

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN SORGO GRANÍFERO Y SU AJUSTE

por

Matías D´ALESANDRO GALAIN
Pedro YOUNG PARIETTI

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

MONTEVIDEO
URUGUAY

2014

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. Aurora Cerveñansky

Ing. Agr. Omar Casanova

Ing. Agr. Roberto Lingeri

Fecha: 22 de diciembre de 2014

Autor: -----
Matías Dalesandro

Pedro Young

AGRADECIMIENTOS

Para Aurora Cerveñansky, Omar Casanova y todos los que colaboraron de alguna manera en la realización de este trabajo.

A Sully Toledo, y el personal de Biblioteca, quiénes con paciencia y dedicación nos ayudaron en la conformación de la misma.

A nuestras familias y amigos por su noble estímulo y apoyo durante toda nuestra formación agronómica.

Y a todas aquellas personas que hemos conocido durante todos estos años de carrera y que nos acompañaron en este precioso viaje.

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>	2
2.1 ECOFISIOLOGÍA DEL CULTIVO	2
2.1.1 <u>Fenología</u>	2
2.1.2 <u>Radiación</u>	4
2.1.3 <u>Temperatura</u>	4
2.1.4 <u>Agua</u>	5
2.2 TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN.....	6
2.2.1 <u>Fecha de siembra</u>	6
2.2.2 <u>Población y densidad</u>	7
2.2.3 <u>Nutrientes</u>	8
2.2.4 <u>Cultivares</u>	9
2.3 NITRÓGENO Y RENDIMIENTO DE SORGO GRANÍFERO	10
2.3.1 <u>Mecanismos de ganancia y pérdidas de nitrógeno en el suelo</u>	10
2.3.1.1 Pérdidas por volatilización.....	10
2.3.1.2 Pérdidas por lixiviación	11
2.3.1.3 Pérdidas por desnitrificación	11
2.3.1.4 Ganancias de nitrógeno	12
2.3.2 <u>Función en la planta</u>	13
2.3.3 <u>Absorción y translocación</u>	13

2.3.4 <u>Respuesta al agregado de nitrógeno</u>	15
2.3.5 <u>Momento de agregado de nitrógeno</u>	17
2.3.6 <u>Modelos de respuesta</u>	17
2.3.6.1 Modelo Lineal Plateau - Ley del Mínimo	18
2.3.6.2 Modelo Mitscherlich – exponenciales.....	19
2.3.6.3 Ecuaciones Polinomiales – cuadrática.....	20
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	22
3.1 AJUSTE DEL MODELO DE RESPUESTA.....	22
3.2 EXPERIMENTO DE VALIDACIÓN	24
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	27
4.1 DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN.....	27
4.2 SITUACIÓN AGROCLIMÁTICA.....	28
4.2.1 <u>Precipitaciones</u>	29
4.2.2 <u>Temperatura</u>	31
4.3 RESULTADOS DE RENDIMIENTO EN GRANO	31
4.4 EFICIENCIA DE CONVERSIÓN.....	37
5. <u>CONCLUSIONES</u>	41
6. <u>RESUMEN</u>	42
7. <u>SUMMARY</u>	43
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	44
9. <u>ANEXOS</u>	50

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Ubicación geo-referenciada de los sitios experimentales.	23
2. Parámetros químicos de suelo a la instalación (promedio del bloque; profundidad de 0-20 cm).	24
3. Contenido de N-NO ₃ en el suelo en parcelas grandes a V4-5 (promedio de bloque; profundidad de 0-20 cm).	25
4. Registros por mes de precipitación del período en la estación Libertad y sus medias históricas en la estación San José	29
5. Rendimiento de grano en kg/ha en función de la dosis inicial, sin ajuste en V4-5	34
6. Resumen de eficiencias de conversión.....	37
7. Eficiencia económica	38
Figura No.	
1. Crecimiento (peso seco) en base a la producción total de distintas partes de la planta de sorgo en función del tiempo.....	3
2. Efecto de la distancia entre hileras (cm) en el rendimiento de sorgo	7
3. Relación entre rendimiento relativo y contenido de nitrato a V4-5 en suelo (ppm); valores promedios de tres años (NC = 21,39).....	27
4. Relación entre rendimiento relativo y contenido de nitrato a V4-5 en suelo (ppm); valores promedios de tres años (NC = 19,75).....	28
5. Registro del período de temperatura máxima, mínima y media por mes y la temperatura media histórica del mes.....	31

Gráfico No.

1. Rendimiento de grano en kg/ha en función del ajuste en V4-5 cuando no se fertilizó a la siembra	32
2. Rendimiento de grano en kg/ha en función del ajustes en V4-5 cuando aplicaron 40 UN a la siembra.....	33
3. Rendimiento de grano en kg/ha en función del ajustes en V4-5 cuando se aplicaron 80 UN a la siembra.....	34
4. Rendimiento de grano en kg/ha para los tratamientos sin ajuste de nitrógeno en V4-5	35
5. Rendimiento promedio de grano de los tratamientos con ajuste óptimo en V4-5, según el análisis de suelo.	36
6. Número de tratamientos según eficiencia de conversión alta, media o baja.....	40

1. INTRODUCCIÓN

La incesante búsqueda de mayores rendimientos y mejor utilización de recursos ha sido la principal causa del continuo progreso de los sistemas agrícolas. Esto ha llevado a que con el tiempo surjan nuevos materiales genéticos de mayor potencial. La caracterización de los requerimientos nutricionales de las plantas y el conocimiento del comportamiento de los minerales en el suelo, son fundamentales para lograr mejor eficiencia en las prácticas de manejo de los cultivos, especialmente en lo que respecta a la nutrición mineral.

Tradicionalmente el cultivo de sorgo en los sistemas agrícolas ha sido una buena opción para los productores dada su condición de cultivo doble propósito y cola de rotación. Sin embargo, se espera un aumento en el área del cultivo en las próximas zafas fundamentalmente por la nueva normativa de Conservación, Uso y Manejo de Suelos impuesta por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, la demanda del grano de sorgo como alimento en los sistemas ganaderos y de su utilización en la elaboración de biocombustibles.

Éstas entre otras características de la producción agrícola actual, exigen conocimientos sobre los criterios y esquemas de fertilización aplicados al cultivo.

El objetivo de éste estudio fue:

- a) Ajustar un modelo de respuesta al agregado de nitrógeno durante el desarrollo de la cuarta/quinta hoja (V4-5).
- b) Validación a campo del comportamiento de diferentes dosis de nitrógeno y su fraccionamiento.

La metodología propuesta nos posibilitaría avanzar en la toma de decisiones a nivel regional, permitiendo una rápida adopción de las tecnologías existentes a nivel predial, llevándonos a una utilización mas eficiente y económica del insumo nitrógeno, basada en criterios objetivos (índices de disponibilidad), que bajen los costos de producción, sin perder rendimiento potencial y manteniendo de un sistema sostenible.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 ECOFISIOLOGÍA DEL CULTIVO

2.1.1 Fenología

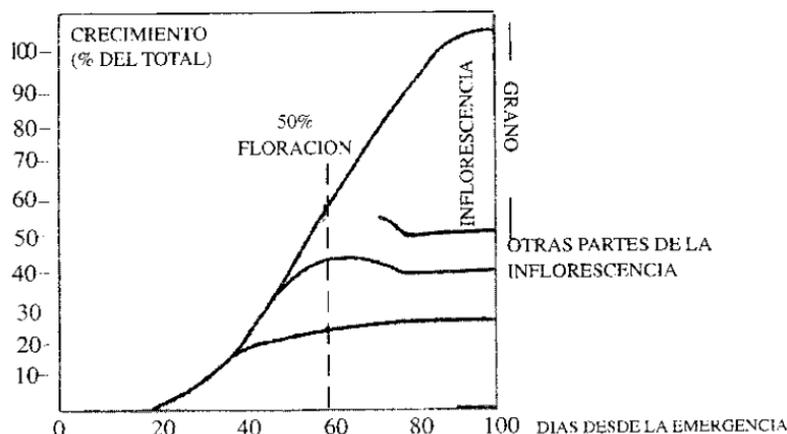
La producción de biomasa de un cultivo depende de la tasa de crecimiento del mismo, cuyos componentes ecofisiológicos son la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA), la eficiencia en la intercepción (E_i) de la luz solar y la eficiencia de conversión (E_c) de la energía lumínica en química. Uno de los principales objetivos del manejo de cultivos es lograr que éstos aprovechen la mayor cantidad posible de radiación solar disponible: fuente de energía utilizada, a través de la fotosíntesis, para producir biomasa.

La E_i es referida habitualmente en función de dos parámetros; el Índice de área foliar (IAF) y el coeficiente de extinción lumínica (k). El IAF varía con las condiciones ambientales dónde crece el cultivo, a medida que avanza el ciclo del mismo. Para cada cultivo existe un IAF crítico que corresponde al mínimo valor de IAF que intercepta el 90-95% de la radiación incidente. El k depende de las propiedades ópticas del canopy (ángulo de inserción de las hojas con respecto a la vertical), y es particular de cada especie (Echeverría y García, 2005).

Por su parte, las especies de metabolismo fotosintético de tipo C4 poseen ciertas características fisiológicas que le confieren ventajas en la E_c comparado a las especies de metabolismo C3. Dado que el sorgo es de tipo C4, éste posee alta eficiencia en el uso de agua y nitrógeno, fotosíntesis máxima con temperaturas elevadas, bajo punto de compensación por CO_2 y alto punto de compensación por luz (Carrasco, 2004).

En cuanto al cultivo de sorgo, la escala de Vanderlip es la más divulgada para la descripción de los distintos estadios vegetales contando con 9 estados de desarrollo (0 = emergencia; 9 = madurez fisiológica). Esta escala diferencia etapas fenológicas del cultivo en donde ocurren cambios en las tasas de crecimiento que definen la curva de producción de materia seca (Carrasco, 2004, Figura 1).

Figura 1. Crecimiento (peso seco) en base a la producción total de distintas partes de la planta de sorgo en función del tiempo.



Fuente: adaptado de KSU, por Carrasco (2004).

Cabe aclarar que la Figura 1 corresponde a información generada en el hemisferio norte (Kansas, EE.UU.); para nuestras condiciones de cultivo, el aumento de la tasa de crecimiento sucede antes de los veinte días post-emergencia.¹

Luego de la emergencia del cultivo, alcanzar el IAF crítico en el menor tiempo posible es uno de los objetivos de manejo básicos para maximizar la producción de materia seca. Sin embargo, para maximizar la producción de granos, es de suma importancia alcanzar el IAF crítico al menos al inicio del período de determinación del rendimiento (Echeverría y García, 2005).

Con respecto a lo anterior, desde la emergencia hasta V5-V6 (iniciación floral) se construye y determina la producción foliar. En esta fase inicial las tasas de crecimiento son bajas y el período es relativamente corto. A partir de V5-V6 y hasta floración se da la mayor tasa de crecimiento y producción de materia seca. Esta etapa es la más importante en la definición de rendimiento ya que se determina el número de estructuras (granos/m²) que se van a llenar en la siguiente etapa. A su vez, a partir de V5 hay una gran demanda de nutrientes, donde la planta toma aproximadamente el 70% de los nutrientes requeridos (Bernardis et al. s.f., Ernst, citado por Harreguy 2011).

¹ Casanova, O. 2014. Com. personal.

A continuación, en la fase de llenado de grano (post-floración), el 90% de la materia seca producida se destina a definir el peso de grano. Sin embargo, el Índice de Cosecha (proporción de la biomasa total convertida en grano) ronda el 50% ya que depende de la cantidad de granos en crecimiento, la duración de este período y el estado sanitario general del cultivo (Ernst, 2012).

2.1.2 Radiación

Dada la condición C4 de la especie, la radiación es un parámetro fundamental considerando la importancia de la fotosíntesis durante el llenado de grano y su peso sobre el rendimiento en grano (Carrasco, 2004). La fecha de siembra es el principal factor de manejo que modifica la radiación fotosintéticamente activa incidente, y por lo tanto, la intercepción de la misma durante el ciclo del cultivo y en las etapas críticas. Estudios realizados por Fisher y Wilson, citados por Carrasco (2004), señalan que se reduce 1% el rendimiento por cada 1% menos de radiación.

A su vez, las plantas de sorgo poseen a su favor un arreglo de hojas o arquitectura de canopeo que le permite una mayor capacidad de captación de luz, asociado a un arreglo opuesto con un bajo ángulo de inserción de las mismas (Ayala et al., citados por Algorta y Carcabelos, 2007).

2.1.3 Temperatura

La temperatura que registra un suelo depende del balance entre la tasa de absorción de radiación, la capacidad calorífica del suelo y la tasa de radiación disipada (Echeverría y García, 2005). A nivel de campo, la temperatura óptima del suelo para una correcta germinación se encuentra entre 18 y 21°C; requiriendo una temperatura mínima de 10°C. En estas latitudes, dicha temperatura mínima se alcanzan entre el 10 y 22 de septiembre, lográndose el rango óptimo a principios de noviembre (Ernst, 2004).

Si bien nuestro país es pequeño existen variaciones en la temperatura media del aire diurna y nocturna, dado la continentalidad del clima, lo que provoca variaciones en el largo de ciclo del cultivo. Considerando una temperatura base de 15°C no es posible realizar el cultivo con menos de 600 UT (Unidades Térmicas) en la estación de crecimiento (Corsi 1982, Carrasco 2004).

Por otra parte, debido a que el sorgo es una especie C4 de origen tropical, sensible a la temperatura, ésta afecta tanto el comportamiento fisiológico como el potencial productivo. Por esta razón, se puede considerar como el parámetro climático que determina la estación de crecimiento; siendo la temperatura media óptima del aire de 24°C (Ernst, 2004). A su vez, según Carrasco (s.f.), en nuestras condiciones parecería tener mayor importancia para el desarrollo las bajas temperaturas (mínimas 15.5°C) que las altas (óptima entre 28 y 30°C).

2.1.4 Agua

En cuanto a la disponibilidad hídrica, si bien en todas las regiones hay un período de deficiencia de agua entre noviembre y febrero, para el sorgo todo el país tiene aptitud preferencial en cuanto a requerimientos hídricos (Corsi, 1982). En cultivos de verano es fundamental la disponibilidad de agua ya que se siembran en una época en que es probable que ésta sea escasa y que además la evapotranspiración potencial es muy alta (Gutiérrez y Marchesi, 1977).

Referido a la producción de grano, hay momentos críticos en los que no debe faltar el agua. Estudios realizados por el CIAAB (1974) indicaron que el mayor requerimiento de agua por el cultivo comienza con la formación de la panoja y culmina en grano lechoso. Para algunos investigadores, éste sería en torno a la floración (Keese, citado por Carrasco, 2004), mientras que para otros sería en el embuche (Herron et al., Stone et al., citados por Algorta y Carcabelos, 2007).

Asimismo, de los resultados obtenidos por Molino et al. (2012) concluyeron que un 84% de la variación del rendimiento en grano está explicado por la disponibilidad de agua en el período crítico.

A pesar de ello, la planta de sorgo posee características morfo-fisiológicas que le confiere adaptabilidad a déficit hídricos. Éstas son:

- Un sistema radicular extenso, el cual permite incrementar el volumen de suelo explorado (Bennett y Tucker, 1986).
- El sistema aéreo posee características tales que permiten reducir las pérdidas de agua. Presentan tallos y hojas recubiertos por una capa de cera, una alta densidad estomática, entre otras peculiaridades (Carrasco, 2004).

- Capacidad de permanecer en estado latente durante cierto tiempo y reanudar el crecimiento cuando las condiciones vuelven a ser favorables (CIAAB, 1974).

A su vez, bajo condiciones de riego o buena disponibilidad de agua, existe una gran respuesta en rendimiento dado su carácter C4 (Carrasco, s.f.).

2.2 TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN

2.2.1 Fecha de siembra

La época de siembra constituye uno de los factores más importantes en la determinación del rendimiento. Estudios realizados por Gutiérrez y Marchesi (1977) determinaron que un 34% de la variación del rendimiento a campo podía ser explicado por este factor. Como se mencionó anteriormente, la fecha de siembra determina la cantidad de radiación interceptada durante todo el ciclo del cultivo, y particularmente, en el período crítico.

Asimismo, Irigoyen y Perrachón (2007) destacaron que la temperatura del suelo a campo para que haya una correcta germinación debería ser de 18°C, por lo que se aconsejan siembras a mediados de noviembre para Uruguay en años normales. La temperatura del suelo también afecta el alargamiento del sistema radical y por consiguiente, la capacidad de exploración del suelo en etapas tempranas de desarrollo. Esto puede comprometer posteriormente la absorción de agua y nutrientes minerales (Echeverría y García, 2005).

Sin embargo, otros estudios indicaron que los mayores rendimientos se alcanzan con siembras a mediados de octubre. Atrasos en la fecha de siembra representaron pérdidas de rendimiento en un 25% a mediados de noviembre y 75% a mediados de diciembre. Siembras tardías corren el riesgo de deprimir el rinde debido a temperaturas bajas durante la floración, heladas tempranas durante el llenado de grano y condiciones de humedad desfavorables (CIAAB 1974, Gutiérrez y Marchesi 1977).

La época de siembra también regula la velocidad de desarrollo (duración de cada fase) del cultivo mediado por la amplitud térmica; siendo significativo el efecto de las bajas temperaturas nocturnas en los primeros estadios de desarrollo en siembras tempranas.

2.2.2 Población y densidad

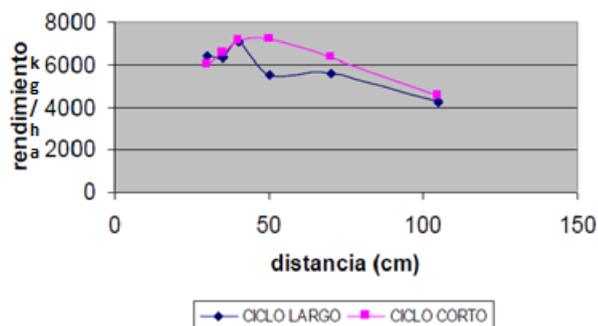
Otra variable importante en el cultivo de sorgo es el número de plantas/ha, ya que determinará la competencia por luz, agua y nutrientes entre plantas a lo largo de todo el ciclo.

Los resultados de los ensayos experimentales de Antelo y Mermot (1988) indicaron que aumentos en la densidad producen mayores rendimientos, explicado por mayor número de panojas/superficie. Sin embargo, con densidades supra-óptimas si bien el número de panojas/superficie es mayor, es esperable caídas en el rendimiento por panoja debido a menor peso de las mismas; producto de menos granos/panoja ya que el PMG (peso de mil granos) permanece relativamente estable.

A su vez, los mismos autores indicaron que acortando la distancia entre hileras de 76 a 56 centímetros aumentó el rendimiento en un 43%, explicado por mayor número de granos/panoja.

Por otra parte, Algorta y Carcabelos (2007) concluyeron que no existen diferencias significativas en los rendimientos de cultivos sembrados a 50 y 25 centímetros. En la Figura 2 se observa que los mayores rendimientos se obtienen entre 40 y 50 centímetros de distancia entre hileras.

Figura 2. Efecto de la distancia entre hileras (cm) en el rendimiento de sorgo.



Fuente: Ernst (2012).

Trabajos de Antelo y Mermot, citados por Ernst (2004) demostraron a nivel de chacra que el óptimo se situó por encima de las 300.000 plantas/há,

mientras que Carrasco, citado por Ernst (2004), indicó que para años secos y húmedos el óptimo se ubicó en 300.000 pl/há.

Finalmente, cabe señalar que el sorgo es capaz de compensar entre los componentes del rendimiento para distintas circunstancias ambientales, particularmente panojas/há y granos/panoja, en variadas densidades y distancia entre hileras.

2.2.3 Nutrientes

En nuestras condiciones de producción el sorgo responde principalmente al nitrógeno y al fósforo, sin embargo, en chacras viejas donde hubo continua extracción de nutrientes por las rotaciones agrícolas, es de esperar respuesta a otros nutrientes como potasio y azufre.

Los suelos agrícolas del Uruguay, en general, son deficientes en fósforo. Por su parte, Díaz y García, citados por Ernst y Siri (2004), revelan que en suelos con más de 15 ppm de P_2O_5 (Bray I) no se espera respuesta al agregado de este nutriente en sorgo granífero.

En cuanto a la relación entre nitrógeno y fósforo, se encuentra una interacción importante y positiva. Luego de la germinación, el sorgo requiere de fósforo disponible para lograr un crecimiento vigoroso de sus raíces y parte aérea; ya que cumple un rol muy importante en la determinación del rendimiento en las fases iniciales de crecimiento. En cuanto a la respuesta al nitrógeno, investigadores afirman que un 28% de la variación del rendimiento podía ser explicado por este factor (Gutiérrez y Marchesi 1977, Irigoyen y Perrachón 2007).

Estudios citados por Gutiérrez y Marchesi (1977), llevados a cabo en el CIAAB, mostraron diferentes respuestas al agregado de N en función del año, fundamentalmente debido a la disponibilidad de agua. Por otra parte, según Carrasco (s.f.) el cultivo de sorgo no presenta diferencias muy marcadas entre años húmedos y secos en cuanto a la respuesta de la fertilización.

El cultivo antecesor es otro factor que condiciona la respuesta del sorgo a la fertilización nitrogenada. El mismo afecta la disponibilidad de agua y el contenido de nitratos al momento de la siembra (Bernardis et al., s.f.).

Un hecho destacado en experimentos realizados en La Estanzuela en los veranos de 1972/73 y 1973/74 fue la interacción entre la población y el nivel de fertilización para lograr los máximos rendimientos. Cuando no se fertilizó el máximo rendimiento se obtuvo con 360,000 plantas/ha; mientras que la población óptima para aplicaciones en conjunto de 180 unidades de fósforo, 180 unidades de nitrógeno y 60 unidades de potasio fue de 210.000 plantas/ha.

Estos experimentos evidenciaron que el comportamiento de las poblaciones en respuesta a la fertilización posiblemente estuvieron explicados por un mayor macollaje por planta y un gran desarrollo del área foliar. De ese modo se logró con menos plantas una buena cantidad de panojas por superficie y un área foliar suficiente para concretar el rendimiento (Labella, 1976).

A la hora de tomar decisiones sobre manejo de la fertilización, en cuanto a momentos y forma de aplicación y fuente del fertilizante, hay que tener en cuenta que la disponibilidad nutricional debe ser suficiente para permitir alcanzar un IAF crítico al inicio del período de determinación del rendimiento; en donde no se debe limitar la tasa de crecimiento del cultivo, ni la duración del área foliar (Echeverría y García, 2005).

2.2.4 Cultivares

La elección de cultivar como medida de manejo ha tomado cada vez mayor relevancia debido principalmente a dos aspectos: aumento en la oferta de cultivares y mayor intensificación en los sistemas productivos. El largo de ciclo, la sanidad, el potencial de producción, el contenido de taninos y otros caracteres deseables son los principales elementos tenidos en cuenta en los programas de mejoramiento genético.

Un dato relevante es que la gran mayoría de los híbridos actuales son insensibles al fotoperíodo, es decir, la fase de diferenciación de hojas no está mediada por las horas luz sino que, su desarrollo está impulsado principalmente por la temperatura (Pioneer, s.f.).

Los productores demandan híbridos adaptados a la región de producción con cierta tolerancia a problemas abióticos y bióticos, que protegerán los potenciales de rendimiento y su estabilidad entre años. A su vez, la calidad del grano también es de suma importancia (Rooney, 2004). Por lo tanto realizando una buena elección del cultivar, en conjunto con las otras

medidas de manejo, podemos potencializar las expectativas de obtener buenos rendimientos.

2.3 NITRÓGENO Y RENDIMIENTO DE SORGO GRANÍFERO

2.3.1 Mecanismos de ganancia y pérdidas de nitrógeno en el suelo

El manejo del suelo refiere a la manipulación de los factores edáficos que afectarán la producción del cultivo. Esto significa que las condiciones físicas, químicas y biológicas deben ser óptimas para el crecimiento del mismo. El manejo de los residuos, los sistemas de cosecha y las prácticas de labranza están relacionados con el manejo del suelo (Bennett y Tucker, 1986).

De este modo, los sistemas con siembra directa ofrecen menores contenidos de $N-NO_3$ que aquellos con roturación de suelo producto de una menor mineralización. Sin embargo con dosis de 50 kg/ha de N agregadas las producciones en siembra directa son superiores a las del laboreo convencional (Bernardis et al., s.f.).

En cuanto a la dinámica de nitrógeno, según Bennett y Tucker (1986), una serie de hechos pueden suceder post aplicación que están relacionadas mayoritariamente con las condiciones del suelo. Factores como la temperatura, la textura y las condiciones físicas, en interacción con las lluvias y la fuente de nitrógeno aplicado, afectan la disponibilidad en el corto y mediano plazo. Es decir, dadas ciertas condiciones el nitrógeno puede moverse en el suelo o perderse.

2.3.1.1 Pérdidas por volatilización

Al igual que para los otros mecanismos de pérdidas, existen factores que afectan la magnitud de las mismas tales como; pH, temperatura, concentración de amonio, velocidad del viento, características del suelo, modo de aplicación del fertilizante (en especial fuentes amoniacales) y la humedad del suelo. Las pérdidas por volatilización suceden por medio del amoníaco y en los primeros centímetros del suelo.

Basado en revisiones de resultados de experimentos utilizando nitrógeno marcado Hauck, citado por Perdomo y Barbazán (1999), estimó que las pérdidas por el proceso de volatilización están en el orden del 15 al 20% del nitrógeno aplicado.

Por otra parte, diversos estudios indicaron que la volatilización para suelos agrícolas bien drenados de la zona Pampeana es pequeña cuando se aplican fertilizantes en forma de nitratos. A su vez, se destaca que cuando los fertilizantes son incorporados las pérdidas son bajas, mientras que cuando no se incorporan las pérdidas por volatilización pueden representar entre un 5% y un 10% del nitrógeno agregado (Bono y Romano, 2007).

2.3.1.2 Pérdidas por lixiviación

Dada la carga negativa del NO_3^- , éste no es retenido por la fracción coloidal del suelo y es removido hacia los horizontes inferiores con el movimiento que el agua experimenta a través del perfil. El proceso de lixiviación genera una dispersión en la concentración de nitrato, a medida que el agua mueve el nutriente hacia abajo (Perdomo y Barbazán, 1999).

Otros autores afirman que las mayores pérdidas por éste mecanismo se pueden originar cuando se utilizan altas dosis de fertilizante (y en especial fuentes nítricas), cuando ocurren precipitaciones abundantes y/o cuando el consumo por parte del cultivo es bajo. A su vez, estas condiciones actúan en interacción con otros factores tales como humedad y tipo de suelo, presencia de rastrojo en la superficie y tipo de laboreo (Perdomo y Barbazán 1999, Bono y Romano 2007).

2.3.1.3 Pérdidas por desnitrificación

La desnitrificación es un proceso desasimilativo que ocurre en condiciones anaeróbicas del suelo, en el cual por lo general el producto es N_2 u óxido nitroso que se pierden hacia la atmósfera, a partir del NO_3^- (nitrato). Los principales factores del suelo que lo afectan son el drenaje, pH y temperatura, pero también depende del tipo de fertilizante y la ubicación del mismo y de la disponibilidad de sustratos orgánicos para los microorganismos (UdelaR. FA, 2007).

Este tipo de pérdidas, son despreciables cuando la humedad del suelo está por debajo del 60% de la capacidad de retención hídrica. A su vez, se destaca que la información existente es escasa como para determinar factores de corrección de dosis de fertilizante; pudiendo considerar que las pérdidas bajo laboreo convencional son despreciables, mientras que para siembra directa se estiman alrededor del 5% (Bono y Romano, 2007).

Estudios realizados por Hauck bajo condiciones experimentales utilizando nitrógeno marcado estimaron que las pérdidas por este proceso oscilan entre un 25-30 % del N aplicado (Perdomo y Barbazán, 1999).

Sin embargo, considerando la alta evapotranspiración y las bajas precipitaciones esperables en la estación de crecimiento del cultivo de sorgo, las pérdidas por esta vía no serían muy frecuentes.

2.3.1.4 Ganancias de nitrógeno

Existen múltiples mecanismos de ganancia de N del sistema: aporte por lluvias, fijación simbiótica y no simbiótica, fertilizantes, abonos orgánicos y mediante el proceso de mineralización de restos frescos. El proceso de mineralización es uno de los mecanismos más importantes de aporte de nitrógeno al sistema en los cultivos de verano.

Algunos autores definen la mineralización como el proceso de pasaje de N orgánico a amonio (NH_4^+); y definen como nitrificación al pasaje de amonio a nitrato (NO_3^-). Otros en cambio, definen a la mineralización como dos procesos, amonificación y nitrificación (Perdomo y Barbazán 1999, Echeverría y García 2005).

La intensidad del proceso de mineralización es afectada por numerosos factores, entre ellos los más importantes, el tipo de sustrato orgánico, la temperatura y humedad del suelo. La máxima mineralización ocurre cuando el agua ocupa entre el 50 y 70% del espacio poroso y la temperatura óptima del suelo para la actividad microbiana se encuentra en el rango de 25 a 35°C (Echeverría y García 2005, Havlin et al. 2005).

A campo, raramente se dan todas las condiciones para que la mineralización sea óptima y a su vez, los distintos tipos de suelos tienen diferente potencial de mineralización (carga bacteriana y porosidad). El producto final, amonio, tiene varios destinos como ser absorbido por las plantas, retenido por minerales arcillosos, nitrificado e incluso inmovilizado (Perdomo y Barbazán, 1999).

Por otra parte, los principales factores que afectan la nitrificación son la temperatura y el pH, la presencia de oxígeno y la concentración de amonio del suelo. Dado que las reacciones de la nitrificación son más rápidas que las de

mineralización (aminización y amonificación), el nitrato es la forma de N mineral que se acumula en el suelo (Perdomo y Barbazán, 1999); y que a su vez corre riesgos de ser perdido en profundidad. Asimismo, Echeverría y García (2005) a través de experimentos con incubaciones aeróbicas de larga duración afirman que la amonificación es el paso limitante en el proceso de mineralización.

2.3.2 Función en la planta

La disponibilidad de nutrientes minerales afecta el comportamiento de los componentes ecofisiológicos durante el crecimiento de los cultivos. A su vez, el nitrógeno, el fósforo y el azufre son constituyentes esenciales de los compuestos orgánicos de los vegetales (Echeverría y García, 2005).

El nitrógeno, si no consideramos el agua, es el nutriente más importante en el desarrollo vegetal dada su abundancia en las biomoléculas más importantes de la materia viva. Según Bonilla (2000), dentro de la planta, el N se distribuye en tres grupos: compuestos de elevado peso molecular (proteínas y ácidos nucleicos), N-orgánico soluble (aminoácidos, aminas, amidas, etc.) y N-inorgánico (principalmente iones nitrato y amonio).

Éste es el componente esencial de mayor efecto sobre el crecimiento vegetal y es constituyente de muchas moléculas tales como la clorofila, aminoácidos esenciales, proteínas, enzimas, núcleo-proteínas, hormonas y ATP. Además es fundamental para varios procesos metabólicos como la utilización de carbohidratos. Los contenidos de N en planta expresados en relación a su peso seco total oscilan entre 1 y 5% (Perdomo y Barbazán, 1999).

2.3.3 Absorción y translocación

La característica de ramificación profusa del sistema radicular del sorgo no solo le confiere mayor resistencia a estreses hídricos sino que también le proporciona alta eficiencia de utilización de nutrientes. Esta exploración intensa que logra la hace una de las especies con mayor superficie radicular por medida de volumen del suelo (Carrasco, 2004).

Los iones alcanzan la zona de absorción de la raíz mediante tres vías: difusión a través de la solución salina del suelo, arrastrados por el movimiento del agua o entran en contacto a medida que la raíz crece (Fernández y Maldonado, 2000); es decir, difusión, flujo masal o intercepción radicular.

El flujo masal transporta los solutos mediante un flujo convectivo de agua desde el suelo a las raíces. La cantidad de nutriente transportado depende de la tasa de flujo de agua (dependiente de la tasa de transpiración de la planta) y de la concentración promedio del nutriente en la solución acuosa del suelo. Las características per se del nitrógeno interaccionando con las características del suelo hacen que, por lo general, el flujo masal explique la mayor parte de la llegada de éste hasta las raíces, dado que tiene elevada solubilidad en la solución del suelo (Echeverría y García, 2005).

El nitrato (mayor parte del N-inorgánico del suelo) es absorbido contra gradiente electroquímico implicando un gasto de energía metabólica (absorción activa). Una vez dentro de la raíz, puede ser reducido y asimilado o ser transportado a la parte aérea de la planta vía xilema para asimilarlo. Los aminoácidos provenientes de cualquiera de estos lugares de almacenamiento pueden ser depositados en el floema y ser translocados (Perdomo y Barbazán 1999, Luttage y Higinbotham, citados por Echeverría y García 2005).

Por su parte el amonio, ligado al complejo de intercambio catiónico, se encuentra en cantidades mucho menores que el nitrato. La absorción se realiza a través de mecanismos pasivos sin gasto de energía. Una vez dentro de la planta, el amonio puede ser poco almacenado porque es tóxico. Para evitar esto, debe ser incorporado rápidamente a esqueletos carbonados o aminoácidos y luego transportado vía xilema en forma de compuestos orgánicos aminados (Perdomo y Barbazán 1999, Maldonado et al. 2000, Luttage y Higinbotham, citados por Echeverría y García 2005).

Los nutrientes se distribuyen desde la raíz por toda la planta a través del xilema, impulsados por la corriente ascendente de agua generada por el flujo de transpiración (Fernández y Maldonado, 2000).

La proporción asimilada en raíces o parte aérea depende de numerosos factores. Dentro de la planta el N es muy móvil, pudiéndose redistribuir o translocar, independientemente de la magnitud de suministro de N que el cultivo esté recibiendo desde el suelo. A su vez, la vacuola celular constituye el principal sitio de almacenamiento de nitrato (Perdomo y Barbazán 1999, Maldonado et al. 2000).

Conforme a la acumulación de N en la planta en función del tiempo, según Perdomo y Barbazán (1999) éste sigue una curva sigmoide. En las

primeras etapas de desarrollo la acumulación es escasa, pero luego en el período de activo crecimiento la absorción de este nutriente es máxima; hasta que finalmente la tasa de absorción de N se reduce. La representación gráfica de la acumulación de MS de un cultivo en función del tiempo tiene comportamiento similar solo que la acumulación de N antecede a esta última.

2.3.4 Respuesta al agregado de nitrógeno

Para lograr comprender la respuesta al agregado de nitrógeno debemos considerar varios aspectos. Diferentes variables como la disponibilidad de nutrientes del suelo, la demanda del cultivo, la eficiencia de la fertilización y el rendimiento potencial esperado para el cultivo son importantes a la hora de realizar un esquema de fertilización nitrogenada (Bernardis et al., s.f.).

En este sentido, destacaron que la respuesta al nitrógeno está muy relacionada a la historia de chacra y condicionada por el nivel de enmalezamiento y las características del año. Sin embargo, diversos ensayos con sorgo granífero demostraron que independientemente del año y de la historia de chacra, existe una respuesta positiva al agregado de nitrógeno hasta por lo menos 30-40 unidades de N/ha (CIAAB 1972, 1975, Ghisellini y Holtz 1985, Elordoy y Forteza 1986, Arias y Boggio 1987, Torres 1996, Marchesi y Gutiérrez 1997, Carrasco, citados por Ernst y Siri 2004).

Por otra parte, estos autores afirmaron que la respuesta del sorgo granífero a la fertilización nitrogenada está reflejada principalmente por un aumento del número de granos/panoja; coincidiendo con lo dicho por Carrasco (Ernst y Siri, 2004).

A nivel nacional - cuenca lechera sur - estudios realizados recientemente por Harreguy (2011) demostraron que para la mayoría de los sitios evaluados se encontró relación entre la dosis de fertilizante y el rendimiento en un rango de 15 a 25 kg/ha de grano por cada kg de fertilizante agregado. También de estos ensayos concluyó que existe relación entre la concentración de nitrógeno en el grano con la dosis de fertilizante agregado y que a su vez mejora la cantidad de N absorbido. En cuanto a la variable número de panojas/m², no encontraron una tendencia coherente con el factor fertilización nitrogenada.

En trabajos publicados por Díaz en 1976, realizados por Capurro sobre suelos de la formación Libertad, obtuvieron respuestas de 15 kg de grano por cada kg de nitrógeno agregado para chacras viejas (5 o más años de agricultura). Mientras tanto, en chacras nuevas el mismo autor destaca que las respuestas fueron escasas o nulas (Ghisellini y Holtz, 1985).

Otros experimentos realizados en Minas Gerais (Brasil) demostraron que ante aumentos crecientes en la dosis de N se produjeron aumentos significativos en la concentración de N y P en grano mientras que el K no varió significativamente. A su vez, destacaron que ante aumentos en las dosis de N se produjeron aumentos en el rendimiento, en el número de panojas, en la altura de planta y en el número de granos (Silveira et al., 1980). Este último efecto coincide con lo citado por Carrasco anteriormente y se subraya como el de mayor efecto ante el agregado de N.

En cuanto a las fuentes de nitrógeno utilizadas, Havlin et al. (2005) mencionan que el crecimiento de la planta es favorecido cuando se fertiliza con fuentes nítricas y amoniacales en comparación a la utilización de una única fuente. Mientras tanto, Harreguy (2011) concluyó que para las variables rendimiento, concentración y absorción de N en grano y número de panojas/m² las distintas fuentes empleadas (a una misma dosis equivalente a 40 UN) mostraron un comportamiento similar.

Por otra parte en los estudios realizados por Ghisellini y Holtz (1985), concluyeron que el agregado de N en términos de respuesta en kg grano/ha resultó bajo. Sin embargo, existen diferencias significativas entre las dosis utilizadas y a su vez destacan que el rendimiento y la respuesta promedio son muy dependientes de las condiciones hídricas del año y de la competencia de las malezas sobre los tratamientos; coincidiendo con lo que expresa Ernst y Siri (2004). También se enfatiza en la interacción que tiene el agregado de N con la población y con el híbrido a la hora de obtener una respuesta en rendimiento.

Finalmente, en cuanto a la importancia que tiene el agregado de N frente a la respuesta en materia seca relativizado con el Índice de Cosecha, Ghisellini y Holtz (1985), confirmaron que este parámetro no varía con las diferentes dosis de N; demostrando en el sorgo la constancia de esta medida para diversas condiciones.

2.3.5 Momento de agregado de nitrógeno

La importancia del momento de agregado de nutrientes radica en el impacto que puede tener sobre el rendimiento final del cultivo. A su vez, es fundamental considerar las interferencias que puede tener por los procesos de pérdidas antes mencionados y por el crecimiento de malezas dentro del cultivo.

La gran demanda de N del cultivo de sorgo comienza a partir de V5 (20-30 días post emergencia) hasta 10 días previo a la floración; en dónde toma aproximadamente el 70% de los nutrientes requeridos (Melin y Zamora, 2007). Por su parte Elhordoy y Forteza, citados por Ernst y Siri (2004), destacaron que la evolución del área foliar no se ve afectada significativamente por el agregado de N a la siembra, pero sí 30 días después.

De este modo, los mismos autores enfatizaron que la falta de respuesta al N en el mes de crecimiento junto con la alta respuesta obtenida posteriormente sugiere la fertilización diferida inmediatamente antes de la elongación. Por otra parte, otros autores no encontraron diferencias significativas difiriendo el nitrógeno en situaciones de chacra vieja ni en año seco (Ernst y Siri, 2004).

Las diferencias encontradas en cuanto a la respuesta observada se atribuyeron al nivel de enmalezamiento de la chacra; logrando mejor contención del cultivo frente al potencial de interferencia de malezas aportando el nitrógeno de forma tardía. En la fase de elongación el cultivo alcanza una rápida cobertura del suelo gracias a las altas tasas de crecimiento, invirtiendo la relación de competencia con las malezas (Ernst y Siri, 2004).

2.3.6 Modelos de respuesta

Las curvas de respuesta son consecuencia de la interacción entre plantas y su entorno a medida que un nutriente u otros factores son variados sistemáticamente. A pesar de que las plantas responden al ambiente en su conjunto, éste es imposible de medir en su totalidad. De esta forma, las mediciones que se hacen comúnmente son a través de los rendimientos obtenibles por variación de cantidad de nutriente agregado (Black, 1993).

En adición a lo anterior, Cerrato y Blackmer (1990) afirmaron que la determinación de dosis de fertilización óptimas, directa o indirectamente, involucra el ajuste de algún tipo de modelo. Los modelos usados normalmente

para describir curvas de respuesta son el Modelo Lineal Plateau (Ley del Mínimo), el Modelo Mitscherlich (exponenciales) y los modelos Polinomiales (cuadrático, raíz cuadrada y cuadrático plateau).

2.3.6.1 Modelo Lineal Plateau - Ley del Mínimo

La Ley del Mínimo descrita por el científico alemán Justus von Liebig en 1855 está conformada por tres partes:

- si un nutriente se encuentra deficiente o ausente, estando todos los demás presentes, el suelo será deficiente para todos aquellos cultivos que requieran ese nutriente indispensablemente.
- con iguales condiciones atmosféricas, los rendimientos son directamente proporcionales al suministro de nutriente mineral (respuesta lineal, retornos constantes).
- en un suelo rico en nutrientes minerales, el rendimiento no aumenta por agregados de la misma sustancia (plateau).

A partir de ellos, posteriormente en 1905, el inglés Frederick F. Blackman generalizó para otros factores (sin interacción): *“cuando un proceso está determinado por un cierto número de factores, la velocidad del proceso estará limitada por el factor más lento”* (Black, 1993).

Matemáticamente el modelo descrito sería:

$$Y = a + bx$$

siendo:

Y = rendimiento expresado en las unidades de medición

a = rendimiento esperado para agregado del nutriente cero (corte en el eje Y de la gráfica)

b = retornos constantes por cada unidad de agregado de nutriente (pendiente de la gráfica)

x = cantidad de nutriente agregado.

De esta manera se determina los niveles críticos de cada nutriente para los cultivos en evaluación:

cuando $x \leq N.C.$ se cumple $Y = a + bx$ (modelo lineal) y

cuando $x \geq N.C.$ $Y = \text{Plateau}$ (UdelaR. FA, 2010).

Resultados nacionales indicaron que en cuanto a la fertilización nitrogenada, en 6 de los 9 sitios estudiados, la respuesta se ajustó a una recta lineal. Por su parte, en cinco de los sitios estudiados la concentración de nitrógeno en el grano se ajustó al modelo lineal (Harreguy, 2011).

2.3.6.2 Modelo Mitscherlich – exponenciales

Este modelo sugiere que el incremento de cosecha de grano obtenido por unidad de incremento en el suministro de un nutriente disminuye a medida que la cosecha se aproxima al máximo obtenible. A su vez, estos incrementos son proporcionales al decrecimiento respecto al máximo, es decir, incrementos decrecientes (Black, 1993).

De forma matemática el modelo puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$Y = A (1 - 10^{-c(x+b)})$$

en donde:

A = rendimiento máximo en las unidades de medición

c = factor de proporcionalidad o eficiencia

x = cantidad nutriente agregado

b = nutriente proveniente del suelo o de la semilla

A nivel experimental, se demostró que existen algunas limitantes en la ecuación de Mitscherlich. Éstas surgen en el cálculo del “factor de proporcionalidad” cuando se utilizan distintas fuentes de un mismo nutriente o una misma fuente en distintos suelos. Una segunda limitante es el carácter asintótico a un máximo, en donde no se producen decrecimientos de la respuesta vegetal bajo condiciones de suministro excesivo del nutriente (Black, 1993).

2.3.6.3 Ecuaciones Polinomiales – cuadrática

En este caso para cada nutriente existe una cantidad asociada a un máximo rendimiento. El incremento en la respuesta por cada unidad de incremento del nutriente disminuye a medida que la cosecha se acerca a dicho máximo. A su vez, agregados posteriores al asociado con el máximo rendimiento resulta en decrecimientos gradualmente mayores.

La ecuación cuadrática puede considerar el efecto de mayor número de factores y supone las interacciones entre los mismos. Una ventaja de ésta ecuación es que mediante procedimientos de regresión múltiple es fácilmente ajustada a datos experimentales (Black, 1993).

Una de las herramientas utilizadas en la econometría es el análisis de regresión, que tiene como objetivo estimar el valor de una variable aleatoria dependiente (eje: rendimiento) a través de variables asociadas independientes (eje: dosis de fertilizante N) conocidas. La ecuación de regresión es la fórmula algebraica por la cual se determina la variable de respuesta, en este caso, de forma cuadrática (Bongiovanni, 2009):

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \epsilon_i$$

Siendo:

Y_i = valor de la variable dependiente en la observación (eje: rendimiento).

A = valor de “Y” cuando $X = 0$

β_1 = estimador lineal o pendiente de la línea de regresión

β_2 = estimador cuadrático de la línea de regresión (rendimientos decrecientes)

X_i = valor específico de la variable independiente en la observación “i” (eje: cantidad de nutriente)

ϵ_i = error del muestreo aleatorio en la observación “i”

Los estudios nacionales más recientes llevados a cabo por Harreguy (2011) mostraron que uno de los nueve sitios estudiados, en cuanto a la respuesta en el rendimiento de grano, se ajustó al modelo cuadrático. Por otra

parte, en cuanto a la concentración de nitrógeno en el grano en función del agregado, en dos de ellos se ajustó mejor el modelo cuadrático.

Los resultados obtenidos por Silveira et al. (1980), arrojaron que el modelo de respuesta que mejor se ajustó a los efectos del agregado de nitrógeno fue de tipo cuadrático ($4651,63+33,1004X-0,1546X^2$ / $R^2=93,21\%$). De igual modo, Díaz Rossello (1976) encontró que el modelo que mejor se ajustó para un experimento con 7 chacras fue de tipo cuadrático. A su vez Molino et al. (2012) ajustaron una función cuadrática entre el rendimiento y nitrógeno disponible.

Cabe mencionar, debido a que el “pico” máximo de rendimiento en la función cuadrática era muy sensible a la variación de cantidad de nutriente, se formuló una modificación matemática que se llamó “raíz cuadrada”. Ésta ecuación es considerada más realística ya que el máximo es más amplio y más plano. Aunque, por otro lado, la pendiente de la curva se aproxima a infinito cuando “x” se aproxima a cero, característico de la función de raíz cuadrada; aspecto menos realista que la función cuadrática (Black, 1993).

Finalmente, es importante señalar que el criterio de selección de la ecuación más conveniente para representar la relación entre respuesta vegetal y suministro de nutrientes, en los hechos, es el que exprese con menor probabilidad de error la variación observada.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se llevó a cabo en el marco del Proyecto de Investigación "Ajuste de la Fertilización Nitrogenada en Sorgo Granífero" de la CSIC - Sector Productivo.

3.1 AJUSTE DEL MODELO DE RESPUESTA

Para ello, se utilizó la información generada durante tres años de trabajo (zafra) en la Cuenca Lechera Sur de nuestro país. Los sitios experimentales (Cuadro 1), en su mayoría, eran predios de productores que realizaban su manejo corriente hasta la instalación del cultivo, en donde se marcaba la zona experimental seleccionada en la cual se trabajó.

Se relacionó el contenido de nitrato en el suelo y en planta (desarrollo vegetativo: estadio V4-5) con el rendimiento relativo ($RR\% = Y_{\text{testigo}}/Y_{120 \text{ urea}} * 100$) para cada sitio experimental-año. Ello permitió obtener un valor de nivel crítico para el cultivo, que fue validado en a campo.

Se utilizó Cate y Nelson como procedimiento estadístico de procesamiento de los datos (Cate y Nelson, 1971).

Cuadro 1. Ubicación geo-referenciada de los sitios experimentales.

Año	Sitio experimental	Ubicación	GPS
2009/10	IPB	34°40'03.97"S	56°34'41.70"O
	Estación Prueba – Kiyú	34°35'40.32"S	56°41'52.92"O
	P. Marquez	33°57'13.24"S	55°37'09.83"O
	J. García	34°08'23.03"S	55°56'18.83"O
	Alfredo Espínola	34°26'22.40"S	56°56'04.28"O
	P. Artagaveytia	34°29'11.79"S	57° 0'21.01"O
	Perdomo & Viroga & Varela	34°18'32.01"S	55°29'51.80"O
	G. Fernandez	34°30'24.80"S	56°44'08.46"O
	J. Noguéz	34°46'10.58"S	54°43'51.13"O
2010/11	G. Fernandez	34°30'30.93"S	56°44'52.81"O
	A. Espínola	34°29'43.19"S	56°54'09.86"O
	Lopez	34°23'10.94"S	55°56'22.19"O
	G. de León	34°18'43.91"S	55°20'0.30"O
	Chiola R8	34°41'38.62"S	55°52'04.94"O
	Chiola R32	34°45'23.24"S	55°52'16.80"O
2011/12	C. de los Santos	34°34'27.45"S	55°49'35.31"O
	IPB	34°40'03.29"S	56°34'43.28"O
	G. Fernandez	34°30'38.42"S	56°44'13.36"O
	A. Espínola	34°29'07.42"S	56°53'59.25"O
	P. Artagaveytia	34°26'45.46"S	56°55'29.73"O

3.2 EXPERIMENTO DE VALIDACIÓN

Para la zafra 2012/13 y en un sitio experimental determinado (campo experimental de la empresa IPB Semillas), se instaló el ensayo de evaluación de comportamiento de diferentes dosis de nitrógeno para una única fuente (sulfato de amonio: 21% N). El cultivar utilizado fue Flash 10/IPB Semillas.

La caracterización química del suelo, se presenta en el Cuadro 2 - perteneciendo a la unidad Kiyú de la Formación Libertad - siendo la ubicación del predio sobre la Ruta 1, km 46⁵⁰⁰ (geo-referencia 34°40'07.17"S / 56°34'37.60"O). Se incluyó la información climática de la zona experimental, durante el desarrollo del cultivo, en relación a parámetros de lluvia y temperatura. Éstos son de la estación meteorológica de la ciudad de San José (temperatura y precipitación histórica) y Libertad (precipitaciones del período).

Cuadro 2. Parámetros químicos de suelo a la instalación (promedio del bloque; profundidad de 0 - 20 cm).

pH en H ₂ O	P (ppm)	MO (%)	Bases (meq/100gr)			
			Ca	Mg	K	Na
5.2	47	3.7	6.1	1.6	0.5	0.7

Éstos parámetros fueron determinados analíticamente de la siguiente manera: contenido de materia orgánica (método Walkley-Black, citado por Nelson y Sommers, 1996), fósforo (Fixen y Grove 1990, Kuo 1996), pH en agua (Mc Lean 1982, Thomas 1996) y bases de intercambio (Haby et al. 1990, Helmke y Sparks 1996, Suárez 1996, Wright y Stuczynski 1996).

El diseño experimental que se utilizó fue de bloques completos al azar con parcelas divididas, considerando la homogeneidad de las unidades experimentales. En la zona elegida para el ensayo - a la siembra del sorgo granífero (11/12/2012) – se dispusieron tres bloques al azar y dentro de cada uno de ellos, las parcelas “grandes” que generarían la variabilidad del contenido de nitrógeno inicial en el suelo (0 – 40 - 80 – 120 – 160 kg N/ha aplicado). El tamaño de dicha parcela “grande” fue de 10 m de largo por 2,8 m de ancho (Anexo 1). En él, se consideraron 4 filas del cultivo, con una entrefila de 70 cm.

En todas las parcelas - al estadio V4-5 del cultivo - se realizó muestreo de suelo (20 tomas) y planta (18 plantas) para determinar el contenido de nitrato en ambas muestras (el día 22/12/2012), 11 días post siembra. El análisis del contenido de nitrato en suelo (Anexo 2) fue determinado por el método colorimétrico por reducción con cadmio cuperizado (Mulvaney, 1996) y el contenido de nitrato en planta por el método colorimétrico (Cataldo et al., 1975).

A partir de los resultados del análisis de suelo para cada tratamiento inicial (Cuadro 3) y en base a un nivel crítico para el sorgo generado por la investigación de los años previos, se realizó el ajuste de nitrógeno.

En aquellas parcelas “grandes” cuyo valor analítico de N-NO₃ en el suelo fue ≤ a 20 ppm, se subdividió cada una en tres parcelas “chicas”, iguales entre sí. Los tres tratamientos asignados al azar, en cada caso y según el valor analítico obtenido, fueron:

- 1) un óptimo – el cual complementó el aporte del suelo y cubrió los requerimientos vegetales;
- 2) un testigo sin agregado de N;
- 3) un agregado supraóptimo o superior en un 50% al denominado como óptimo.

El ajuste de la fertilización se realizó el 27/12/2012, con la misma fuente de nitrógeno de instalación, dieciséis días post siembra.

Cuadro 3. Contenido de N-NO₃ en el suelo en parcelas grandes a V4-5 (promedio de bloque; profundidad de 0-20 cm).

	Dosis de N a la instalación (kg/ha)				
Tratamiento inicial	0	40	80	120	160
N-NO ₃ (ppm)	8	18	20	25	31

Las parcelas grandes que tuvieron el tratamiento inicial de dosis 0, 40 y 80 N a la instalación, estaban por debajo o en el límite del nivel crítico estudiado. A estos tratamientos se les hizo la subdivisión en parcelas chicas descritas anteriormente, llevando a cabo los tres tipos distintos de ajustes de

fertilización en V4-5. En cambio, para los tratamientos iniciales de 120 y 160 N a la siembra, como se hallaron valores por encima del nivel crítico, no se fertilizaron.

Con 110 días de ciclo del cultivo, al momento de la cosecha (01/04/2013) - en cada parcela - se cortaron las panojas de las dos filas centrales y en los dos metros centrales. La distancia de entrefina era de 70 cm y el área cosechada fue de 2,8 m².

Cada muestra así obtenida, se pesó (peso fresco o húmedo cosechado), se chopeó (fragmentación de la panoja) y sub-muestreo. Dichas muestras se pesaron y se secaron a estufa (60°C durante 48 horas aproximadamente. hasta lograrse que el peso fuese constante) y se volvieron a pesar. Se le determinó el porcentaje de materia seca (diferencia entre peso seco y húmedo) y considerando el área cosechada se llevó el valor parcelario obtenido a rendimiento por hectárea.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN

A partir de la información recabada a lo largo de los tres años de experimentación, se buscó relacionar el contenido de nitratos en el suelo al estadio fisiológico V4-5 con los rendimientos relativos obtenidos. Con el modelo de Cate y Nelson, se definieron dos poblaciones diferentes: la que presentó respuesta al nitrógeno aplicado en el rango más bajo de contenidos de nitratos en el suelo y otra para valores superiores en suelo, en la cual no es de esperar respuesta física a la fertilización.

Considerando un rango de rendimiento relativo entre 80 y 90 del máximo, los contenidos en suelo de nitratos se ubicaron en un entorno de 19,75 – 21,39 ppm (Figura 3 y 4 respectivamente).

Figura 3. Relación entre rendimiento relativo y contenido de nitrato a V4-5 en suelo (ppm); valores promedio de tres años (NC = 21,39).

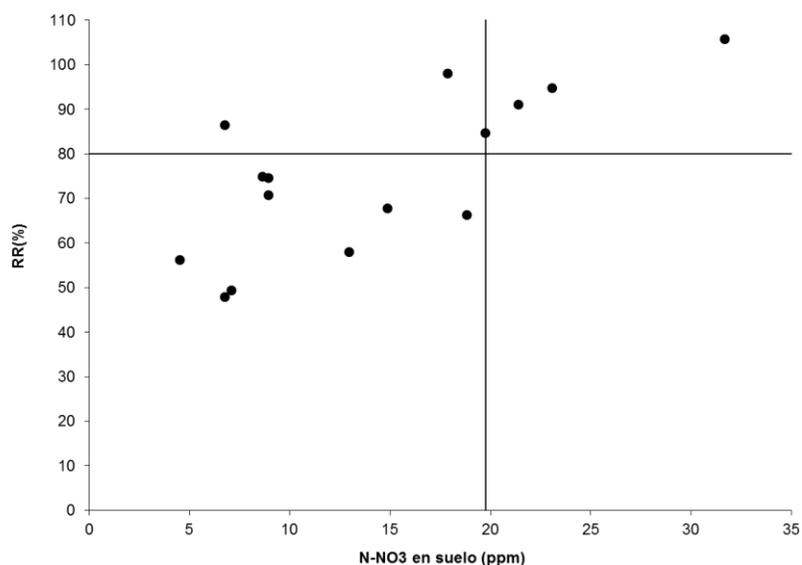
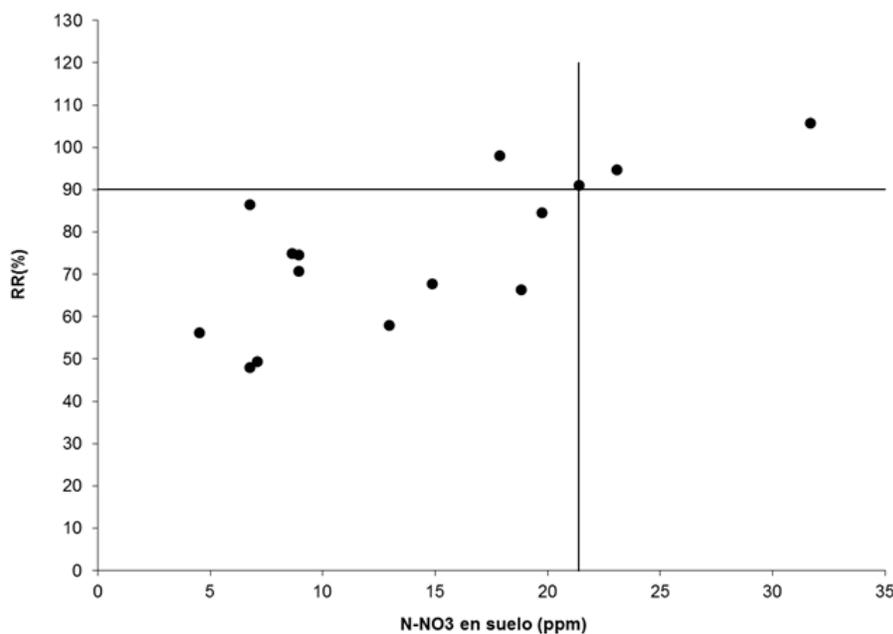


Figura 4. Relación entre rendimiento relativo y contenido de nitrato a V4-5 en suelo (ppm); valores promedios de tres años (NC=19,75).



A los efectos prácticos, se realizó el ajuste de la fertilización nitrogenada a V4-5 en el experimento de campo utilizando un valor de nivel crítico de nitrato en el suelo de 20 ppm.

Los contenidos foliares de nitrato a dicho estadio, no posibilitaron definir un contenido crítico en planta, dada su distribución espacial.

4.2 SITUACIÓN AGROCLIMÁTICA

El factor año es una variable más a tener en cuenta en el estudio tanto a nivel de investigación como en la producción comercial. Para ello, se obtuvieron los datos de precipitación y temperatura del período de desarrollo del cultivo y su proyección histórica (Cuadro 4 y Figura 5).

4.2.1 Precipitaciones

Cuadro 4. Registros por mes de precipitación del período en la estación Libertad y sus medias históricas en la estación San José.

	Precipitación (mm)				TOTAL CICLO
	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	
1971-2000 (San José)	82	110	128	112	
2012/2013 (Libertad)	412	52	111	77	397
S	330	58	17	35	
%CV	404	53	14	31	

Fuente: adaptado de datos registrados por INUMET²

Como podemos observar el mes de diciembre se caracterizó por una acumulación muy importante de precipitaciones que alcanzaron los 412 mm, superando la proyección histórica. Al momento de la siembra (11/12/2012) iban 255 mm acumulados en el mes (62%). En siembras tempranas de octubre, la carga de agua puede deprimir la implantación del cultivo debido a la temperatura que se encuentra el suelo (daño por imbibición en frío), afectando el vigor de las semillas (Pioneer, s.f.). En nuestro caso, se cree que el agua no fue una limitante para la correcta germinación e instalación del cultivo.

Los 157 mm restantes del mes se repartieron en 6 lluvias de 26 mm en promedio cada una, indicando que el agua estuvo disponible durante las primeras etapas de desarrollo (Anexo 6). El inconveniente que se generó fue que posterior al análisis del suelo y planta se registraron dos lluvias consecutivas que sumaron un total de 75 mm, pudiendo haber generado problemas con derivas y lixiviación de los nutrientes más móviles, entre ellos el nitrógeno, distorsionando el valor real del sitio comparado al resultado obtenido en el análisis de laboratorio.

Luego de la fertilización en el ajuste en V4-5 se registró una lluvia de 17 mm cuatro días después.

² INUMET (Instituto Uruguayo de Meteorología, UY). 2014. Precipitaciones y Temperatura; dic 2012-mar 2013. Montevideo. s.p. (sin publicar).

Los siguientes tres meses la precipitación acumulada se encontró por debajo de la media histórica. Esto pudo llegar a afectar la disponibilidad de agua en el período crítico del cultivo; momento en el cual se define el número máximo de granos por panoja, que explica el 70% del rendimiento final (Pioneer, s.f.) o entorno a la floración, donde se define el peso potencial de cada grano (Giorda y Ortíz, 2012).

Durante el mes de enero, se cree que la disponibilidad de agua no fue limitante ya que el suelo venía cargado del mes anterior y se registraron dos lluvias adicionales, al principio y al final del mes. Por esta razón, en la iniciación de la panoja, el cultivo no debió acusar déficits de agua.

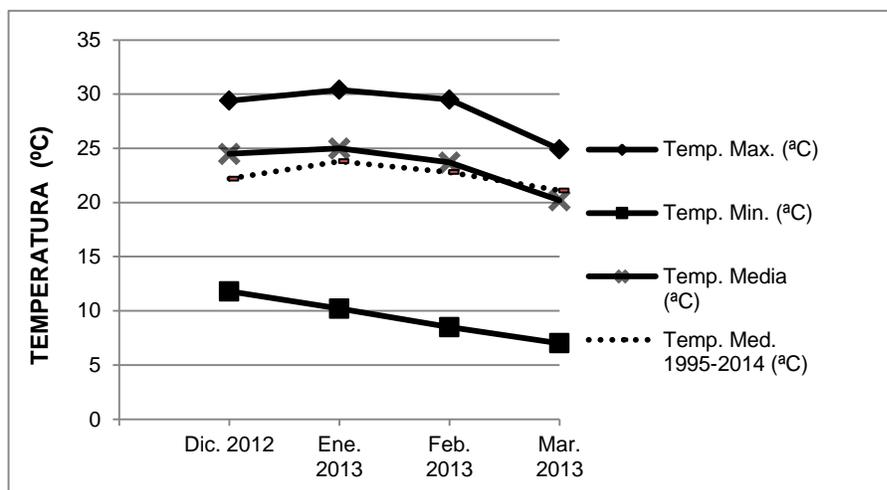
Por otra parte, entorno a la floración, a partir de mediados de febrero se registró en cinco lluvias 96 mm en total, en donde una vez más, el agua no fue limitante para el crecimiento y desarrollo de esta fase.

Finalmente, durante el mes de marzo, en la etapa de formación del grano (lechoso, pastoso suave, pastoso duro hasta madurez fisiológica) el agua de lluvia estuvo presente y bien distribuida, aunque en estas etapas finales los requerimientos son bajos y cada vez menores (CENTA, 2007).

Entonces, la disponibilidad de agua no fue una limitante en el crecimiento y desarrollo del cultivo. Por un lado favoreció las características morfo-fisiológicas que le confirieron adaptabilidad a estreses hídricos (CIAAB 1974, Bennett y Tucker 1986, Carrasco 2004), y por otro lado, la capacidad de disponibilidad hídrica por parte del suelo donde fue instalado el cultivo es de clase alta (Molfino y Califra, 2001).

4.2.2 Temperatura

Figura 5. Registro del período de temperatura máxima, mínima y media por mes y la temperatura media histórica del mes.



Fuente: adaptado de datos registrados por INUMET²

En lo que refiere a la temperatura media del período, ésta se ubicó por encima de la serie histórica (Anexo 8), pudiendo esto haber acelerado la tasa de desarrollo del cultivo en cierto grado; considerando que es el parámetro climático que tiene mayor efecto (Carrasco s.f., Ernst 2004).

Para los valores de temperaturas máximas y mínimas mensuales no se contó con referencias históricas para comparar, sin embargo, se observó que la temperatura mínima del mes de febrero y marzo fueron bajas (8,5°C y 7°C respectivamente).

4.3 RESULTADOS DE RENDIMIENTO EN GRANO

A continuación se presentan los datos obtenidos para los distintos tratamientos en función de los rendimientos obtenidos en kg/ha de grano.

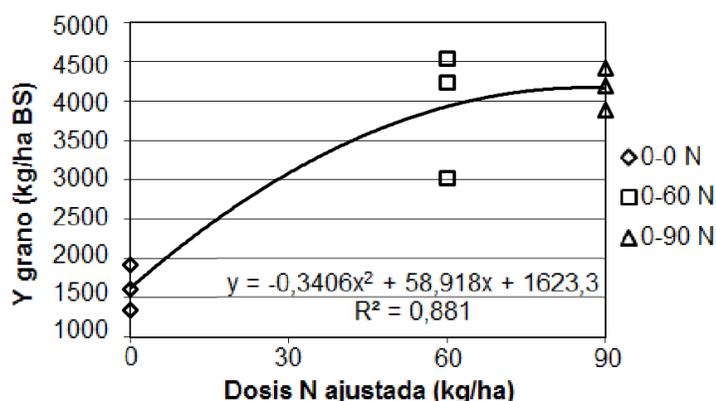


Gráfico 1. Rendimiento de grano en kg/ha en función del ajuste en V4-5 cuando no se fertilizó a la siembra.

Como podemos observar en el Gráfico 1, existió una tendencia a aumentar los rendimientos a medida que la dosis de nitrógeno en el ajuste en V4-5 es mayor.

Dado que en estos tratamientos no se fertilizó a la siembra, el crecimiento del cultivo en las primeras etapas dependió exclusivamente del aporte por parte del suelo. El rendimiento para el testigo sin fertilizar (promedio 1623 kg/ha), a su vez, se explicaría por factores tales como la mineralización de la materia orgánica durante todo el ciclo del cultivo; promovido por las temperaturas estivales (Echeverría y García 2005, Havlin et al. 2005).

Para los tratamientos 0-60 N y 0-90 N, hubo respuesta positiva al agregado de nitrógeno en V4-5; ajustándose un modelo cuadrático ($R^2=0,881$). El aporte del nutriente en esta etapa es fundamental ya que es cuando la planta absorbe alrededor del 70% de los nutrientes requeridos (Bernardis et al. s.f., Ernst, citado por Harreguy 2011).

Se observó que las diferencias entre el ajuste óptimo (3932 kg/ha promedio) y el supraóptimo (4167 kg/ha promedio) no fueron de magnitud. Se explicaría pues ambos determinaron un rendimiento potencial muy similar, dado que no recibieron aporte inicial por medio de fertilizantes, y que luego concretaron en las etapas posteriores al ajuste. Las 30 unidades de nitrógeno de diferencia entre ambos tratamientos pudo estar indicando una zona de

consumo de lujo, contribuyendo a un aumento en la calidad del grano, o que el rendimiento pudo haber estado limitado por otros factores.

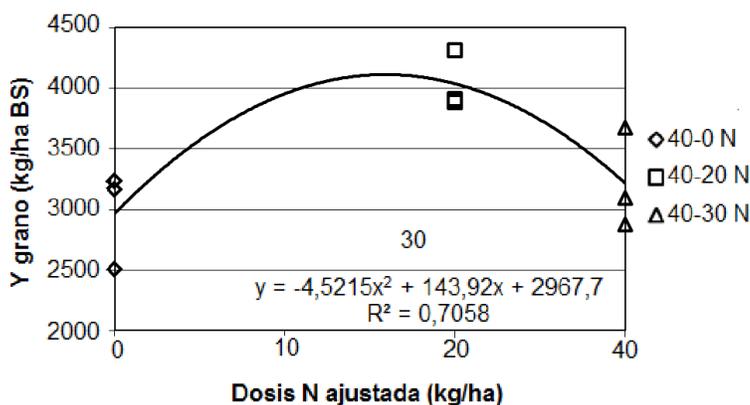


Gráfico 2. Rendimiento de grano en kg/ha en función del ajuste en V4-5 cuando se aplicaron 40 UN a la siembra.

Como podemos observar en el Gráfico 2, hubo respuesta positiva al agregado de N cuando se aplicaron 20 UN al ajuste. Esto pudo explicarse por la concreción del rendimiento que se pudo haber generado por las 40 UN que se agregaron a la siembra.

Sin embargo, en el ajuste con 30 UN en V4-5, la respuesta expresada por el rendimiento no fue la esperada dado que son 10 UN más que el tratamiento anterior (4037 kg/ha y 3216 kg/ha en promedio). Es posible que el detrimento del rinde en este tratamiento haya sido causado por otros factores, pudiendo ser uno de ellos el daño ocasionado aves³. Una razón de esto podría ser que estas parcelas hayan estado más vulnerables al ataque por su posicionamiento en el ensayo o quizás se hayan desarrollado antes que el resto de las parcelas, quedando así más expuestas.

³ Uteda, A. 2014. Com. personal.

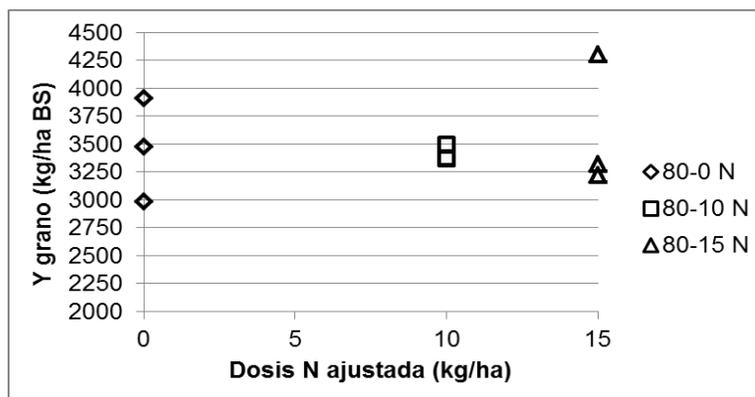


Gráfico 3. Rendimiento de grano en kg/ha en función del ajustes en V4-5 cuando se aplicaron 80 UN a la siembra.

Como podemos observar el rendimiento de grano medio para cada tratamiento se presenta casi inalterado, sin revelar una respuesta clara o tendencia a partir del ajuste en V4-5: ajuste subóptimo 3458 kg/ha promedio, ajuste óptimo 3412 kg/ha promedio y ajuste supraóptimo 3618 kg/ha promedio. El coeficiente de regresión que ajusta el modelo lineal es muy bajo ($R^2=0,0204$). De todas formas, se podría constatar dos situaciones hipotéticas: i) los ajustes demuestran menor variabilidad entre las repeticiones en cada bloque, comparado 80-0 N; ii) el ajuste 10 y 15 UN se queda “corto” si lo comparamos con el tratamiento testigo, injustificando su aplicación.

Cuadro 5. Rendimiento de grano en kg/ha en función de la dosis inicial, sin ajuste en V4-5.

Dosis N inicial (kg/ha)	Ajuste (kg/ha)	Y grano (kg/ha BS)	Media
120	0	5407	4866
		3835	
		5357	
160	0	5076	5447
		4615	
		6650	

Para poder observar qué sucedía más allá de la dosis recomendada según el análisis de suelo y el nivel crítico de N a la siembra, se realizaron dos

tratamientos con dosis no limitantes (120 y 160 kg/ha de N). Ninguno de los dos tratamientos recibió ajuste en V4-5 ya que el nivel registrado en suelo y en planta en ese estadio estaba por encima del rango crítico de ajuste.

Es posible lograr mayores rendimientos en grano con una mayor dosis inicial de N a la siembra, como indica el Cuadro 5, estableciéndose los 5 mayores rendimientos parcelarios del experimento mediante el uso de estos tratamientos (Gráfico 4).

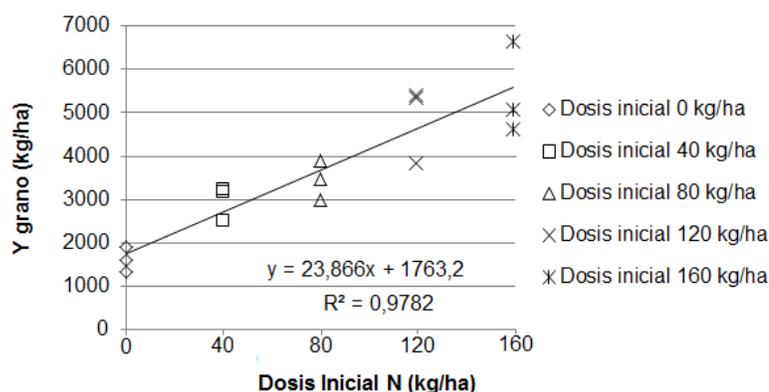


Gráfico 4. Rendimiento de grano en kg/ha para los tratamientos sin ajuste de nitrógeno en V4-5.

La gráfica señala que existe una tendencia a obtener mayores rindes con aumentos en la dosis inicial de nitrógeno a la siembra, cuando no se realizó ajuste de N en V4-5. Se cree que la mineralización y/o la disponibilidad de nitrógeno en el suelo fueron suficientes para concretar el rendimiento definido en las etapas iniciales de crecimiento, para cada tratamiento, en especial en las etapas críticas de requerimientos.

Una posible hipótesis que explique los altos rendimientos obtenidos con altas dosis de N a la siembra (120 y 160 UN) podría ser la historia de chacra donde se realizó el ensayo. Considerando que es un Campo Experimental de una empresa semillera, el sitio del ensayo tiene una historia de fertilización bastante extensa⁴; en donde se pueden encontrar altos niveles de fósforo en el suelo (Cuadro 2). La interacción positiva entre nitrógeno y fósforo (Gutiérrez y Marchesi 1977, Irigoyen y Perrachón 2007), pudo explicar la respuesta

⁴ Uteda, P. 2014. Com. personal.

encontrada en estos tratamientos; y si a su vez, tomamos en cuenta que pudo promover mayor exploración radicular y mayor aprovechamiento del NO_3^- en profundidad.

Más allá de estos resultados, un problema que se puede presentar al realizar la totalidad de la fertilización a la siembra, es la competencia de las malezas con el cultivo implantándose (Ernst y Siri, 2004). Esto va depender principalmente de la región donde se siembra el cultivo, la historia de chacra, el manejo previo de la cama de siembra y la calidad de la semilla.

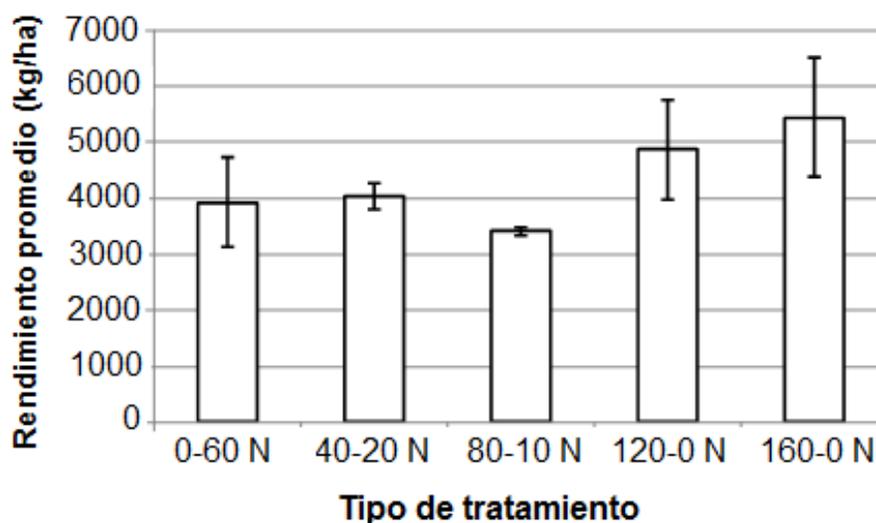


Gráfico 5. Rendimiento promedio de grano de los tratamientos con ajuste óptimo en V4-5.

Como se puede observar en estos promedios, dentro de cada tratamiento el rendimiento en cada parcela varió en alguna medida (desvío estándar). Parece relevante mencionar que para los tratamientos con un solo ajuste (a la siembra o en V4-5), el rendimiento entre parcelas varió más en comparación con aquellos tratamientos que tuvieron fertilización diferida en dos momentos; a la siembra y el ajuste óptimo en V4-5 (40-20 y 80-10 UN). Ésta menor variación entre las repeticiones puede dar la pauta de que fragmentar la fertilización en dos momentos puede significar mayor estabilidad en la respuesta esperada, a través del rendimiento en grano.

Otro punto destacable del fraccionamiento es la ventaja que le confiere al cultivo frente a la competencia de malezas, potenciando la competitividad a

favor del sorgo dada su alta tasa de crecimiento a partir de V4-5 (Ernst y Siri, 2004). Como se mencionó anteriormente, con la fertilización a la siembra, se corre el riesgo de que la velocidad de crecimiento de estas últimas sea mayor que la del sorgo, pudiendo deprimir el crecimiento posterior.

4.4 EFICIENCIA DE CONVERSIÓN

En esta sección se comparan los rendimientos de cada tratamiento en función de la cantidad de agregado de nutriente nitrogenado que recibieron, es decir, eficiencia de conversión de fertilizante en grano.

Cuadro 6. Resumen de eficiencias de conversión.

INICIAL	AJUSTE	Y Prom.	0	0	0	40	40	40	80	80	80	120	160	Kg. ha ⁻¹
Kg.ha ⁻¹			0	60	90	0	20	30	0	10	15	0	0	
0	0	1623	X											
0	60	3932	38	X										
0	90	4167	28	8	X									
40	0	2968	34	-48	-24	X								
40	20	4037	40	2	X	53	X							
40	30	3216	23	X	X	8	-82	X						
80	0	3458	23	-24	-71	12	X	X	X					
80	10	3412	20	X	-8	X	X	X	-5	X				
80	15	3618	21	X	X	X	X	X	11	41	X			
120	0	4866	27	16	23	24	X	X	35	X	X	X		
160	0	5447	24	15	18	21	X	X	25	X	X	15	X	

Nota: el valor en el interior de la tabla equivale a kg de grano/UN de diferencia ganado (+)/perdido (-) en términos de eficiencia, del tratamiento de la columna izquierda comparado al tratamiento de la fila superior.

Los tratamientos que no recibieron aplicación a la siembra muestran un comportamiento positivo en términos de eficiencia de conversión (EC) para las dosis 60 y 90 UN al ajuste en V4-5 con respecto al testigo sin fertilizar. La caída de 38 a 28 kg de grano/UN entre estos dos tratamientos (0-60 y 0-90 respectivamente) es explicado porque a partir de 60 UN, cada kg de nitrógeno adicional empieza a tener una menor eficiencia (8 kg de grano/UN).

En términos económicos, no sería justificable aplicar 30 UN más en el ajuste en V4-5 ya que el aumento del rendimiento en grano obtenido (4167 vs

3932 kg) no anula el costo del fertilizante aplicado (sulfato de amonio), como indica el Cuadro 7.

Cuadro 7. Eficiencia económica.

2/10/14	Precio				Eficiencia económica (kg sorgo)
	USD/tt	USD/kg	UN/tt	USD/UN	
Sorgo	185	0,185	x	x	x
Sulfato de Amonio	400	x	210	1,90	10,3
Urea	480	x	460	1,04	5,6

Fuente: adaptado de ISUSA⁵, Cámara Mercantil de Productos del País⁶

Para justificar el gasto de fertilizar (costo de las UN del fertilizante) con los precios actuales, se necesitan 10,3 kg de sorgo por UN aplicada de sulfato de amonio y 5,6 kg de grano para la urea.

De este planteamiento se puede concluir que independientemente del momento de aplicación y de la cantidad de N que estamos agregando, para todos los tratamientos el rendimiento en grano obtenido por la aplicación de N es cubierto ampliamente por el margen económico que nos deja el cultivo (EC superiores a 10,3 kg), cuando los comparamos con el testigo sin fertilizar.

Cuando se compara entre los tratamientos que tuvieron 40 UN al inicio vemos que si bien la eficiencia obtenida por el tratamiento sin ajuste en V4-5 es alta, el tratamiento 40-20 UN logra mayor rendimiento y la mayor eficiencia de conversión de todo el ensayo. Este mismo logra 53 kg grano/UN agregada en comparación con el 40-0 UN y denota la importancia que tiene en el cultivo el ajuste en V4-5.

Sin embargo, cuando se pasa al tratamiento 40-30 UN la eficiencia cae a 8 kg grano/kg N aplicado. Éste valor no solo no supera el mínimo para que sea económicamente rentable sino que también el rendimiento se ve deprimido notoriamente comparado al tratamiento anterior (40-20 UN). Esto deja una gran incógnita pudiendo representar un error experimental o algún tipo de interacción negativa.

⁵ Fetter, M. 2014. Com. personal.

⁶ Cámara Mercantil de Productos del País, UY. 2014. Montevideo. s.p. (sin publicar).

Otro hecho destacable es cuando se compara el tratamiento 40-20 con 0-60 UN (60 unidades de nitrógeno totales aplicadas), la eficiencia de conversión es positiva y aunque sea muy baja (2 kg de grano/UN agregada), el hecho de fraccionar los 60 kg de N totales en dos momentos significan para este análisis, 120 kg de grano/ha adicionales aproximadamente.

Cuando los ajustes iniciales pasan a ser de 80 UN, la diferencia de rindes finales entre los tratamientos no es tan marcada. Cuando utilizamos solo 10 UN al ajuste no se obtuvieron cambios en el rendimiento comparado al sin ajuste en V4-5 y además estamos generando un costo extra de la aplicación. Por esta razón, aquellas 5 UN adicionales en el tratamiento supraóptimo parecerían ser muy eficientes comparado al ajuste óptimo, y no es tan así comparado al tratamiento sin ajuste (41 y 11 kg grano/UN respectivamente).

Otro dato que nos brinda el cuadro es que para los tratamientos 40-0 y 80-0 cuando se comparan con 0-60 y 0-90, siempre hablando de eficiencia, los dos tratamientos tiene eficiencias negativas (-48, -24; -24, -71 respectivamente), pudiendo concluir dos cosas; 1) fertilización sólo inicial es peor que sólo V4-5 por deteriorar la competencia frente a malezas del cultivo 2) los requerimientos de N si bien existen a la siembra, son de mayor importancia relativa los requerimientos a partir de V4-5.

Si comparamos resultados cuando sólo tenemos la posibilidad de realizar una aplicación (siembra o ajuste), los mejores resultados se obtuvieron aplicando fertilizante solo al ajuste (0-60, 0-90 vs 40-0, 80-0); excepto para los casos de 120-0 y 160-0 kg N.

Concluyendo dentro de los tratamientos con mayor aplicación (120-0 y 160-0 UN) encontramos eficiencias similares e indiferentemente de cuál de los dos elijamos, comparados con todos los demás tratamientos, justifican económicamente su aplicación. Es decir, se siguen obteniendo respuestas altas en términos de rendimiento frente al elevado agregado de N.

El motivo principal de estos tratamientos que utilizan altas dosis de N era identificar si existía respuesta a los mismos y a su vez si era justificable su aplicación. Este escenario de respuesta a altas dosis es muy variable y en nuestro caso, al tratarse de un campo experimental el cual tiene altas fertilizaciones anuales de macronutrientes, era factible y predecible esperar una respuesta positiva. Cuando trabajamos sobre un campo comercial bajo

agricultura se puede hacer presente con mayor probabilidad la Ley del mínimo; ya que pese a altos agregados de nitrógeno, otros nutrientes pueden estar limitando los rendimientos potenciales.

Otra realidad que hay que tener en cuenta, en especial cuando se trata de altos niveles de fertilización, es el cuidado del ambiente. Conocer la fuente del fertilizante que se irá a utilizar es de suma importancia para saber qué posibles destinos o rutas tendrá el nutriente luego de la aplicación. Esto lleva a que también debemos conocer con exactitud la cantidad necesaria del nutriente que el cultivo irá a extraer en esa fase en desarrollo, y prescindir de que posibles pérdidas signifiquen contaminación de la atmósfera y/o aguas subterráneas. A su vez, conocer la demanda de nutrientes del cultivo y la oferta que hay en el suelo es fundamental para evitar la extracción excesiva de nutrientes con el producto de cosecha.

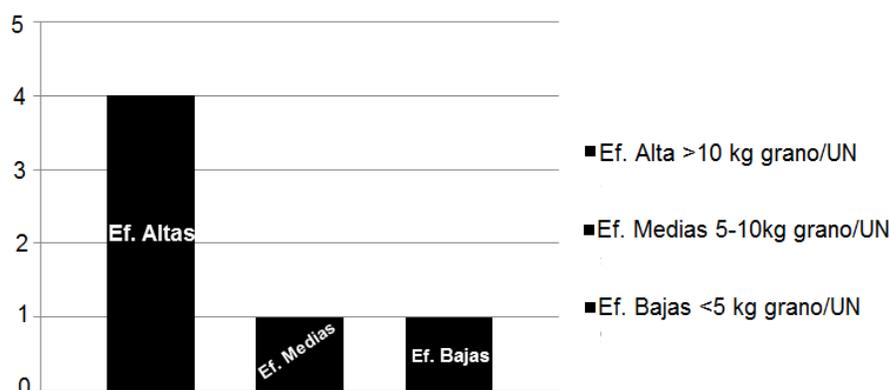


Gráfico 6. Número de tratamientos según eficiencia de conversión alta, media o baja.

A modo de síntesis, si agrupamos las eficiencias de los tratamientos óptimos y supraóptimos frente a su respectivo ajuste subóptimo (0-0, 40-0, 80-0 UN), se denota que los tratamientos (6 en comparación), en la mayoría de los casos, se encuentran en la zona de alta eficiencia económica. Esto nos refleja la gran capacidad de respuesta del cultivo frente al nitrógeno disponible; sin descartar que también pueden haber posibles escenarios en que los resultados podrían ser decepcionantes (eficiencias bajas).

5. CONCLUSIONES

Un nivel de 20 ppm N-NO₃ en suelo, definió la zona de respuesta a la fertilización, considerando un rendimiento relativo entre 80 y 90% del máximo.

La zafra se desarrolló en un marco climático de disponibilidad de agua y temperaturas acorde a un año promedio.

El agregado de 40 unidades de nitrógeno a la siembra y el ajuste a V4-5 con 20 unidades de nitrógeno adicionales – según el nivel crítico -, resultó el manejo más adecuado tanto por los rendimientos obtenidos como por la utilización de lo agregado.

Con 80 unidades de nitrógeno a la siembra no se obtuvo respuesta al agregado en ninguna de las combinaciones del ajuste a V4-5.

Dosis iniciales mayores únicas (120 y 160 unidades de nitrógeno) - no limitantes - elevaron la respuesta en grano, siendo ambientalmente cuestionable la magnitud de lo agregado.

Independientemente del momento de aplicación y de la cantidad de N agregado, para todos los tratamientos el rendimiento en grano obtenido por dicho agregado hace económicamente rentable su aplicación.

La fertilización fraccionada (a la siembra y en V4-5) significa una mayor estabilidad en la respuesta del cultivo (rendimiento). A su vez, el fraccionamiento le otorga una ventaja al sorgo frente a la competencia con malezas.

6. RESUMEN

La producción agrícola actual, exige conocimientos sobre los criterios de fertilización en cultivos, para la utilización más eficiente y económica de insumos; basada en criterios objetivos (índices de disponibilidad). Objetivos del trabajo: a) ajustar un modelo de respuesta al agregado de nitrógeno durante el desarrollo de la cuarta/quinta hoja (V4-5) en sorgo granífero; b) validación a campo del comportamiento de diferentes dosis de nitrógeno y su fraccionamiento. Con la información de tres años, en 20 predios de productores de la Cuenca Lechera Sur del Uruguay, se ajustó Cate y Nelson para definir la zona de respuesta a la fertilización. Se validó (zafra 2013) en un suelo de la Unidad Kiyú/Formación Libertad, a través del comportamiento de diferentes dosis de nitrógeno para una única fuente (sulfato de amonio: 21% N). El diseño fue de bloques completos al azar con parcelas divididas: a) parcelas grandes con dosis 5 iniciales (0-40-80-120-160 kg N/ha aplicado); con parcelas de 10m x 2,8m. Al estadio V4-5, se muestreo suelo y planta para determinar su contenido de nitrato. Con dichos resultados y en base al nivel crítico ajustado, se subdividieron aquellas parcelas grandes cuyo valor de nitrato en suelo fue \leq al ajustado, asignando los tratamientos nuevamente al azar: 1) testigo sin agregado de N; 2) óptimo (complementó el aporte del suelo); 3) agregado de nitrógeno 50% por encima del óptimo. Solo se subdividieron las parcelas con 0-40-80 kg N/ha aplicado inicialmente. A la cosecha se determinó el porcentaje de materia seca y rendimiento por hectárea en cada parcela. Se concluyó que: 1) un nivel de 20 ppm N-NO₃ en suelo, definió la zona de respuesta a la fertilización (RR 80-90% del máximo); 2) el agregado de 40 UN a la siembra y el ajuste a V4-5 con 20 UN adicionales (según el nivel crítico), resultó el manejo más adecuado tanto por los rendimientos obtenidos como por la utilización de lo agregado; 3) con 80 UN a la siembra no se obtuvo respuesta al agregado en ninguna de las combinaciones del ajuste a V4-5; 4) dosis iniciales mayores únicas (120 y 160 UN), elevaron la respuesta en grano, siendo ambientalmente cuestionable la magnitud de lo agregado; 5) independientemente del momento de aplicación y de la cantidad de N agregado, para todos los tratamientos el rendimiento en grano obtenido por dicho agregado hace económicamente rentable su aplicación; 6) la fertilización fraccionada (a la siembra y en V4-5) significa una mayor estabilidad en la respuesta del cultivo (rendimiento).

Palabras clave: Sorgo granífero; Fertilización nitrogenada; Dosis.

7. SUMMARY

Current agricultural production requires knowledge of crop fertilization criteria, for an efficient and economic use of supplies, based on objective criteria (availability indexes). Aims of the project: a) Adjusting a response model to the adding of nitrogen during the growth of the fourth/fifth leaf (V4-5) in grain sorghum; b) Field validation of behavior of different nitrogen doses and fractionation. Using three years' information, in 20 production lots located in the Southern milk production region of Uruguay, Cate and Nelson were adjusted to define the fertilization response area. Validation was conducted (2013 harvest) in the soil of the Kiyu Unit of the Libertad Formation, through the behavior of different nitrogen doses for a single source (ammonium sulfate: 21%N). The design used was random blocks with split plots: a) big plots with 5 initial doses (0-40-80-120-160 kg N/ha applied); with 10m x 2,8m plots. During the V4-5 stage, soil and plant samples were taken to determine their nitrate content. Based on said results and on the adjusted critical level, big plots with a soil nitrate value \leq than the adjusted level were sub-divided and treatments were randomly appointed: 1) Control crop without N addition; 2) optimum level (complemented soil contribution); 3) Nitrogen addition of 50% over optimum level. Only plots with 0-40-80 kg N/ha applied initially were sub-divided. During harvest, the percentage of dry matter and yield per hectare was determined for each plot. Conclusions: 1) A soil level of 20 ppm N-NO₃, the fertilization response area was determined (RY 80-90% of the maximum); 2) The most adequate treatment, both in terms of yield obtained as of the use of the added product, is the addition of 40 NU during sowing and adjustment during V4-5 stage with 20 additional NU (according to the critical level); 3) With 80 UN at sowing, no response was obtained from addition in any of the combinations of the adjustment to V4-5; 4) Single higher initial doses (120 and 160 NU) increased response in grain; the magnitude of additions is questionable from an environmental perspective; 5) Regardless of the moment of application and the amount of N added, the yield per grain obtained by said addition for all treatments makes application economically profitable; 6) fractionated application (during sowing and in the V4-5 stage) results in higher stability in crop response (yield).

Keywords: Grain sorghum; Nitrogenated fertilization; Doses.

8. 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. Antelo, J.; Mermot, C. 1988. Efecto de la densidad y la distribución en el cultivo de sorgo granífero. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.
3. Bennett, W.; Tucker, B. 1986. Producción moderna de sorgo granífero. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 128 p.
4. Bernardis, H. O.; García, P. A.; Ferrero, A. R. s.f. Estructura del cultivo, fertilización nitrogenada, radiación interceptada y producción de materia seca en sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) en siembra directa. (en línea). Corrientes, UNNE. Facultad de Ciencias Agrarias. Cátedra de Cultivos I. 4 p. Consultado 22 nov. 2013. Disponible en <http://www1.unne.edu.ar/cyt/2002/05-Agrarias/A-079.pdf>
5. Black, C. A. 1993. Soil fertility evaluation and control. Boca Ratón, FL, USA, Lewis. cap. 1, pp. 1-69.
6. Bongiovanni, R. 2009. Econometría espacial aplicada a la agricultura de precisión. (en línea). Actualidad Económica. 19 (67): 9-27. Consultado abr. 2014. Disponible en <http://revistas.unc.edu.ar/index.php/acteconomica/article/view/3921/3756>
7. Bonilla, I. 2000. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. In: Ascón-Bieto, J.; Talón, M. eds. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid, McGraw-Hill/Interamericana. pp. 83-97.
8. Bono, A.; Romano, N. 2007. Nitrógeno. (en línea). In: Quiroga, A.; Bono, A. eds. Manual de fertilidad y evaluación de suelos. Anguil, INTA. pp. 60-64. Consultado 25 feb. 2014. Disponible en <http://inta.gob.ar/documentos/manual-de-fertilidad-y-evaluacion-de-suelos/>

9. Carrasco, P. s.f. Sorgo granífero. Paysandú, Facultad de Agronomía. EEMAC. 156 p.
10. _____. 2004a. Aptitud climática de Uruguay para la producción de sorgo. In: Siri, G. comp. Sorgo. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 23-30.
11. _____. 2004b. Características del cultivo. In: Siri, G. comp. Sorgo. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 6-16.
12. _____. 2004c. Fisiología del rendimiento del sorgo. In: Siri, G. comp. Sorgo. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 18-22.
13. Cataldo, D.; Haroon, M.; Schrader, L.; Youngs, V. 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications Soil Science Plant Analysis*. 6: 71-80.
14. CENTA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal, SV). 2007. Guía técnica del sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench). La Libertad. 40 p.
15. Cerrato, M. E.; Blackmer, A. M. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal*. 82: 138-143.
16. CIAAB (Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger, UY). 1974. Sorgo granífero. Boletín de Divulgación no. 25. 62 p.
17. Corsi, W. 1982. Regionalización agroclimática del Uruguay para cultivos. CIAAB. Miscelánea no. 40. 28 p.
18. Díaz Rossello, R. 1976. Fertilización sorgo granífero. CIAAB. Miscelánea no. 15. s.p.
19. Echeverría, H. E.; García, F. O. 2005. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Balcarce, INTA. 525 p.
20. Ernst, O. 2004a. Época de siembra. In: Siri, G. comp. Sorgo. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 47-50.

21. _____.; Siri, G. 2004b. Fertilización. In: Siri, G. comp. Sorgo. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 51-59.
22. _____. 2004c. Implantación, población y distribución. In: Siri, G. comp. Sorgo. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 31-45.
23. _____. 2012. Eco-fisiología de cultivos. Paysandú, Facultad de Agronomía. EEMAC. 24 p.
24. Fernández, J. A.; Maldonado, J. M. 2000. Absorción y transporte de nutrientes minerales. In: Ascón-Bieto, J.; Talón, M. eds. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid, McGraw-Hill/Interamericana. pp. 109-111.
25. Fixen, P. E.; Grove, J. H. 1990. Testing soil for phosphorus. In: Westerman, R. L. ed. Soil testing and plant analysis. 3rd. ed. Madison, WI, ASA/SSSA. pp. 141-180 (SSSA. Book Series no. 3).
26. 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.
27. Giorda, L. M.; Ortíz, D. 2012. Sorgo para la sustentabilidad y producción animal del NEA. (en línea). In: Jornada de Silaje del NEA (2012, Formosa). Estrategias para una mayor productividad. Formosa, INTA. p. irr. Consultado oct. 2014. Consultado en oct. 2014. Disponible en http://inta.gob.ar/documentos/sorgo-para-la-sustentabilidad-y-produccion-animal-del-nea.-estrategias-para-una-mayor-productividad/at_multi_download/file/Sorgo%20para%20la%20sustentabilidad%20y%20produccion%20animal%20del%20NEA.%20Estrategias%20para%20una%20mayor%20productividad.pdf
28. Gutiérrez, F.; Marchesi, E. 1977. Nuevos criterios para la producción rural; cultivos de verano. FUCREA. Revista. no. 30: 57-76.
29. Harreguy, P. 2011. Ajuste de fertilización nitrogenada en sorgo granífero. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 72 p.

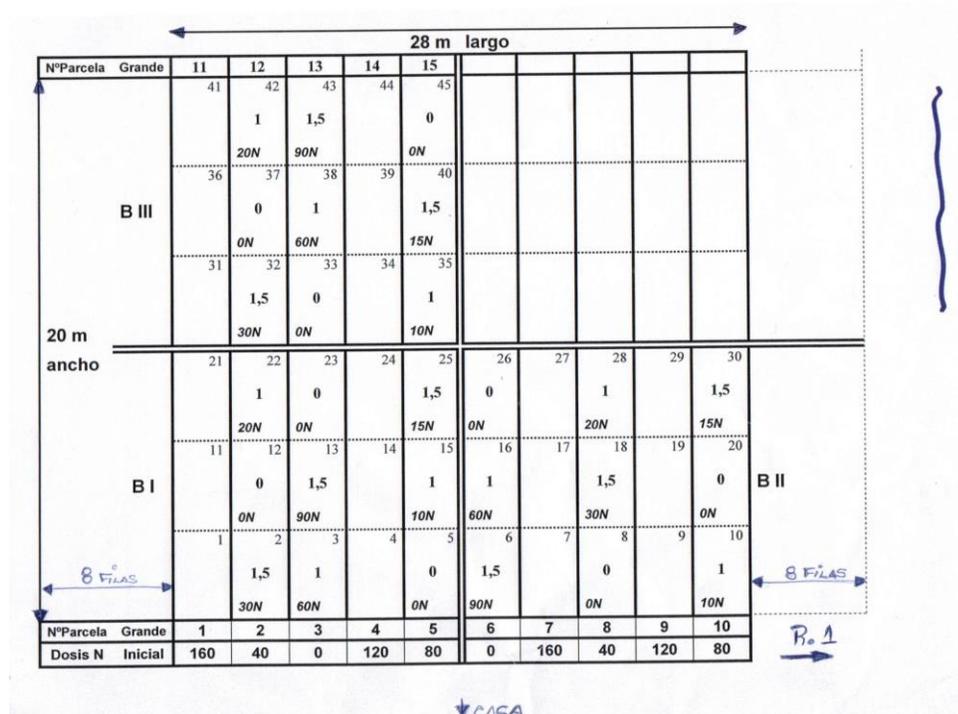
30. Havlin, J. L.; Tisdale, S. L.; Beaton, J. D.; Nelson, W. L. 2005. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 7th ed. New Jersey, Pearson/Prentice Hall. cap. 4, pp. 97-159.
31. Haby, V. A.; Russelle, M. P.; Skogley, E. O. 1990. Testing soils for potassium, calcium and magnesium. In: Westerman, R. L. ed. Soil testing and plant analysis. 3rd. ed. Madison, WI, ASA/SSSA. pp. 181-227 (SSSA. Book Series no. 3).
32. Helmke, P. A.; Sparks, D. L. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium, cesium. In: Sparks, D. L. ed. Methods of soil analysis. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 3, pp. 551-574 (SSSA. Book Series no. 5).
33. Irigoyen, A.; Perrachón, J. 2007. Sorgo granífero. Revista del Plan Agropecuario. no. 123: 52-55.
34. KSU (Kansas State University. Agricultural Experiment Station, US). 1993. How a sorghum plant develops. Kansas. 20 p.
35. Kuo, S. 1996. Phosphorus. In: Sparks, D. L. ed. Methods of soil analysis. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 3, pp. 869-920 (SSSA. Book Series no. 5).
36. Labella, S. 1976. Adaptación a los principales suelos agrícolas de la región, sorgo granífero. Miscelánea CIAAB. no. 15: 1-9.
37. Mc Lean, E. O. 1982. Soil pH and lime requirement. In: Page, A. L. eds. Methods of soil analysis. 2nd. ed. Madison, WI, ASA/SSSA. pt.2, pp. 199-224 (SSSA. Agronomy Series no. 9).
38. Maldonado, J. M.; Agüera, E.; Pérez Vicente, R. 2000. Asimilación del nitrógeno y del azufre. In: Ascón-Bieto, J.; Talón, M. eds. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid, McGraw-Hill/Interamericana. pp. 235-242.
39. Melin, A. A.; Zamora, M. 2007. Tecnología del cultivo. In: Sorgo en el sur. Buenos Aires, Argentina, INTA. cap. 4, pp. 16-20.
40. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2013. Anuario estadístico agropecuario 2013. Montevideo. s.p.

41. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay. (en línea). Montevideo, MGAP. 12 p. Consultado oct. 2014. Disponible en http://www.cebra.com.uy/renare/wp-content/files_mf/1376398534Agua_disponible.pdf
42. Molino, J.; Álvarez, C.; Severina, I.; Ortíz, D. 2012. Respuesta a la fertilización nitrogenada en sorgo en el centro de la provincia de Córdoba. (en línea). Manfredi, Córdoba. 5 p. Consultado abr. 2014. Disponible en http://inta.gob.ar/documentos/respuesta-a-la-fertilizacion-nitrogenada-en-sorgo-en-el-centro-de-la-provincia-de-cordoba/at_multi_download/file/INTAMfdi_RyC_2012_7_sorgo_Molino.pdf
43. Mulvaney, R. L. 1996. Nitrogen-inorganic forms. *In*: Sparks, D. L. ed. Methods of soil analysis. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 3, pp. 1123 - 1184 (SSSA. Book Series no. 5).
44. Nelson, D. W.; Sommers, L. E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In*: Sparks, D. L. ed. Methods of soil analysis. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 3, pp. 961- 1010 (SSSA. Book Series no. 5).
45. Parietti, E.; Porro, J. J. 1986. Evaluación del daño de malezas en el cultivo de sorgo granífero para diferentes distancias entre hileras y fertilización nitrogenada. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 114 p.
46. Perdomo, C.; Barbazán, M. 1999. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.
47. PIONEER. s.f. Sorgo; crecimiento y desarrollo del cultivo. (en línea). Martínez, Buenos Aires. Boletín técnico. 4 p. Consultado en set. 2014. Disponible en http://www.pioneer.com/CMRoot/International/Argentina_Intl/AGRONOMIA/boletines/SorgoCrecimiento_y_desarrollo_del_cultivo.pdf
48. Rooney, W. L. 2004. Sorghum improvement-integrating traditional and new technology to produce improved genotypes. *Advances in Agronomy*. 83: 59-89.

49. Silveira, O.; Nogueira, L. A.; Cardozo, A. A.; Moura, W.; de Felipo, B. V. 1980. Acumulação de materia seca e produção de grãos em sorgo granifero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), en função da adubação nitrogenada. Revista CERES. no. 152: 403-412.
50. Suárez, D. L. 1996. Beryllium, magnesium, calcium, strontium, and barium. In: Sparks, D. L. ed. Methods of soil analysis. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 3, pp. 575-601 (SSSA. Book Series no. 5).
51. Thomas G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D. L. ed. Methods of soil analysis. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 3, pp. 475-490 (SSSA. Book Series no. 5).
52. UDELAR. FA (Universidad de la República. Facultad de Agronomía, UY). 2007. Curso de microbiología. Montevideo. 22 p.
53. _____. 2010. Curso de fertilidad. Montevideo. 77 p.
54. Wright, R. J.; Stuczynski, T. I. 1996. Atomic absorption and flame emission spectrometry. In: Sparks, D. L. ed. Methods of soil analysis. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 3, pp. 65-90 (SSSA. Book Series no. 5).

9. ANEXOS

Anexo 1. Croquis del ensayo



Anexo 2. Resultados análisis de suelo (nitratos) en V4-5

Suelo - Nitrato a V4		
Fecha de muestreo: 22-12-12		
Dosis N	N-NO3-	
Parc. Grande	mg/l ó ppm	
		Prom.
0	0,67	6,66
0	0,68	6,83
0	0,94	9,38
40	1,26	12,61
40	1,70	17,02
40	2,50	25,01
80	1,57	15,67
80	2,04	20,42
80	2,33	23,31
120	2,59	25,86
120	2,21	22,12
120	2,81	28,07
160	1,87	18,72
160	1,50	14,99
160	5,78	57,81

Anexo 3. Detalle de valores obtenidos por parcela

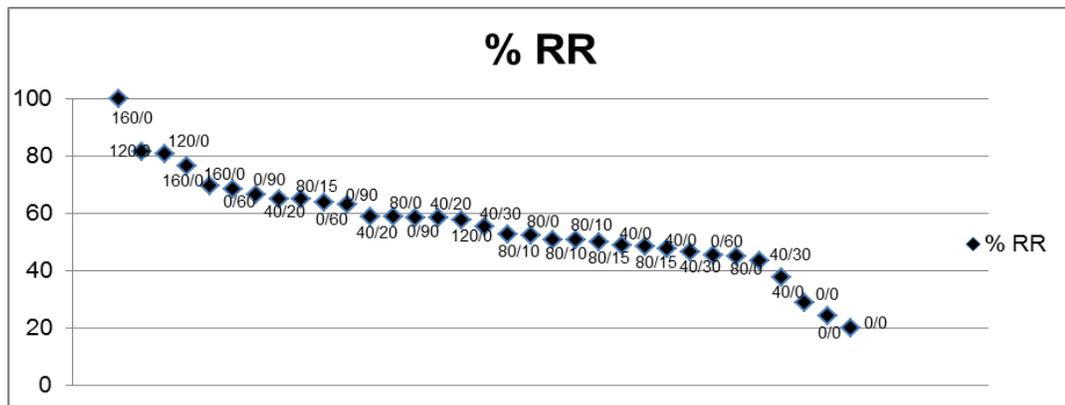
Cod.	Bloq.	TRATAMIENTO								MEDIA
		Dosis N inicial	Ajuste (kg/ha)	(gr.)			(%)	(gr)	(kg/ha BS)	
				PV parc.	PV-Muestra	PS-Muestra	MS	PS parc.	Y grano	
1	1	0	0	1185	290	92	32	376	1343	1623
1	2	0	0	1480	303	110	36	537	1919	
1	3	0	0	1360	302	100	33	450	1608	
2	1	0	60	3075	306	118	39	1186	4235	3932
2	2	0	60	2855	297	88	30	846	3021	
2	3	0	60	3155	308	153	50	1567	4540	
3	1	0	90	3135	291	109	37	1174	4194	4167
3	2	0	90	3210	295	100	34	1088	3886	
3	3	0	90	3955	291	154	53	2093	4420	
4	1	40	0	1780	310	122	39	701	2502	2968
4	2	40	0	2135	304	129	42	906	3236	
4	3	40	0	1950	297	135	45	886	3166	
5	1	40	20	2328	306	143	47	1088	3885	4037
5	2	40	20	2155	303	154	51	1095	3912	
5	3	40	20	3170	299	153	51	1622	4315	
6	1	40	30	2560	306	123	40	1029	3675	3216
6	2	40	30	2200	297	117	39	867	3095	
6	3	40	30	2100	305	117	38	806	2877	
7	1	80	0	2495	303	133	44	1095	3911	3458
7	2	80	0	1220	301	98	33	397	2985	
7	3	80	0	2435	300	120	40	974	3479	
8	1	80	10	2520	312	117	38	945	3375	3412
8	2	80	10	2345	309	129	42	979	3496	
8	3	80	10	1820	311	161	52	942	3365	
9	1	80	15	2285	307	125	41	930	3323	3618
9	2	80	15	1800	309	155	50	903	3225	
9	3	80	15	2110	301	172	57	1206	4306	
10	1	120	0	3175	302	144	48	1514	5407	4866
10	2	120	0	2140	291	146	50	1074	3835	
10	3	120	0	2720	301	166	55	1500	5357	
11	1	160	0	2655	297	159	54	1421	5076	5447
11	2	160	0	3110	296	123	42	1292	4615	
11	3	160	0	3280	303	172	57	1862	6650	
									3704	promedio

Anexo 4. ANAVA

Análisis de la varianza							
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV			
Rendimiento	33	0,8	0,71	15,67			
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)							
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor		
Modelo.	30085723,9	10	3008572,4	8,93	<0,0001		
Tratamiento	30085723,9	10	3008572,4	8,93	<0,0001		
Error	7414400,0	22	337018,2				
Total	37500123,9	32					
Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1694,47175							
Error: 337018,1818 gl: 22							
Tratamiento	n	E. E.	Medias				
160-0	3	335,17	5447	A			
120-0	3	335,17	4866	A	B		
0-90	3	335,17	4167	A	B	C	
40-20	3	335,17	4037	A	B	C	
0-60	3	335,17	3932	A	B	C	
80-15	3	335,17	3618		B	C	
80-0	3	335,17	3458		B	C	
80-10	3	335,17	3412		B	C	
40-30	3	335,17	3216		B	C	D
40-0	3	335,17	2968			C	D
0-0	3	335,17	1623				D

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

Anexo 5. Rendimiento Relativo de cada parcela con respecto al máximo rendimiento.



Anexo 6. Detalle pluviométrico del período (INUMET²) y fases de desarrollo del sorgo

pluviómetro n° 2812 Libertad - San José -												
PRECIPITACION (mm) DIARIA PARA LA ZONA DE LIBERTAD												
Fecha	mm	FASE	Fecha	mm	FASE	Fecha	mm	FASE	Fecha	mm	FASE	
01/12/2012	0	mm acum. 255	01/01/2013	0	VEGETATIVA	01/02/2013	0	REPRODUCTIVA	01/03/2013	38	grano lechoso	
02/12/2012	0		02/01/2013	0		02/02/2013	0		02/03/2013	10		
03/12/2012	0		03/01/2013	0		03/02/2013	0		03/03/2013	0		
04/12/2012	0		04/01/2013	17		04/02/2013	0		04/03/2013	0		
05/12/2012	0		05/01/2013	0		05/02/2013	0		05/03/2013	0		
06/12/2012	205		06/01/2013	0		06/02/2013	0		06/03/2013	0		
07/12/2012	0		07/01/2013	0		07/02/2013	0		07/03/2013	0	grano pastoso suave	
08/12/2012	0		08/01/2013	0		08/02/2013	0		08/03/2013	0		
09/12/2012	0		09/01/2013	0		09/02/2013	0		09/03/2013	6		
10/12/2012	50		10/01/2013	0		10/02/2013	0		10/03/2013	0		
11/12/2012	0	SIEMBRA	11/01/2013	0		11/02/2013	0		11/03/2013	0		
12/12/2012	0		12/01/2013	0		12/02/2013	0		12/03/2013	0		
13/12/2012	0		13/01/2013	0		13/02/2013	0		13/03/2013	0		
14/12/2012	0		14/01/2013	0	mm acum.	14/02/2013	15		14/03/2013	0	grano pastoso duro	
15/12/2012	0		15/01/2013	0	17	15/02/2013	0		15/03/2013	0		
16/12/2012	15	EMERGENCIA	16/01/2013	0	iniciación de período	16/02/2013	0	mm acum.	16/03/2013	0		
17/12/2012	0		17/01/2013	0		17/02/2013	0	50	17/03/2013	0		
18/12/2012	0		18/01/2013	0		18/02/2013	0	FLORACION	18/03/2013	0		
19/12/2012	35		19/01/2013	0		19/02/2013	10		19/03/2013	0		
20/12/2012	15		20/01/2013	0		20/02/2013	42		20/03/2013	23		
21/12/2012	0		21/01/2013	0		21/02/2013	7		21/03/2013	0		
22/12/2012	0	Análisis de Suelo	22/01/2013	0		22/02/2013	0		22/03/2013	0	madurez fisiológica	
23/12/2012	0		23/01/2013	0		23/02/2013	17		23/03/2013	0	SECA D O	
24/12/2012	40		24/01/2013	35		24/02/2013	20		24/03/2013	0		
25/12/2012	35		25/01/2013	0		25/02/2013	0		25/03/2013	0		
26/12/2012	0		26/01/2013	0		26/02/2013	0		26/03/2013	0		
V4	27/12/2012	AJUSTE W	27/01/2013	0		27/02/2013	0		27/03/2013	0		
	28/12/2012		28/01/2013	0		28/02/2013	0		28/03/2013	0		
	29/12/2012		29/01/2013	0					29/03/2013	0	mm acum.	
	30/12/2012		30/01/2013	0					30/03/2013	0	173	
	31/12/2012		31/01/2013	0					31/03/2013	0	Cosecha 1/4	
Total		412		52			111			77		
numero		31		31			28			31		
Media		82		110			128			112		
desvio est		38,227		6,896			9,402			7,995		
error est		6,866		1,239			1,777			1,436		
CV		0,468		0,063			0,073			0,071		
%CV		47		6			7			7		

Anexo 7. Precipitación promedio mensual histórica (INUMET²)

VALORES NORMALES DE PRECIPITACIÓN POR MES.
ESTACIÓN METEOROLÓGICA SAN JOSÉ
Período: 1971 - 2000

DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO
81,7	109,7	128,4	112,4

Observación: No hay estadística específica para cada pluviómetro del país.
La información histórica brindada corresponde a la estación meteorológica San José.
Fuente: Instituto Uruguayo de Meteorología

Anexo 8. Detalle del historial de temperaturas medias registradas por mes (INUMET²).

ESTACION METEOROLOGICA SAN JOSE												
LATITUD: 34°21,2'S			LONGITUD:56°45,4'W			ALTITUD: 72 m SNMM						
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL AL ABRIGO EN °C												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1970	24,3	26,1	22,4	19,9	14,7	6,1	11,4	12,4	15,6	15,9	18,0	21,9
1971	23,3	21,3	21,0	15,8	12,6	9,1	12,7	13,7	15,9	17,1	21,0	23,7
1972	24,4	23,4	20,3	18,1	17,0	13,9	10,7	11,7	15,0	15,6	18,2	21,6
1973	24,3	26,1	22,4	19,9	14,7	6,1	11,4	12,4	15,6	15,9	18,0	21,9
1974	23,8	23,7	21,7	*	*	*	*	*	*	*	*	*
SUPENDE ACTIVIDAD												
1995	*	*	*	17,4	13,6	10,2	10,6	10,9	13,3	15,1	18,7	22,7
1996	22,9	22,3	22,1	19,8	12,7	9,1	8,3	14,0	13,1	17,1	19,7	23,2
1997	25,3	22,1	21,2	18,5	15,2	11,1	12,2	13,1	12,4	16,4	19,2	20,4
1998	19,5	20,8	19,5	17,4	13,9	11,0	12,1	10,7	12,1	17,0	18,3	20,8
1999	21,2	21,8	21,5	15,5	12,9	10,5	10,1	12,3	13,8	16,5	19,3	22,5
2000	24,8	24,0	20,7	17,9	13,9	12,8	9,0	11,4	13,1	16,3	17,9	22,0
2001	23,7	23,8	22,3	17,2	13,7	12,8	10,9	15,4	14,0	17,5	18,6	21,2
2002	23,0	22,2	21,6	16,3	15,6	10,0	10,1	13,2	13,0	18,2	19,3	20,9
2003	23,4	21,9	21,1	16,0	14,3	11,1	10,0	10,3	12,8	17,1	18,5	20,0
2004	23,6	21,7	22,3	19,4	12,7	11,8	10,7	12,9	13,8	15,5	18,3	22,0
2005	24,5	22,5	19,8	15,8	13,7	13,2	11,2	17,5	12,7	15,3	20,6	20,6
2006	22,8	22,7	19,6	17,6	12,8	12,0	13,5	11,0	13,4	18,0	18,7	23,1
2007	23,8	24,7	21,2	18,3	11,6	9,9	8,0	9,3	16,0	17,6	17,6	22,1
2008	24,2	23,9	21,4	17,6	14,7	10,2	13,4	11,6	13,0	16,3	22,7	23,2
2009	24,5	23,2	21,6	17,6	14,8	9,7	9,0	13,6	12,2	15,1	19,9	15,4
2010	*	*	*	19	16,4	12,6	10,6	13	15	17,4	20,4	26,2
2011	27,0	24,9	22,9	19,4	14,4	12,2	10,2	11,6	16,2	17,4	22,8	22,6
2012	26,4	24,2	22,2	18,0	17,7	12,0	9,6	14,2	15,6	17,8	22,4	24,0
2013	25,7	23,0	20,6	19,8	14,8	12,2	11,4	10,7	13,2	18,4	20,0	28,6
2014	22,2	21,0	19,2	17,4	13,8	12,2	12,6	14,7	16,4	/	/	/
MEDIA	23,8	22,8	21,1	17,8	14,1	11,3	10,7	12,6	13,7	16,8	19,6	22,2

Anexo 9. Registro temperatura mínima, máxima y media del período (INUMET²)

ESTACION METEOROLOGICA SAN JOSE					
LATITUD: 34°21,2'S		LONGITUD:56°45,4'W		ALTITUD: 72 m SNMM	
TEMPERATURAS MEDIAS DIARIAS (°C)					
MES	Temp. Max. (°C)	Temp. Min. (°C)	Temp. Media (°C)		
Dic. 2012	29,4	11,8	24,5		
Ene. 2013	30,4	10,2	25,0		
Feb. 2013	29,5	8,5	23,7		
Mar. 2013	24,9	7,0	20,2		

Anexo 10. Resultados de rendimiento para sorgo en función del tamaño de chacra (MGAP.DIEA).

SORGO. Área sembrada, producción y rendimiento, por año agrícola, según estrato de tamaño de chacra.

Tamaño de chacra (ha) *	2008/09 *****			2009/10			2012/13		
	Área sembrada **	Producción ***	Rendimiento ****	Área sembrada	Producción	Rendimiento	Área sembrada	Producción	Rendimiento
TOTAL	68	324	4.764	35	138	3.916	49	209	4.262
Menos de 20	1	4	6.602	1	3	3.694	3	10	4.057
De 20 a 50	0,0	1	4.264	5	22	4.349	0	1	3.814
De 51 a 100	1	5	3.857	3	11	3.833	1	2	4.308
De 101 a 200	1	5	3.788	5	16	3.343	1	2	3.930
De 201 a 300	2	7	4.509	7	34	4.697	1	5	3.399
De 301 a 500	5	23	4.760	2	9	3.827	3	13	4.685
De 501 a 1.000	10	46	4.490	4	13	3.593	6	26	4.588
Más de 1.000	48	233	4.854	9	31	3.518	35	149	4.232

* Incluye los cultivos de trigo, cebada cervecera, maíz, sorgo, girasol y soja.

** En miles de hectáreas.

*** En miles de toneladas.

**** En kilos por hectárea.

***** Para 2008/09, la información corresponde a tamaños de áreas sembradas con sorgo.

Fuente: MGAP. DIEA (2014)