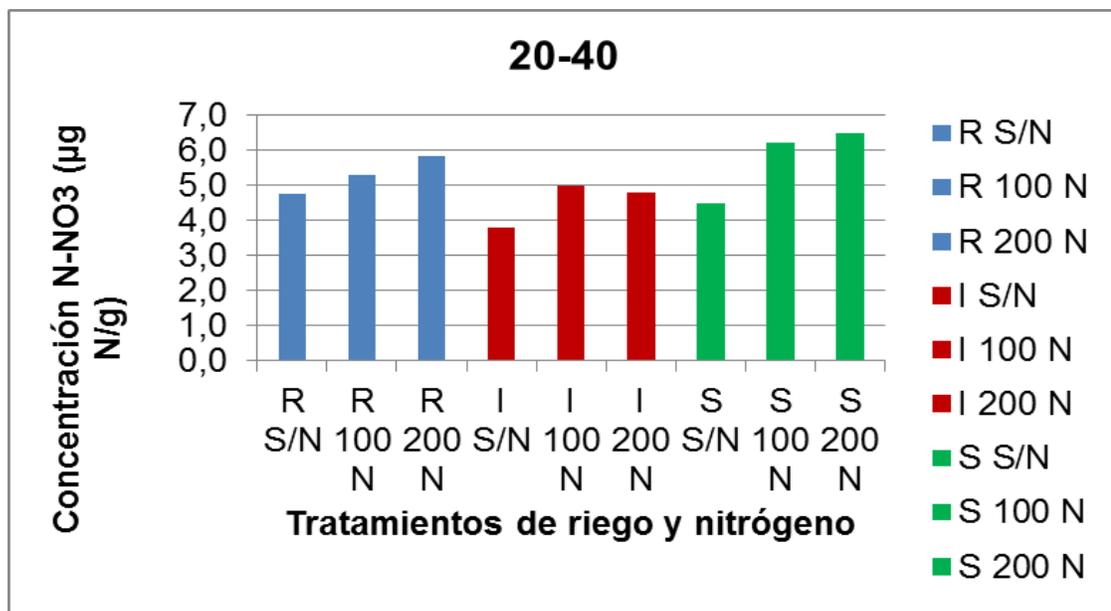


Gráfico 21. Concentración de N-NO₃ de 20-40 cm de profundidad en función de los tratamientos de riego y nitrógeno.

Donde R=Demanda, I=Intermedio y S=Secano, los siguientes números corresponden a la dosis de los tratamientos de nitrógeno.

Aquí vemos que las diferencias entre tratamientos de riego son menores. Si analizamos dentro de cada tratamiento de riego, las diferencias entre las distintas dosis de nitrógeno también disminuyen.

3. Concentración de N-NO₃ de 40-60 cm de profundidad

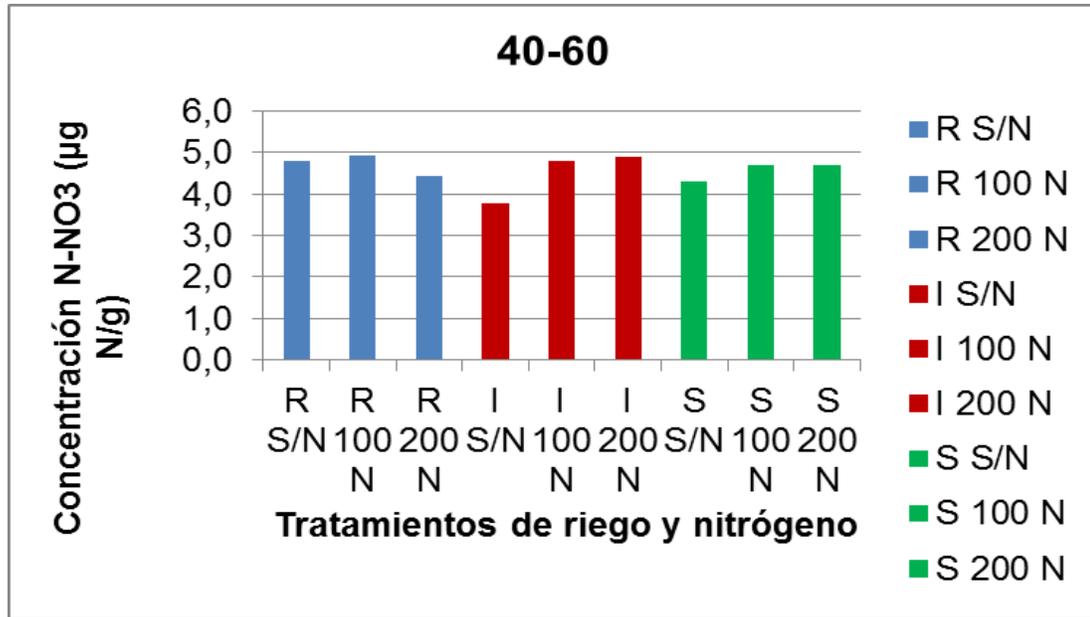


Gráfico 22. Concentración de N-NO₃ de 40-60 cm de profundidad en función de los tratamientos de riego y nitrógeno.

Donde R=Demanda, I=Intermedio y S=Secano, los siguientes números corresponden a la dosis de los tratamientos de nitrógeno.

En esta profundidad del perfil no se encuentran diferencias entre los distintos tratamientos de riego y las distintas dosis de nitrógeno.

4. Concentración de N-NO₃ en todo el perfil estudiado

A continuación se presenta el resumen de la concentración de nitratos en todo el perfil estudiado.

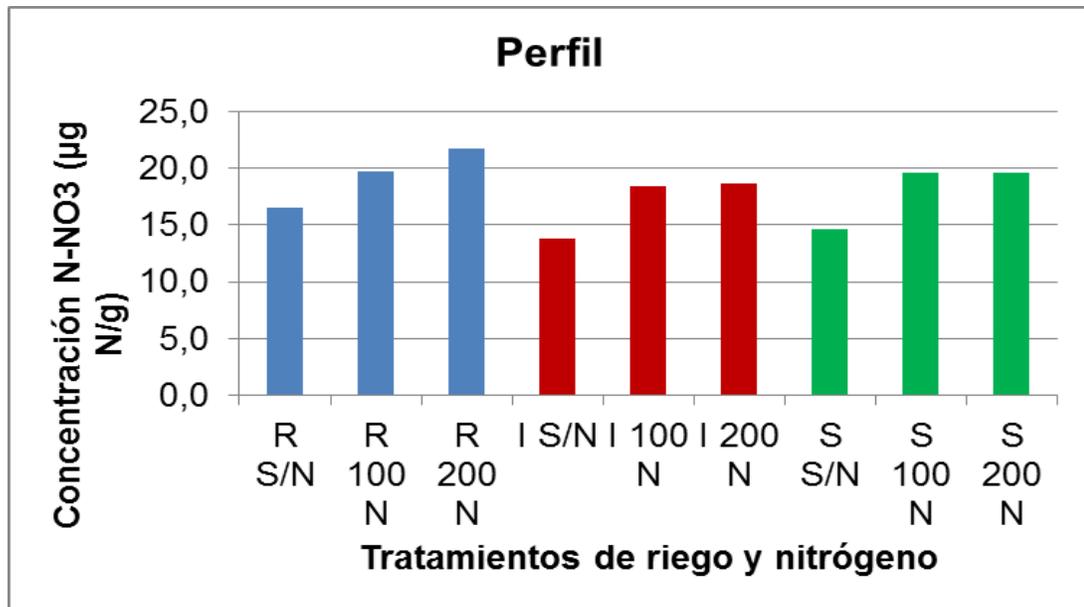


Gráfico 23. Concentración de N-NO₃ en el perfil de suelo (0-60 cm de profundidad) en función de los tratamientos de riego y nitrógeno.

Donde R=Demanda, I=Intermedio y S=Secano, los siguientes números corresponden a la dosis de los tratamientos de nitrógeno.

Existen diferencias claras entre los tratamientos sin nitrógeno y los tratamientos con nitrógeno.

Solamente en el tratamiento con riego a demanda existe diferencia entre la dosis máxima de nitrógeno y la intermedia. En los tratamientos de riego intermedio y secanos, a dosis de 100 y 200 unidades de N, no se ven diferencias.

En el tratamiento R, con 200 kg de N aplicado, a pesar de tener más extracción por el cultivo y eventualmente más lavado por el riego, tiene más N en el perfil.

G. BALANCE HÍDRICO REAL

Debido a que la prueba de los aspersores se realizó cuando finalizó el trabajo de campo y que los resultados obtenidos en cuanto al caudal de los mismos arrojaron un resultado diferente al que suponíamos por catálogo, se decidió realizar un balance hídrico real. Independientemente de esto, todos los resultados obtenidos se analizaron suponiendo que los aspersores aplicaban una lámina bruta de 3 mm h^{-1} y no de $1,5 \text{ mm h}^{-1}$.

1. Agua disponible en el perfil

Se sacaron tres muestras de suelo imperturbado de 0-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad y se obtuvo en el laboratorio el valor de capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y densidad aparente (Dap). A partir de estos últimos datos pudimos obtener la humedad volumétrica del suelo (H % vol) y el agua disponible (AD).

Cuadro 7. Parámetros hídricos del suelo.

	0-20	20-40	40-60
CC %	39,91	47,93	45,92
PMP %	26,45	34,68	35,00
H % vol (mm/10cm)	13,46	13,25	10,92
AD (mm)	26,92	26,5	21,84
TOTAL AD (mm) EN EL PERFIL (0-60cm)	75,26		

Del cuadro anterior se desprende que la máxima cantidad de agua que la planta puede disponer para su absorción, agua disponible (AD), son 75 mm.

2. Cálculo de kc

Cuadro 8. Valores de kc para el sorgo forrajero (Allen et al., 2006)

kc ini	0,5
kc med	1,15

Duración de las etapas. 5/10/15.

Fase inicial: 5 días

Fase media: 10 días

Fase final: 15 días

Estos datos fueron recabados de las mediciones a campo en el ensayo.

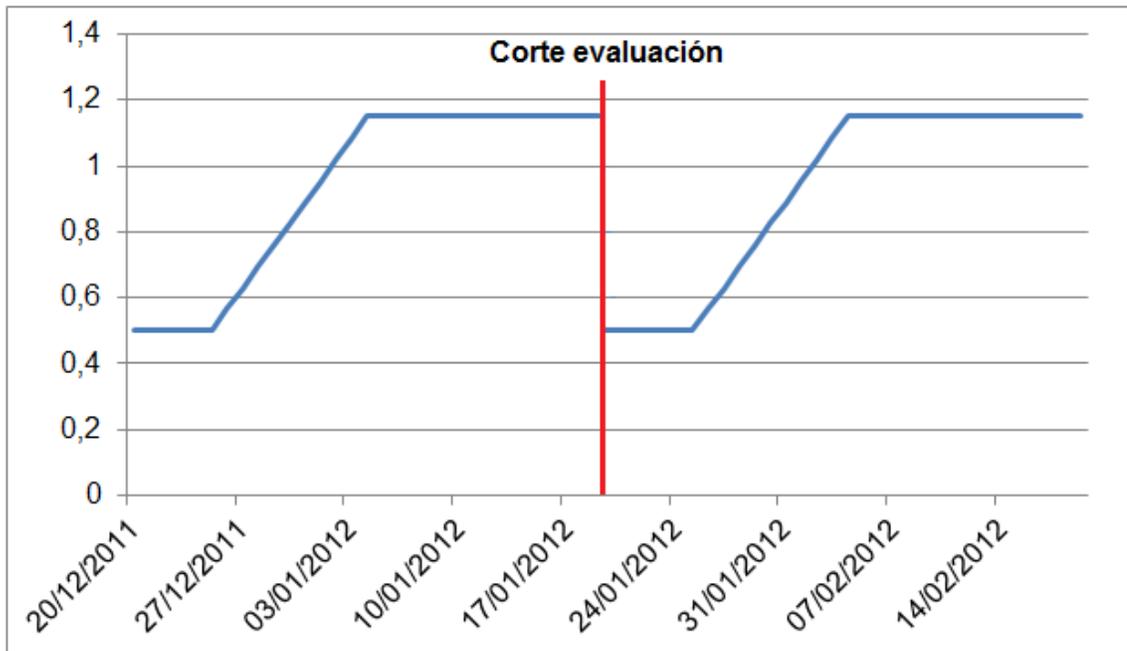


Gráfico 24. Curva del Kc del sorgo.

3. Cálculo del balance hídrico real

Para realizar el balance partimos de los siguientes supuestos: el suelo estaba a capacidad de campo al inicio del experimento, los aspersores tienen una eficiencia de riego del 85%, el cultivo puede agotar el 55% del agua sin estrés ($p=0.55$) y las raíces de las plantas llegaban a extraer agua hasta los 60 cm de profundidad.

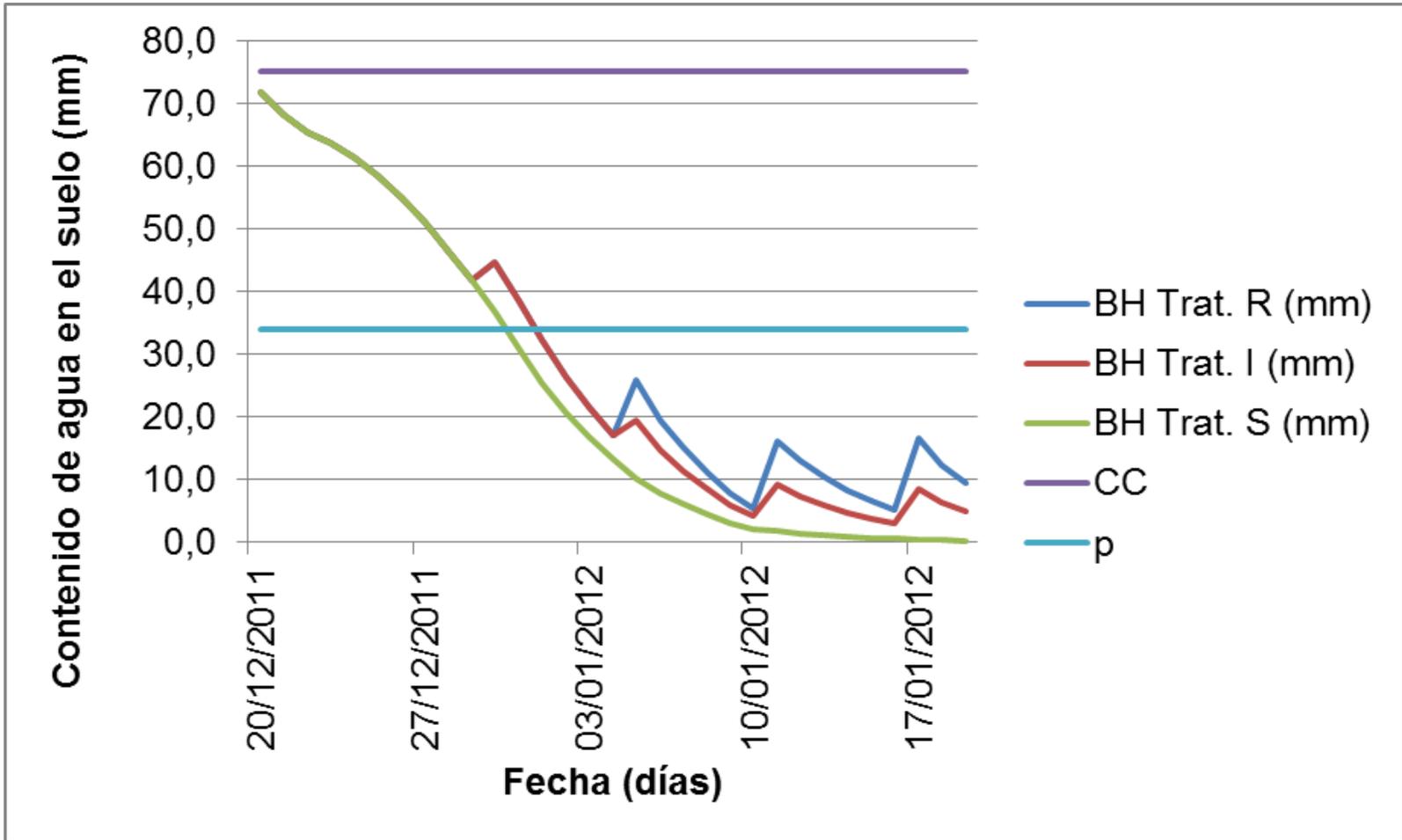


Gráfico 25. Balance hídrico real para los tres tratamientos de riego. Contenido de agua en el suelo en función de los días.

V. CONCLUSIONES

No existió interacción entre los tratamientos de riego y nitrógeno.

La producción de materia seca aumentó sólo hasta 50 UN. Con este valor, la EUN fue de 30 KgMS UN⁻¹. La altura de planta presentó el mismo comportamiento que la producción de materia seca.

El porcentaje de materia seca de la planta disminuyó solamente con la dosis máxima de nitrógeno.

El porcentaje de N en planta no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, pero tuvo una tendencia a aumentar a medida que aumentó la dosis.

La disponibilidad hídrica surge como la mayor limitante para la producción de materia seca, ya que se ven diferencias significativas muy marcadas entre los tratamientos. El tratamiento a demanda presenta una tasa de crecimiento 66% mayor que la de secano. Las EUA obtenidas fueron de 29,2 KgMS mm⁻¹ aplicado, para el tratamiento a demanda, y de 27,3 KgMS mm⁻¹ aplicado para el riego intermedio.

Tanto para altura de planta como para porcentaje de N en planta, no existen diferencias significativas entre los tratamientos de riego, pero sí entre estos y el secano.

El porcentaje de materia seca disminuyó a medida que aumentó la disponibilidad hídrica, siendo significativa la diferencia entre todos los tratamientos.

Solo por el hecho del agregado de agua, aumentó el nitrógeno total absorbido por las plantas, viéndose que el tratamiento a demanda absorbió el doble que el secano.

VI. RESUMEN

Las condiciones ambientales para el período estival en nuestro país, genera una marcada deficiencia hídrica, lo que provoca una disminución en la tasa de crecimiento en los cultivos y pasturas. La utilización del riego y una adecuada fertilización nitrogenada surgen como una herramienta tecnológica aplicable para solucionar dicha deficiencia. El objetivo del trabajo fue evaluar la respuesta en producción de materia seca y otras características fisiológicas de la planta de sorgo forrajero frente a diferentes condiciones hídricas y fertilizaciones nitrogenadas. El experimento se desarrollo en el período diciembre 2011-marzo 2012, en el departamento de San José, sobre un suelo Brunosol Eútrico y Subeútrico Típico. El diseño utilizado fue de parcelas divididas con cuatro repeticiones en donde las parcelas mayores corresponden a los tratamientos de riego y las menores corresponden a los tratamientos de nitrógeno. Existieron tres tratamientos de riego, los cuales fueron a demanda, donde se buscaban cubrir el 100% de los requerimientos hídricos, intermedio, cubriendo el 50% de los requerimientos y seco, el cual sólo recibía agua de las precipitaciones. Por otro lado, se plantearon seis tratamientos de nitrógeno, correspondientes a un testigo sin nitrógeno, 50/0, 50/50, 100/0, 100/50, 200/0. El número delante de la barra corresponde a las unidades de nitrógeno aplicadas luego de la instalación del experimento, la cual se evalúa en el primer corte, y el número después de la barra corresponde a las unidades de nitrógeno aplicadas luego del primer corte que se evalúan en el segundo corte. Debido a un excesivo enmalezamiento, principalmente con *Digitaria sanguinalis* y que en este período las precipitaciones fueron abundantes por lo que no se aplicó ningún riego, el segundo corte no fue evaluado. No existió interacción entre los tratamientos de riego y nitrógeno. Existe respuesta al agregado de nitrógeno en producción de materia seca para la dosis menor, lo que pudo haber sido explicado por los altos valores de nitratos en suelo. La dosis de 50 unidades

resulto ser la más eficiente por unidad agregada de nitrógeno (30 KgMS UN^{-1}). Existió diferencia significativa en altura de planta para la dosis más baja de N, no así entre los tratamientos con N. El porcentaje de materia seca fue significativamente menor en la dosis máxima de N. Se observó una tendencia a aumentar en contenido de N en planta, a medida que aumenta el N aplicado. En lo que respecta a los tratamientos de riego, la producción de materia seca presentó diferencias significativas entre los tres tratamientos. El agua fue el principal limitante para el desarrollo del cultivo. La tasa de crecimiento del tratamiento a demanda fue un 66 % mayor que la de secano. Tanto para la altura de planta como para el porcentaje de N en planta, existió diferencia significativa entre los tratamientos con riego y el de secano. A medida que aumentamos la disponibilidad hídrica, disminuye el porcentaje de materia seca en la planta, siendo significativo entre los tratamientos.

Palabras clave: Agua; Fertilización; Sorgo.

VII. SUMMARY

Environmental conditions for the summer period in our country, marks a hydric difference, that causes a decrease in the growing rate of crops and pastures. Irrigation and Nitrogen fertilization arise as a technologic tool for fixing this issue. The objective of this work was to evaluate the dry matter production response and other fisiyological characteristics of a forage sorghum in different hydric conditions and nitrogen fertilizations. The experiment was developed since December of 2011 until March of 2012, in San Jose, in a "Brunosol Eutrico y Subeutrico Tipico" soil. The statistical design was divided plots with 4 repetitions where mayor plots belong to irrigations treatments and minor plots belongs to Nitrogen treatments. The irrigation treatments were ; 100%, 50%, of water demand, and rainfed. On the other hand, six nitrogen treatments were planned, a test without Nitrogen, and the rest were 50/0, 50/50, 100/0, 100/50, 200/0 where the first number belongs to Nitrogen when installing the experiment, which is evaluated during the first cut. And the second one is Nitrogen belongs to the Nitrogen supplied after the first cut evaluated during the second cut. Due to abundant weed growth with *Digitaria Sanguinalis* and exesive rains that caused irrigation was not necessary the second cut wasn't evaluated. Interaccions between irrigation and Nitrogen were not found. For the minor dose of Nitrogen a response in dry matter production was found, that could have been explained for the high NO_3 levels in the soil. The 50 N units dose resulted to be the most efficient one (30kgDM / NU). A significant difference in the plant height was found for the minor N dose, this behavior was not found between the treatments with N. A significantly minor dry mater percentage was found in the highest N treatment. It was found that the plant N content tend to rise up when the N fertilization increased. With the irrigation treatments, significant differences were fund between treatments, water was the main limiting factor for the crop development. The demand treatment growing

rate was 66% higher than the dry one. Significant difference was found between irrigation and dry treatments For the plant height as well as the N plant percentage. Dry matter plant percentage decreases significantly when hydric soil availability increases.

Key words: Water; Fertilization; Sorghum.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. ALGORTA, E. J.; CARCABELOS, J. 2007. Efecto de distintas distancias entre hileras, población e híbrido de sorgo granífero en siembra directa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 49 p.
2. AYALA, W.; SAWCHIK, J. 1988. Densidad de siembra en cultivares de sorgo granífero. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 110 p.
3. AZCÓN-BIETO, J.; TALÓN, M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid, España, McGraw-Hill/Interamericana. 522 p.
4. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. 323 p. (Estudio FAO. Riego y Drenaje no. 56).
5. BEYAERT, R.P.; ROY, R.C. 2005. Influence of nitrogen fertilization on multi-cut forage sorghum-sudangrass yield and nitrogen use. Agron. J. 97: 1493-1501.
6. CARRASCO, P. 2004. Aptitud climática de Uruguay para la producción de sorgo. In: Siri, G. comp. Sorgo. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 23-30.
7. CHAVALLIER BOUTELL, S.; TORIBIO, M. 2006. Volatilización del amoníaco. Información técnica de trigo campaña 2006. (en línea). Publicación Miscelánea. no. 105. pp. 69-82. Consultado 20 dic. 2010. Disponible en http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/miscelaneas/105/trigo2006_69.pdf
8. DÍAZ – ZORITA, M. 1997. Sorgo granífero. In: Melgar, R.; Díaz Zorita, M. eds. Fertilización de cultivos y pasturas. s.l., Hemisferio Sur/INTA. pp. 111-114.
9. ECHEVERRÍA, H.; GARCÍA, O. 2005. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Balcarce, Argentina, INTA. 525 p.

- 10.ERNST, O. 2004. Época de siembra. In: Siri, G. comp. Sorgo. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 47-50.
- 11.FASSIO, A.; COZZOLINO, D.; IBAÑEZ, W.; FERNÁNDEZ, E. 2002. Sorgo; destino forrajero. Montevideo, INIA. 27 p. (Serie Técnica no. 127).
- 12.GAMBAUDO, S. 2008. Fertilización del sorgo granífero. In: Melgar, R.; Díaz Zorita, M. eds. Fertilización de cultivos y pasturas. s.l., Hemisferio Sur/INTA. pp. 237-244.
- 13.GARCIA PETILLO, M.; HAYASHI, R.; MORALES, P.; PUPPO, L. 2010. Curso de riego y drenaje. Montevideo, Facultad de Agronomía. 285 p.
- 14.GIORDA, L.M.; FERESIN, M.; DOMANSKI, C. 1997. Condiciones ambientales. In: Giorda, L.M. ed. Sorgo granífero. Córdoba, INTA. pp. 17-19 (Cuaderno de Actualización Técnica no. 7).
- 15.GREGORY, P. 2006. Plant roots; growth, activity and interaction with soils. s.l., Blackwell. 340 p.
- 16.IPNI. 2007. Planilla de cálculo para estimar requerimientos nutricionales de cultivos de cereales, oleaginosas, forrajeras e industriales. Acassuso, Argentina. s.p.
- 17.KETTERINGS, Q.M.; CHERNEY, J.H.; GODWIN, G.; KILCER, T.F.; BARNEY, P.; BEER, S. 2007. Nitrogen management of brown midrib sorghum sudangrass in the Northeastern USA. Agron. J. 99: 1345-1351.
- 18.LAVADO, S. R.; RIMSKI-KORSAKOV, H. s.f. Cuantificación de la pérdida de nitratos por lixiviación en dos suelos de la Pcia. de Buenos Aires. (en línea). Buenos Aires, Argentina, Facultad de Agronomía. 5 p. Consultado 15 abr. 2011. Disponible en <http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/suelos/contamina/Lavado.pdf>
- 19.PERDOMO, C.; BARBAZAN, M. 1999. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.

20. RODRÍGUEZ, N.; GARAY, J.; COLAZO, J.C. 2012. Control de malezas y uso de herbicidas en sorgo. *In*: Cruz Colazo, J.; Garay, J.A.; Veneciano, J.H. eds. El cultivo de sorgo en San Luis. Anguil, La Pampa, Argentina, INTA. cap. 5, pp. 41-42.
21. SAEED, I. A. M.; EL-NADI, A. H. 1998. USA. Forage sorghum yield and water use efficiency under variable irrigation. *Irrig. Sci.* 18: 67–71.
22. SALAS, P.; LOVERA, E.; FERESIN, O. 1997. Manejo de suelos. *In*: Giorda, L.M. ed. Sorgo granífero. Córdoba, INTA, pp. 12-16 (Cuaderno de Actualización Técnica no 7).
23. STONE, L.R.; GOODRUM, D.E.; JAAFAR, M.N.; KHAN, A.H. 2001. Rooting Front and water depletion depths in grain sorghum and sunflower. *Agron. J.* 93: 1105-1110.
24. _____; SCHLEGEL, A.J.; KHAN, A.H.; KLOCKE, N.L.; AIKEN, R.M. 2006. Water supply:yield relationships developed for study of water management. *J. Nat. Resour. Life Sci. Educ.* 35: 161-173.
25. TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. 1970. Fertilidad de los suelos y los fertilizantes. Barcelona, España, Montaner y Simon. 760 p.
26. TORRECILLAS, M.G.; BERTOIA, L.M.. 2008. Acumulación y calidad de forraje de híbridos de sorgo *Sorghum bicolor* (L.) Moench con diferentes niveles de fertilización nitrogenada. *RAPA.* 28(3): 201-207.
27. VANDERLIP, R.L.; REEVES, H.E. 1972. *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Growth stages of sorghum. *Agron. J.* 64: 13-16.
28. _____. 1993. How a sorghum plant develops. (en línea). s.l., Kansas State University. pp. 1-20. Consultado 6 abr. 2013. Disponible en <http://www.oznet.ksu.edu>.
29. VARVEL, G.E. 1994. Rotation and nitrogen fertilization effects on changes in soil carbon and nitrogen. *Agron. J.* 86: 319-325.
30. ZAMORA, M.; MELÍN, A.; MASSIGOGE, J. 2009. Fertilización nitrogenada de sorgo en el sur de Buenos Aires. Cuadernillo clásico de sorgo Agromercado. 157: 19-23.

IX. ANEXOS

A. ANÁLISIS ESTADÍSTICO. CUADROS ANAVA

1. Altura de planta

Fuente de variación	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-Valor	Significancia
Rep	3	690,6	230,2	2,13	0,1093
Riego	2	3379,8	1689,9	15,66	<0.0001
Rep*Riego	6	3011,9	501,9	4,65	0.0009
N	5	1338,5	267,7	2,48	0.0456
Riego*N	10	1111,7	111,2	1,03	0.4344
Error	45	4855,9	107,9		
Total corregido	71	14388,4			

a. Según tratamiento de N

Dosis N (unidades N)	Media	Desvío estándar
200	70,13 a	4,46
100+50	69,58 ba	4,42
50	68,59 ba	4,36
100	67,5 bac	4,29
50+50	61,12 bc	3,88
S/N	59,01 c	3,75

b. Según tratamiento de riego

Tratamiento	Media	Desvío estándar
Demanda	72,75 a	4,62
Intermedio	68,62 a	4,36
Secano	56,6 b	3,60

2. Porcentaje de materia seca

Fuente de variación	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-Valor	Significancia
Rep	3	14,38	4,79	1,6	0,2032
Riego	2	222,2	111,10	37,04	<0.0001
Rep*Riego	6	36,92	6,15	2,05	0,0782
N	5	40,74	8,15	2,72	0,0315
Riego*N	10	29,47	2,95	0,98	0,4718
Error	45	134,96	3,00		
Total corregido	71	478,65			

a. Según tratamiento de N

Dosis N (unidades N)	Media	Desvío estándar
S/N	18 a	1,76
50+50	17,5 ba	1,71
100	17,17 ba	1,68
50	16,83 bac	1,65
100+50	16,42 bc	1,61
200	15,67 c	1,53

b. Según tratamiento de riego

Tratamiento	Media	Desvío estándar
Secano	19,17 a	1,88
Intermedio	16,75 b	1,64
Demanda	14,87 c	1,45

3. Porcentaje de nitrógeno en planta

Fuente de variación	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-Valor	Significancia
Rep	3	1,81	0,6	5,98	0,0016
Riego	2	2,77	1,38	13,69	<0.0001
Rep*Riego	6	1,46	0,24	2,41	0,0419
N	5	1,73	0,35	3,43	0,0103
Riego*N	10	0,88	0,088	0,88	0,562
Error	45	4,55	0,1		
Total corregido	71	13,21			

a. Según tratamiento de N

Dosis N (unidades N)	Media	Desvío estándar
200	2,65 a	0,20
100	2,57 ba	0,20
100+50	2,47 bac	0,19
50	2,34 bc	0,18
50+50	2,26 c	0,17
S/N	2,24 c	0,17

b. Según tratamiento de riego

Tratamiento	Media	Desvío estándar
Demanda	2,58 a	0,20
Intermedio	2,54 a	0,19
Secano	2,14 b	0,16

4. Producción de materia seca

Fuente de variación	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-Valor	Significancia
Rep	3	37155326,5	12385108,8	3,74	0,0176
Riego	2	114186814,1	57093407	17,22	<0.0001
Rep*Riego	6	110245186,6	18374197,8	5,54	0,0002
N	5	39341706,7	7868341,3	2,37	0,054
Riego*N	10	26589449,8	2658945	0,8	0,6275
Error	45	149204157,9	3315648		
Total corregido	71	476722641,5			

a. Según tratamiento de N

Dosis N (unidades N)	Media	Desvío estándar
200	6906,1 a	234,66
100+50	6903,8 a	234,58
50	6609,8 ba	224,59
100	6338,3 bac	215,37
50+50	5294,4 bc	179,90
S/N	5069,3 c	172,25

b. Según tratamiento de riego

Tratamiento	Media	Desvío estándar
Demanda	7680,8 a	260,99
Intermedio	6279,7 b	213,38
Secano	4600,3 c	156,31