

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA
TARDÍA (V_{10-11}) SOBRE EL RENDIMIENTO DE
MAÍZ EN CONDICIONES DE RIEGO Y SECANO**

por

Mateo CERIANI GUERRA

Jorge Andrés INNELLA GONZALEZ

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2012**

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. M.Sc. Ph.D. Carlos Perdomo

Ing. Agr. Esteban Hoffman

Ing. Agr. Guillermo Cardelino

Fecha: 21 de agosto de 2012

Autores:

Mateo Ceriani Guerra

Jorge Innella González

AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros Agrónomos Carlos Perdomo y Esteban Hoffman, por el apoyo académico y personal brindado durante la realización de este trabajo.

A la Ing. Agr. Mónica Cadenazzi por el apoyo al momento de hacer los análisis estadísticos.

A los funcionarios de laboratorio número 1 de la EEMAC. Facultad por su disposición para colaborar.

A la Ing. Agr. Cristina Mori del laboratorio de suelos que nos ayudó al momento de realizar los análisis químicos.

Al personal de biblioteca de Facultad de Agronomía.

A nuestros padres y hermanos por el apoyo incondicional en todo momento desde el comienzo de esta etapa que hoy culmina y a la familia querida.

A nuestros amigos y compañeros, por estar y por hacer de la Facultad un muy buen período de nuestras vidas.

A nuestros amigos que siempre de una u otra forma tenían la palabra de aliento para lograr esto.

A todos quienes de una u otra manera hicieron posible la realización de este trabajo

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRAFICA</u>	3
2.1. SITUACIÓN ACTUAL DEL MAÍZ EN EL URUGUAY: RENDIMIENTO PROMEDIO U MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA	3
2.2. DINÁMICA DEL NITROGENO.....	3
2.2.1. <u>Ciclo del nitrógeno en el suelo</u>	3
2.2.1.1. Fuente de N para las plantas.....	3
2.2.1.2. Pérdidas.....	5
2.3. NITRÓGENO EN LA PLANTA.....	7
2.4. RESPUESTA AL AGREGADO DE N.....	8
2.4.1. <u>Efecto de la fertilización con N en los componentes del rendimiento</u>	10
2.5. IMPORTANCIA DEL MOMENTO DE AGREGADO DE N.....	11
2.5.1. <u>Respuesta a seis hojas (V6)</u>	11
2.5.2. <u>Respuesta a aplicación tardía de N (V10-11)</u>	12
2.5.3. <u>Respuesta al agregado de N en función de las condiciones hídricas del ambiente</u>	14
2.5.4. <u>Importancia de la fuente nitrogenada</u>	16
2.6. INTERACCIÓN NITRÓGENO CON AZUFRE.....	17
2.7. INDICADORES DE STATUS NITROGENADO.....	18
2.7.1. <u>En el estadio de seis hojas</u>	19
2.7.2. <u>Aplicación tardía V10-11ía V10-11</u>	21
3. <u>MATERIALES Y METODOS</u>	24
3.1. LOCALIZACIÓN DEL ENSAYO Y MANEJO DEL CULTIVO.....	24
3.2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	24
3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS.....	25
3.3.1. <u>Campo</u>	25
3.3.2. <u>En laboratorio</u>	26
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	26
3.4.1. <u>Modelo estadístico</u>	26

4. <u>RESULTADOS Y DISCUSION</u>	28
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	28
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL REIGO.....	29
4.3. RENDIMIENTO Y COMPONENTES SEGÚN CONDICION HÍDRICA.....	31
4.3.1. <u>Relación entre el rendimiento y sus componentes</u>	33
4.4. RESPUESTA AL AGREGADO DE N.....	35
4.4.1. <u>Eficiencia agronómica del nitrógeno</u>	38
4.5. RESPUESTA DEL CULTIVO DE MAÍZ AL MOMENTO DE APLICACIÓN DEL N.....	39
4.6. COMPARACIÓN DE FUENTES DE N Y S.....	41
4.7. POSIBILIDAD DE PREDECIR LA RESPUESTA AL NITRÓGENO EN V10.....	44
4.8. INDICADORES DEL STATUS NITROGENADO.....	47
4.8.1. <u>Estimación de niveles críticos para los distinto</u>	48
5. <u>CONCLUSIONES</u>	53
6. <u>RESUMEN</u>	55
7. <u>SUMMARY</u>	56
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	57
9. <u>ANEXOS</u>	66

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Esquema de los tratamientos a evaluados.....	25
2. Manejo del agua de riego.....	31
3. Efecto de la condición hídrica sobre los componentes de rendimiento según rendimiento promedio, máximo y mínimo.....	32
4. Componentes del rendimiento según agregado de nitrógeno como urea en estadio de seis hojas.....	37
5. Eficiencia agronómica de nitrógeno según dosis de urea agregada a V6 y condición hídrica.....	39
6. Efecto del momento de aplicación de N sobre los componentes de rendimiento.....	41
7. Efecto de la fuente de Nitrógeno en los componentes de rendimiento para ambas condiciones hídricas.....	43
 Figura No.	
1. Precipitaciones mensuales del período Exp. en relación al promedio histórico y las temperaturas; máximas, mínimas y el promedio histórico (Estación meteorológica de Mercedes) Precipitaciones por década mensual post 1 de setiembre 2010.....	28
2. Precipitaciones por década mensual posterior al 1 de setiembre de 2010 y ubicación de los momentos más relevantes del ciclo del cultivo (siembra, V6, V10 Cosecha y el período crítico (PC)).....	29
3. Información de lluvia y ETc acumulada utilizada por la empresa para decidir el manejo del riego.	30
4. Efecto de la condición hídrica en el rendimiento.....	32

5. a) Relación entre rendimiento y NG; b) Relación entre rendimiento y PG; c) Relación entre el NG y el PG. Para condiciones de riego y de secano.....	35
6. Respuesta al agregado total de nitrógeno como urea a V6 en condiciones de Riego y Secano y sus respectivas Dosis Óptimas Físicas (DOF) y Dosis Óptimas Económicas (DOE).....	38
7. a) Relación entre la dosis de nitrógeno y el NG, b) Relación entre la dosis de N y el PG	40
8. Efecto del momento de aplicación de N en el rendimiento. Líneas en las barras indican desvíos estándar.....	42
9. Efecto de las fuentes de nitrógeno y azufre agregadas en V6 con dosis equivalentes a 50 unidades de N.....	
10. Rendimiento y relación N:S en planta en V10.....	44
11. : a) Evolución de las lecturas de SPAD y LCC desde V6 a V10 para distintas dosis de N en V6.....	45
12. a) Relación entre el porcentaje de nitrógeno en la hoja opuesta a la mazorca en el estadio de V10 y el nivel de clorofila en hoja estimado por SPAD Minolta 502; b) Relación entre índice de color LCC y el porcentaje de nitrógeno en la hoja opuesta a la mazorca.....	48
13. Relación entre valor de tres índices de respuesta a N en V10 y rendimiento relativo de maíz bajo riego.....	49
14. Relación entre valor de tres índices de respuesta a N en V10 y rendimiento relativo de maíz en secano.....	51

1. INTRODUCCION

El maíz es de los granos alimenticios más antiguos del mundo y uno de los cereales más importantes a nivel mundial. Ocupa el segundo lugar en volumen de producción después del trigo y el primer lugar en rendimiento de grano por hectárea. Es un cultivo de gran importancia económica a nivel mundial ya sea como alimento humano, para ganado o como fuente de gran número de productos industriales. Se lo encuentra en una gran diversidad de ambientes desde los 58° de latitud norte en Canadá y Rusia y hasta los 40° de latitud sur en Argentina y Chile (Paliwal et al., 2009).

La producción mundial es de 800 millones de toneladas lograda en más de 158.600.000 hectáreas. El mayor productor de maíz del mundo es EE.UU con un área de siembra de más de 32 millones de hectáreas con un rendimiento promedio de 10.339 Kg.ha⁻¹ (FAO, 2009). En Uruguay se sembraron 80.900 ha en la zafra 2010/2011 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011) en la cual se obtuvo un promedio de 3.574 Kg.ha⁻¹. A nivel experimental la información nacional registra un máximo de 15310 Kg.ha⁻¹ muy cercano al potencial de la especie en esta latitud (Giménez et al., 2010).

Si se analizan los datos del anuario estadístico (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010) se observa que en los últimos 8-10 años la producción de maíz del Uruguay ha aumentado, principalmente debido al incremento del área de siembra ya que los rendimientos han quedado prácticamente estancados, 4000 y 5000 Kg.ha⁻¹ en el periodo 2002-03 y 2009-10 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010).

Estos bajos rendimientos obtenidos a nivel de chacra se pueden explicar por una serie de limitantes que presenta el cultivo, como son la importante sensibilidad al déficit hídrico y su alto requerimiento nutricional. Siendo estas características importantes al momento de elegir la chacra.

Por consecuencia de la variabilidad entre y dentro del año de las precipitaciones, ha comenzado a crecer lentamente el área de maíz bajo riego en el Uruguay (aunque no hay registros nacionales del área regada) con el consiguiente incremento del potencial y la aparición de nuevas exigencias de manejo entre las cuales se puede contar el manejo de nutrientes.

Tradicionalmente el ajuste de la fertilización nitrogenada en maíz se realizaba a la siembra y a V6 en base a indicadores de suelo, como nitratos y materia orgánica. Sin embargo, en esos estadios aún existe incertidumbre sobre la respuesta del cultivo al agregado de N ya que los niveles críticos no están bien definidos para las diferentes situaciones de chacra, y por consiguiente las recomendaciones en esos estadios pueden ser solamente aproximaciones a la demanda real de N del cultivo. Con la tecnología actual existe por lo tanto el riesgo de aplicar dosis bajas o excesivas de N.

La hipótesis principal de este trabajo es que existe respuesta de maíz al N (nitrógeno) agregado tarde en el ciclo a V10-11 y que esta puede ser predicha a través de diversos índices que evalúan el status nitrogenado de la hoja más joven completamente

desarrollada. Aunque también el grado de respuesta va a depender del nivel hídrico posterior al agregado. El objetivo principal es, por tanto, cuantificar el nivel de respuesta del maíz a aplicaciones de N en V10-11 e identificar índices foliares que permitan predecir la respuesta.

2. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

2.1. SITUACIÓN ACTUAL DEL MAÍZ EN URUGUAY: RENDIMIENTO PROMEDIO Y MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

En los últimos 9 años en el país el área de maíz, pasó de 38.900 ha en la zafra 2002-03 a 80.900 ha en 2010-11. Sin embargo, al mismo tiempo ha existido un relativo estancamiento en los rendimientos (García 2009, URUGUAY. MGAP. DIEA 2011) que se ha mantenido en un promedio de 4.440 Kg.ha⁻¹. Es posible que con la tecnología actual se pueda incrementar los rendimientos, ya que con los híbridos de maíz de muy alto potencial y el riego como práctica de manejo, se logra aproximar los rendimientos a los reportados por la investigación. Como ejemplo del potencial que puede ser alcanzado, la información experimental reporta rendimientos de maíz en secano de 6689 Kg.ha⁻¹ y con riego de 15310 Kg.ha⁻¹ (Giménez, 2010).

Perdomo y Hoffman (2011) estiman que en la mayoría de los casos a nivel de producción en Uruguay no se usa el test de N-NO₃ a V6 como indicador, sino que probablemente la fertilización promedio consista en aplicar a la siembra una dosis de 130 Kg.ha⁻¹ como 18-46-0 y luego una refertilización al estado de seis hojas con 90 Kg.ha⁻¹ de urea, lo cual hace un total de 65 Kg N.ha⁻¹, siendo esto datos una simplificación de una situación más compleja.

Perdomo (2007), propone mejorar el ajuste de la dosis total de N agregada con respecto a la óptima para incrementar el rendimiento y la rentabilidad del cultivo, usando como estrategia agregar una dosis baja a la siembra, conservadora a V6 (basada en el test de N-NO₃) y luego monitorear el cultivo tratando de detectar situaciones de deficiencias post V6.

2.2. DINÁMICA DEL NITRÓGENO

La cantidad de N disponible en el suelo para las plantas depende de variados factores, por lo tanto es de gran importancia conocer el ciclo de este nutriente, en el cual intervienen un conjunto muy importante de factores.

2.2.1. Ciclo del Nitrógeno en el suelo

El ciclo del N en el sistema suelo-planta-atmosfera involucra transformaciones orgánicas e inorgánicas del mismo, coexistiendo procesos de ganancias, perdidas y ciclado dentro del suelo.

2.2.1.1. Fuente de N para las plantas

Las ganancias al sistema suelo-planta son la fertilización, la fijación biológica o el N que entra con lluvias, es decir N que estaba fuera del sistema. La mineralización, si bien no es una ganancia para el sistema suelo-planta, constituye la principal fuente de N para las plantas en ecosistemas no disturbados (García, 1996). Las diferentes especies

vegetales absorben este nutriente en forma de NO_3^- y/o NH_4^+ con distinto grado de preferencia, aunque el maíz es capaz de absorber ambas. Los principales factores que afectan la mineralización del N son la humedad, la temperatura, y las propiedades físico químicas del suelo aunque también esta se ve afectada por las prácticas de manejo o la presencia de otros nutrientes (Campbell, citado por García, 1996). La principal diferencia en capacidad de mineralización entre suelos está dada por el contenido de N total del suelo¹. La cantidad de estos iones en la solución del suelo depende de las reservas de N orgánico y de la cantidad de fertilizante aplicado (Carrato y Hackembruch, 1997).

El proceso de mineralización del N orgánico del suelo durante la estación de crecimiento de los cultivos, es de importancia ya que puede contribuir en gran parte a la nutrición de los mismos (Dahnke y Jhonson, 1990).

En Argentina Echeverría et al. (1993), estimaron que la cantidad de N mineralizado durante el ciclo de cultivo de trigo fue de 27- 47 Kg de N ha⁻¹ en los 40 cm superiores del suelo para situaciones de baja disponibilidad hídrica (25% de agua útil) y de 60- 100 Kg de N ha⁻¹ para situaciones de alta disponibilidad hídrica (60% de agua útil). Los valores inferiores del rango corresponden a los suelos con menores contenidos de materia orgánica (MO) (1-2%) y textura más gruesa, mientras que los superiores corresponden a los suelos de mayor contenido de MO (5-6%) y textura más fina.

Andrade et al., citados por García (1996), en Argentina, detectaron bajo adecuadas condiciones de disponibilidad hídrica una mineralización neta 150 Kg de N ha⁻¹ durante el ciclo, para cultivos realizados 3 o 4 años después de la etapa de pasturas y de 240 Kg de N ha⁻¹ para cultivos con antecesor pastura.

Los suelos del sudeste bonaerense presentan altos contenidos de materia orgánica en el horizonte superficial, por lo que la capacidad de mineralización de N durante los cultivos de verano puede ser muy elevada. De acuerdo a estimaciones de mineralización, es factible que estos suelos liberen entre 50 y 250 Kg de N ha⁻¹ con buena disponibilidad hídrica, durante el ciclo del cultivo de maíz (Echeverría y Bergonzi, citados por Calviño y Echeverría, 2003).

En concordancia con lo anterior Meroni et al. (2010) estimaron la mineralización de N en suelos de la Cuenca Lechera Sur de Uruguay con diferentes niveles de humedad, determinando que los tratamientos con más humedad presentaron mayor mineralización neta de N, especialmente en los niveles cercanos a capacidad de campo. De lo anterior se puede hacer referencia que el riego además de eliminar el posible estrés hídrico, también contribuye con el incremento de la mineralización de N por ende de la disponibilidad de este para el cultivo.

¹ Perdomo, C. 2011. Com. personal.

2.2.1.2. Pérdidas

En las condiciones hídricas del Uruguay donde llueve aproximadamente lo mismo en todos los meses del año, pero en los meses de invierno donde la demanda atmosférica es baja es esperable la ocurrencia de excesos hídricos lo que puede generar pérdidas de N. En cambio en primavera-verano la demanda atmosférica es elevada disminuyendo la probabilidad de pérdida de N, aunque en años lluviosos es esperable que igualmente ocurran pérdidas importantes de N.

Entre las pérdidas de N desde el sistema suelo- planta se deben considerar: las permanentes que son la volatilización de NH_3 , la desnitrificación, el lavado de NO_3^- y las pérdidas por erosión. También existen y no hay que olvidar las pérdidas temporarias de N disponible para las plantas que son la fijación de amonio por parte de las arcillas y la inmovilización por los microorganismos, no siendo estas salidas del sistema.

- La volatilización, bajo forma de amoníaco (NH_3) es el proceso por el cual el amoníaco gaseoso sale de la superficie del suelo a la atmósfera, siendo esta la principal causa de la baja eficiencia de algunos fertilizantes amoniacales, (Echeverría y Saiz Rozas, 2006). La volatilización del amoníaco es un proceso complejo que está afectado por diversas reacciones químicas, factores físicos y biológicos. La magnitud de las pérdidas están afectadas por factores ambientales, suelo; materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico (CIC), y factores de manejo como fertilización, cobertura y calidad del residuo (Ferraris et al., 2009). Hauck (1981) usando ^{15}N estimó que las pérdidas de N del fertilizante nitrogenado por volatilización serían en promedio del orden del 15 al 20%.

Es de particular importancia cuando se aplican fertilizantes amoniacales como es el caso de la urea. En el suelo, la urea es hidrolizada a ión NH_4^+ (enzima ureasa), la hidrólisis resulta en un consumo de H^+ lo que genera un aumento en el pH, lo que favorece la formación de NH_3 y por lo tanto las pérdidas de este por volatilización (García, 1996). La tasa de hidrólisis de la urea depende de la concentración de esta, el pH, la temperatura y el contenido de agua (Kissel y Cabrera, citados por García, 1996). En general la hidrólisis se acelera con altas concentraciones de urea, pH de 6,5 – 7, con temperaturas superiores a 15°C , cuando el contenido de agua en el suelo está cercano a capacidad de campo y cuando el suelo se está secando lentamente (García, 1996). Contrariamente lluvias de 10-20 mm incorporan el amonio o la urea en profundidad anulando las pérdidas por volatilización (Torres s.f., García 1996).

Bajo siembra directa las aplicaciones de urea se realizan en superficie, ya que no se cuenta con maquinaria adecuada para incorporarla, de esta manera se pueden producir pérdidas importantes de amonio por volatilización (Keller, Mengel, Fox y Piekielek, citados por Barbieri, 2002).

Sainz Rozas et al., citados por Echeverría y Sainz Rozas (2006), en Balcarce, determinaron que las pérdidas por volatilización de la urea fueron 3,4 y 5,9 % del N aplicado en dosis de 70 y 140 Kg N ha^{-1} respectivamente en aplicaciones al momento de

la siembra. Sin embargo las mismas fueron del 8,1 y 11,4 % del N aplicado para el estadio de seis hojas, esto es debido a las mayores temperaturas de suelo que predominan en el mes de diciembre. Cuando la humedad del suelo no limita el proceso de pérdida, la cantidad de amoníaco volatilizado se relaciona con la temperatura del suelo, con temperaturas inferiores a 7 °C no existen pérdidas relevantes por volatilización, (Sainz Rozas et al., citados por Echeverría y Sainz Rozas, 2006).

Los datos anteriores no se consideran pérdidas relevantes por volatilización, sin embargo Ferraris et al. (2009) en Pergamino alcanzaron pérdidas máximas por volatilización del amoníaco con la mayor dosis de N (120 Kg.ha⁻¹) siendo de 19 Kg N.ha⁻¹. Barbieri et al. (2005), en Balcarce registraron pérdidas máximas de 16 Kg N.ha⁻¹ (N120-Urea la voleo), la misma cantidad obtuvo Salvagioti (2005), con N200 y Urea al voleo, que pueden llegar a significar una pérdida económica.

- La desnitrificación, es un proceso de reducción biológica, realizado por un número importante de microorganismos anaerobios facultativos. Como toda reducción requiere de energía, por lo que debe existir en el suelo materia orgánica de fácil descomposición con alta relación C/N (Perdomo et al., 2008).

El principal factor que controla la magnitud de las pérdidas por desnitrificación es el contenido de humedad del suelo, no obstante, otros factores como la concentración de nitratos, la disponibilidad de carbono, el pH y la temperatura del suelo inciden en este proceso. Las tasas de desnitrificación aumentan abruptamente cuando el espacio poroso del suelo lleno con agua supera al 78 -79% (Aulakh et al., citados por Echeverría y Sainz Rozas, 2006). Las pérdidas por desnitrificación de N aplicado como fertilizante pueden llegar al 70%, con valores modales que varían entre 2,5 y 50% de pérdida (García, 1996).

Echeverría y Sainz Rozas (2001) en Balcarce, Argentina, en un cultivo de maíz bajo riego reportan pérdidas de N agregado a V6, por desnitrificación acumulada hasta la madurez del cultivo de 6,4 Kg de N-N₂O, las pérdidas solamente representaron el 1,43 % del N aplicado. Estos resultados indican que aplicando el N a V6, la desnitrificación no fue un mecanismo de pérdida importante de N para el cultivo, ya que en este estadio la mayor demanda por parte del cultivo disminuyó marcadamente el contenido de humedad del suelo y por tanto las pérdidas. En otro ensayo también en Balcarce, sobre un cultivo de maíz irrigado, las mayores tasas de desnitrificación se observaron durante el periodo siembra- V6 y fueron mínimas entre V6 y la madurez del cultivo (Sainz Rozas et al., citados por Echeverría y Sainz Rozas, 2006). En aplicaciones a la siembra, las pérdidas fueron de 6,8 y 3,4 % del N agregado para las dosis de 70 y 210 Kg N ha⁻¹, mientras que las mismas no alcanzaron el 1% cuando el N se aplicó a V6. Las mayores pérdidas en el momento de la siembra se explican por la mayor humedad del suelo (Echeverría y Sainz Rozas, 2006).

Con lo anterior se puede concluir que este proceso es poco probable que ocurra en primavera- verano en Uruguay, salvo en años muy particulares extremadamente

lluviosos o cuando el cultivo de maíz se realiza bajo riego mal manejado provocando excesos en algunas partes de la chacra.

- La lixiviación, se da principalmente en los meses de otoño- invierno, ya que durante primavera-verano el lavado es mínimo debido a que es poco probable tener excesos hídricos. Sin embargo si ocurren precipitaciones importantes posteriores a la aplicación de fertilizante nitrogenado, pueden producir flujo de nitrato por lavado debido al flujo preferencial de agua por los macroporos (Echeverría y Sainz Rozas, 2006), esto solo se da si el suelo está saturado.

La lixiviación se da principalmente bajo forma de nitrato. El ión nitrato es soluble y no es adsorbido por los coloides del suelo debido a su carga neta negativa, esto lleva a que este sujeto a altas pérdidas por lavado (Echeverría y Sainz Rozas, 2006). Algunos de los factores que pueden influir sobre la magnitud de las pérdidas por lavado son: 1) dosis, tiempo, fuente y método de aplicación del N, 2) uso de inhibidores de la nitrificación, 3) absorción de N por el cultivo, 4) características del suelo que afectan el movimiento del agua y 5) cantidad y distribución de las precipitaciones, cantidad y oportunidad de aplicación de riego suplementario (Echeverría y Sainz Rozas, 2006).

2.3. NITRÓGENO EN PLANTA

El N cumple funciones vitales en los seres vivos, encontrándose dentro de las plantas en formas tanto orgánicas como inorgánicas. Este nutriente juega un rol esencial en el crecimiento del vegetal ya que es constituyente de moléculas como: 1) clorofila; 2) aminoácidos esenciales; 3) proteínas; 4) enzimas; 5) nucleoproteínas; 6) hormona; 7) Trifosfato de adenosina (ATP) (Perdomo et al., 2008).

El contenido de N en la biomasa varía entre 1 y 5% según el estadio y dicho nutriente es absorbido bajo forma de NO_3 y/o NH_4 . Estos iones se mueven hacia las raíces respectivamente por flujo masal o difusión (Echeverría y Sainz Rozas, 2006).

Un 50 a 70 % del N total en las hojas de maíz está directamente asociado a los cloroplastos, o sea está directamente ligado a la fotosíntesis (Hagman, citado por Maturano, 2002). Es por ello que existe una fuerte correlación entre la tasa de fotosíntesis neta y el N foliar, o contenido de proteínas (Hunt y van der Poorten, citados por Maturano, 2002). La alta correlación existente entre la tasa fotosintética y la proteína soluble en hoja, permite utilizar el N foliar como criterio para estimar la capacidad fotosintética en un ambiente determinado (Edwards, citado por Maturano, 2002). Esto coincide con Stocking e Ongun, citados por Argenta et al. (2001b) los cuales encontraron que al rededor de 50-60% del N de las hojas está integrado al complejo enzimático asociado a los cloroplastos.

La acumulación de N en la planta en función del tiempo sigue una curva sigmoide donde la acumulación al inicio es escasa. Luego le sigue una etapa de máxima absorción de N que corresponde al período de activo crecimiento. Finalmente, la tasa a

de absorción de N se reduce en la fase de llenado de grano. Las tasas de absorción y la duración de cada una de estas etapas dependen de factores tales como especie, variedad, manejo, etc. Cuando se relaciona la producción de materia seca del cultivo en función del tiempo, se observa que la de acumulación de N antecede a la de MS (Perdomo et al., 2008).

La acumulación de N se anticipa al crecimiento y en condiciones de N no limitante la tasa de acumulación de N es máxima en el período que transcurre entre el estadio V5-V6 y los 15-20 días después de la floración, alcanzando valores de 3,8 Kg de N ha⁻¹ día⁻¹ (Uhart y Andrade, 1995). En forma similar, en condiciones de riego, Andrade et al., citados por Perdomo et al. (2008), encontraron que la tasa máxima de absorción (entre V5 y R4-R5) varió entre 2,7 y 3,7 Kg.ha⁻¹.día⁻¹. Sin embargo, en cultivos de elevados rendimientos, se reportaron tasas de acumulación de hasta 8,4 Kg.ha⁻¹ día⁻¹ entre V5-V6 y panojamiento (Karlen et al., citados por Echeverría y Sainz Rozas, 2006).

El maíz necesita alrededor de 20-25 Kg de N.ha⁻¹ por cada tonelada de grano producida (Torres, citado por Atchaval y Ducamp, 1998). Borghi y Wornicov (1998) encontraron que a medida que aumentó el rendimiento en grano, aumento el total de N absorbido por el cultivo, determinando que el cultivo requirió absorber 24 Kg N.ha⁻¹ para producir una tonelada de grano. En tal sentido (Andrade et al., citados por Giménez, 2001) señala que el cultivo requiere depositar en la parte aérea entre 16 y 23 Kg de N para producir una tonelada de grano con variaciones según el híbrido.

Por tanto, para lograr una producción de 7,4 Mg.ha⁻¹ se requiere 185 Kg.ha⁻¹ de N (Darwich, citado por Atchaval y Ducamp, 1998). En concordancia con lo anterior Perdomo (2008) cita para el Uruguay que para producir 12 toneladas de MS/ha se requiere 275 Kg N.ha⁻¹. En condiciones de riego, Andrade et al., citados por Perdomo et al. (2008) encontraron que la absorción total de N varió entre 240 y 320 Kg.ha⁻¹ totales de N.

Con lo anterior se concluye que el maíz acumula gran cantidad de N en la etapa de activo crecimiento (V4 y R4) por lo tanto para obtener altos rendimientos es necesario que la disponibilidad de este nutriente en suelo no sea limitante.

2.4. RESPUESTA AL AGREGADO DE N

El N es uno de los principales nutrientes requerido para la producción. Deficiencias de este elemento reducen la expansión foliar, provocan su prematura senescencia y afectan la tasa fotosintética, dando como resultado una menor producción de materia seca y grano. Por otra parte la disponibilidad de N afecta el contenido proteico del grano cosechado. La incidencia del N sobre los dos factores, rendimiento y contenido de proteína, hacen que su manejo sea estratégico en producción de granos, sobre todo destinado a alimentación (Ferraris et al., 2008).

La respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz depende en gran medida de la disponibilidad hídrica, tipo de suelo, años de agricultura y disponibilidad de N-NO₃, (Anónimo, citado por Torres, 1996).

Cuando el nivel de N del suelo es bajo, la probabilidad de respuesta es elevada. Consecuentemente, la pendiente de la curva de respuesta, conocida como eficiencia agronómica (Kg grano producido/Kg N aplicado) es mayor en situaciones con bajo contenido de nitratos que en situaciones con alto contenido (Alvarez et al., 2003).

En Uruguay la respuesta a la aplicación de N se ha incrementado en forma lineal con el aumento de los años de agricultura, Ackerman y Gasparri (2011), Hoffman y Fassana.² Este incremento en la respuesta es probablemente por la falta del aporte de N en los primeros años después de la pradera (Studdert et al., citados por Calviño y Echeverría, 2003). Este punto es importante a tener en cuenta, ya que en la agricultura del Uruguay prácticamente se dejó de lado la rotación con pasturas y se está ingresando en un escenario de agricultura continua, lo que se torna un factor limitante a la hora de alcanzar altos rendimientos.

Sanchez y Muñoz (2008) en el sudeste de Córdoba en un experimento de cuatro años, encontraron que en un año donde las precipitaciones fueron inferiores a la mediana histórica, los tratamientos con agregado de fertilizante nitrogenado no presentaron diferencias significativas entre sí. Los autores explican esta falta de respuesta al hecho de que existe una alta relación entre la disponibilidad de agua durante el ciclo del cultivo y la respuesta a la fertilización. Confirmando lo mencionado por Andrade et al. (2000b) quienes sostienen que las precipitaciones son un factor clave a tener en cuenta en el cultivo de maíz. En el mismo trabajo se encontró que el umbral crítico de respuesta fue de 216 Kg N.ha⁻¹ (N-NO₃ a 60 cm + fertilizante) en años donde el agua no fue limitante para la producción de granos.

Capurro et al. (2007) también en Argentina encontraron respuesta lineal al N, en cinco años de ensayos, obteniendo incrementos del orden de los 4700 Kg.ha⁻¹ sobre los testigos sin fertilizar con dosis de 150 y 180 Kg N.ha⁻¹, en Arguidoles típicos y acucos en el sur de Santa Fe.

Pagani et al. (2008) en el sudeste bonaerense trataron de determinar la dosis óptima económica (DOE) para maíz en siembra directa, según el potencial de rendimiento del cultivo dado por las condiciones ambientales o hídricas del año. Con una relación de precio de 10 Kg de maíz para pagar 1 Kg de N y con una disponibilidad de 50 Kg N.ha⁻¹ a la siembra, la dosis óptima económica sería de 86, 110, 145 Kg N.ha⁻¹ para años poco favorables, promedio y favorables respectivamente. Para iguales condiciones a V6 la dosis sería 69, 83 y 123 Kg N.ha⁻¹, para años poco favorables, promedio y favorables respectivamente.

² Hoffman, E.; Fassana N. 2012. Com. personal.

Resultados similares son reportados por Pedrol et al. (2008) en la EEA INTA Oliveros. La dosis de N crítica, fue de 180 Kg N.ha⁻¹, logrando un incremento frente al testigo de 65%.

Below et al. (2007) en Illinois USA, encontraron que la dosis óptima para los híbridos comerciales fue de 150 Kg N.ha⁻¹ para obtener 10,1 Mg.ha⁻¹. Los híbridos experimentales alcanzaron un máximo de 6,9 Mg.ha⁻¹ con 118 Kg de N.ha⁻¹. A partir de estos valores, aumentos de la dosis de N no mostraron efectos positivos ni negativos en el rendimiento del cultivo. La EUN fue en promedio 21,6 Kg grano por Kg de N para el híbrido comercial y de 18,7 Kg grano por Kg de N para los híbridos experimentales.

En Uruguay es escasa la información reportada sobre respuesta al agregado de N en maíz. En uno de los trabajos publicados, donde se estudió respuesta en 10 sitios no se encontró respuesta en ninguno de ellos (Borghi y Wornicov, 1998). Esta falta de respuesta puede ser explicada debido a las limitantes hídricas en dos de los sitios y a los altos niveles de nitrato en el suelo a V6 en el resto.

2.4.1. Efecto de la fertilización con N en los componentes del rendimiento

El rendimiento del cultivo de maíz puede ser descompuesto en dos componentes principales: el número de grano por m² (NG, gr.m⁻²), y el peso de grano (PG). El componente NG, está definido por el número de órganos reproductores que se forma en etapas sucesivas: número de plantas, número de espigas por planta y NG por espiga. Este último se descompone en número de hileras por espiga y NG por hilera (Fleury, 1990). El NG queda determinado en el estado límite de aborto de granos, es decir, aproximadamente, 15 a 20 días después de floración (Otegui y Bonhomme, citados por Maturano, 2002).

El estrés nitrogenado afecta el número de espigas por m² y en menor grado, el número de hileras por espigas. La regulación del NG por metro cuadrado que interviene en los 20 días posteriores a floración está relacionado a la tasa de crecimiento de la planta durante el período de comienzo de elongación de estigmas, estado límite de aborto de granos (Otegui et al., 1997). Un estrés nitrogenado afecta en menor medida el PG que el de NG.

Melchiori et al. (2006) reportan que el NG aumentó en los tratamientos fertilizados frente al testigo pero no varió significativamente con la dosis, ni con el momento. En cambio el PG respondió positivamente a la dosis de N agregada a la siembra y no tiene importancia el momento de la refertilización. En el mismo sentido Melchiori et al. (2004) afirmó que el agregado de N aumenta el rendimiento a través de un incremento en el PG y el NG. Estos resultados dependen de las condiciones ambientales y no son relaciones absolutas.

En un experimento Di Paolo y Rinaldi (2007), encontraron que las dosis de N no afectó la densidad de espigas ni el número de espigas por planta, ya que el N residual

del suelo en los dos años de experimento fue lo suficientemente alto como para no afectar estos componentes.

Salvagiotti et al. (2001) no observaron interacción ni diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de N (0-80-160) y azufre (0-25-50) cuando se analizaron los componentes del rendimiento en condiciones de secano pero con buenas precipitaciones. En el 2º año de ensayo, con menores precipitaciones se obtuvo un promedio de 2188 granos.m⁻² y 245 mg de PG, un 23 y 7 % menor que la zafra anterior respectivamente, indicando que el NG por metro cuadrado fue el más afectado en la determinación del rendimiento.

De lo expuesto queda claro que si bien ambos componentes del rendimiento se ven afectados por la disponibilidad de N, una deficiencia de este nutriente en situaciones hídricas limitantes generan una disminución en el NG más importante que en el PG. Aunque no se encontró bibliografía nacional que avale esta información, es muy consistente lo reportado en otros países.

2.5. IMPORTANCIA DEL MOMENTO DE AGREGADO DE N

2.5.1. Respuesta a seis hojas (V6)

Una serie de estudios orientados a mejorar la eficiencia de uso del N, demuestran la importante respuesta del cultivo al agregado de este nutriente en el estadio de seis hojas. Para el Uruguay están bien definidos niveles críticos para este estadio aunque no para todas las situaciones de chacra, pero son una buena herramienta al momento de fertilizar, esta se trata más adelante.

La fertilización nitrogenada en el estadio de seis hojas (V6) (Ritchie y Hanway, 1982) generalmente es más eficiente que la realizada a la siembra (Wells et al., Sainz Rozas et al., citados por Calviño y Echeverría, 2003). El mayor rendimiento cuando el N es aplicado en V6 sería consecuencia de las menores pérdidas por desnitrificación (Wells y Bitzer, Sainz Rozas y Echeverría, citados por Calviño y Echeverría, 2003), inmovilización (Jokela y Randall, citados por Calviño y Echeverría, 2003), y lavado (Thomas et al., citados por Calviño y Echeverría, 2003), debido a la reducción en el contenido de agua en el suelo (Jokela y Randall, citados por Calviño y Echeverría, 2003), asociada al consumo por el cultivo. Además es consecuencia de que en este el cultivo ya está absorbiendo N, y es el momento previo al estadio de rápida absorción, por tanto la oferta de N se hace cuando hay demanda. En la siembra en cambio, no hay demanda de N por la planta, lo que incrementa la posibilidad de pérdida³.

En un cultivo de maíz en condiciones de siembra directa con una aplicación a la siembra de 11 Kg de N.ha⁻¹ y con dosis de N de 171 y 202 Kg.ha⁻¹ agregado en V6 se obtuvieron rendimientos máximos de 10500 y 9000 Kg.ha⁻¹ respectivamente. La

³ Perdomo, C. 2009. Com. personal.

producción de los testigos sin N a V6 fue 6360 y 3500 Kg.ha⁻¹ lo que significa respuestas de 24 y 27 Kg de grano por Kg de N aplicado (Fox et al., citados por Torres, 1996).

Di Paolo y Rinaldi (2007) en Vasto Chieti, Italia, en un trabajo donde se midió la respuesta del maíz al riego y a la fertilización nitrogenada, encontraron que el incremento en grano fue de un 53% con N 300 Kg.ha⁻¹ versus N 0 y 8% con 300 Kg.ha⁻¹ versus 150 Kg.ha⁻¹. La eficiencia de uso del N promedio fue de 26 Kg de grano por Kg de N disponible; similar a lo encontrado por Ma et al., citados por Di Paolo y Rinaldi (2007).

Mamani-Pati et al. (2010) probando diferentes dosis de N 0, 56, 112 y 168 Kg.ha⁻¹ encontraron respuesta hasta el tratamiento con 112 Kg N.ha⁻¹. Aplicando más de 112 Kg de N por hectárea hay un mínimo impacto en los rendimientos.

Gregoret et al. (2011) en la Pampa, Argentina, encontraron eficiencias del uso de N del fertilizante (NUEf) que oscilaron entre 13 y 18 Kg de grano por Kg de N para el rango de dosis económicamente óptima y entre 19 y 22 para el rango de dosis agrónomicamente óptima, considerando diferentes zonas de manejo.

Pozzi y Halvorson (2011) en el Noreste de Colorado EE.UU, reportan que la producción de grano y rastrojo incrementó con el aumento de la dosis de N en los 9 años de experimento y estimaron que el máximo rendimiento en grano se dio a los 177 Kg N.ha⁻¹.

Los resultados dejan suficientemente en claro que existe una alta respuesta por parte del maíz al agregado de N cuando el cultivo se encuentra en V5-6, más aún cuando se cuenta con capacidad de mitigar el efecto negativo de la falta de agua, por medio de tecnologías como el riego. Lo que también es claro que esta respuesta depende de factores de chacra, manejo y climáticos por lo que no hay una dosis óptima de N para todas las situaciones sino que la misma varía según cada situación de cultivo.

2.5.2. Respuesta a aplicación tardía de N (V10-11)

Una deficiencia de N importante en el estado de diez hojas a floración provoca una disminución del número de hojas verdes por planta y, consecuentemente, la superficie foliar se reduce hasta un 30% (Plénet, citado por Maturano, 2002). La reducción de la superficie foliar, es fuertemente dependiente del estado de nutrición nitrogenada de la planta en el momento de su emisión (Girardin et al., citados por Maturano, 2002)

Estudios realizados en Argentina, orientados a mejorar la eficiencia de uso del N, disminuir los efectos de contaminación ambiental y por tanto mejorar la rentabilidad del cultivo, reportan respuestas a aplicaciones de fertilizantes nitrogenados en estadios avanzados del cultivo (Russelle, Melchiori et al., Melchiori et al., citados por Melchiori

et al., 2006b). En Uruguay con el mismo objetivo, se reportan trabajos de Perdomo, Rubio y Cazaban, citados por Perdomo (2011).

Se encontró poca información de trabajos que prueben el efecto de fraccionar la aplicación de N en V6 y V10, la mayoría de los estudios encontrados prueban el efecto de diferir la aplicación de la siembra a V6 o a V10. En tal sentido Melchiori et al. (2007) en un experimento probando diferentes fuentes y momentos, reportaron eficiencias de uso del N de 44,5, 28,3 y 24,1 Kg de maíz por Kg de N aplicado en aplicaciones de siembra, V6 y V10 respectivamente.

Melchiori et al. (2006b) en un experimento realizado en Entre Ríos, Argentina con diferentes dosis y momentos de aplicación de N, encontraron que en los tratamientos sin N a la siembra el rendimiento se incrementó por la refertilización tardía sin diferencias significativas entre momentos de aplicación; con la dosis de 70 Kg.ha⁻¹ a la siembra el rendimiento se incrementó solo cuando la refertilización se realizó en V8 y V10. Sin embargo en los tratamientos que recibieron las mayores dosis de N (140 y 210 Kg.ha⁻¹) a la siembra, no se incrementó el rendimiento por la refertilización en postemergencia. Estos resultados coinciden con los observados por Scharf et al. (2002) trabajando Missouri en USA, en cuanto a que aplicaciones tardías hasta V11 el rendimiento de maíz se mantuvo, en comparación con aplicaciones más tempranas en un total de 28 experimentos. Más aún, el rendimiento sólo se redujo un 3 % cuando las aplicaciones de N se retrasaron hasta V12-V16 y 15% cuando se retrasó hasta aparición de los estigmas. Se podría afirmar que si se llega demasiado tarde con la refertilización, se estaría incurriendo en pérdidas de rendimiento, por lo que el momento de fertilizar sería no más allá de V10-V11.

En Colombia se implementaron ensayos en algunas zonas productoras de maíz para evaluar el efecto del fraccionamiento de N usándose siempre la misma dosis (170 Kg.ha⁻¹). Se usaron 4 tratamientos que diferían en el fraccionamiento, dos con doble fraccionamiento (50% siembra-50% V6 y 20% siembra-80% V6) y dos con fraccionamiento triple (20% siembra-40% V6-40% V10-12 y 30% siembra-40% V6-30% V10-12). A pesar de que no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, en dos de las cuatro localidades el fraccionamiento 20-40-40 superó a los demás tratamientos. Es importante considerar este fraccionamiento porque en V6, dentro de la planta, el punto de crecimiento emerge de la superficie del suelo y en V10 se define en gran parte uno de los componentes de rendimiento NG por mazorca (adaptado de Coral y Molina, 2010).

La respuesta a la aplicación tardía podría estar condicionada por varios factores del ambiente y del manejo en cuanto a tecnologías de fertilización. Por ejemplo la aplicación tardía de fertilizantes sólidos, en condiciones de bajas probabilidades de ocurrencias de precipitaciones podría reducir la respuesta a la fertilización. También las condiciones favorables para el crecimiento reproductivo, podrían estar relacionadas con la respuesta a las aplicaciones tardías (Melchiori et al., 2006b). Ruselle et al. (1983)

encontraron resultados más favorables de la fertilización a V10-V11 en fechas de siembras tempranas que en las tardías.

Williams et al. (2009) afirman que los agricultores tendrían que modificar el momento de realizar la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz; cambiando la fertilización a la siembra o aplicada en etapas tempranas V3 a aplicaciones más adelante en el ciclo del cultivo (V9-12).

En Uruguay se han obtenido resultados variables según el año. Perdomo (2009) encontró que la aplicación de N en V10 tuvo una eficiencia similar a la del N aplicado en V6 en términos de incremento de rendimiento, en un año con rendimientos elevados debido a precipitaciones abundantes. En cambio en la zafra 2009-2010 los datos de Rubio y Cazaban⁴ mostraron que el N aplicado en V10 tuvo un efecto inferior al agregado en V6 a pesar de que no existieron limitantes hídricas que impidieran la obtención de altos rendimientos. Por lo tanto pueden existir factores no identificados que pueden afectar la respuesta al agregado de N en V10 (adaptado de Perdomo y Hoffman, 2011). Los resultados de ambos experimentos podrían diferir por la capacidad de aportar N del suelo en los diferentes ambientes.

2.5.3. Respuesta al agregado de N en función de las condiciones hídricas del ambiente

El maíz es un cultivo con elevado requerimiento de agua (alrededor de los 600mm en el ciclo) y tiene una alta sensibilidad al estrés hídrico, particularmente en el período crítico (15 días pre floración y 15-20 días post floración). Sequías durante el período vegetativo pueden afectar el rendimiento, al disminuir el IAF y la biomasa a floración, mientras que sequías durante la floración pueden reducir el rendimiento por una reducción en el NG. Sequías durante el llenado de grano reducen el rendimiento por una disminución en el peso de los mismos (Andrade et al. 2000b, Echeverría Sainz Rozas 2006). Otros autores reportan que la presencia de un déficit hídrico en etapas vegetativas del cultivo reduce el área foliar (Boyer, Acevedo et al., Ne Smith y Ritchie, citados por Maturano, 2002), la elongación de los entrenudos (Novoa y Loomis, citados por Maturano, 2002), y el peso de hojas y tallos (Musick y Dusek, Eck, citados por Maturano, 2002). La etapa reproductiva es la más sensible a la presencia de un estrés hídrico (Robins y Domingo, Claasen y Shaw, citados por Maturano, 2002). En este momento, la deficiencia hídrica se manifiesta mediante la reducción en el NG por unidad superficie, debido al efecto de una deficiencia de carbohidratos en la esterilidad del gametofito femenino (Maturano, 2002).

Pedrol et al. (2008) reportan que el riego incrementó significativamente el rendimiento final en grano, en un 28,5%. Los componentes asociados con la respuesta al

⁴ Rubio, N.; Cazaban, M. 2010. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (v₁₀₋₁₁) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano (sin publicar).

riego fueron el peso de mil granos y la producción por espiga, que superaron en un 41,7 % y 23,6% al valor obtenido en secano, respectivamente.

Puppo et al. (2002), en un ensayo realizado para evaluar el cultivo de maíz bajo riego, encontraron que en un año que fue excepcionalmente lluvioso (1997-98), los rendimientos obtenidos fueron bajos, debido fundamentalmente a la baja luminosidad, baja población y bajo nivel de fertilización con fosforo. Con esto se puede destacar el efecto del riego en años de pocas precipitaciones por una mayor radiación incidente, lo que podría ser potencializado en mayores rendimientos.

El maíz presenta características para tener una elevada repuesta a la aplicación de riego suplementario durante el periodo crítico, determinándose respuestas de alrededor de 20 Kg de grano por milímetro de agua consumida durante dicho período (Otegui, 1992), valores que pueden llegar hasta 40 Kg de grano por mm de agua consumido según el grado de estrés hídrico (Andrade y Sadras, citados por Echeverría y Sainz Rozas, 2006).

La falta de agua a su vez afecta tanto la demanda de nutrientes por el cultivo como la oferta de dichos nutrientes por parte del suelo. Estos componentes pueden ser afectados diferencialmente por una sequía según el momento de ocurrencia de la misma. Por ejemplo, la escasez de agua durante el barbecho y las primeras etapas del ciclo vegetativo, seguidas por buena disponibilidad hídrica durante la floración, reducen en mayor medida a la oferta, que a la demanda de N, por lo que la respuesta a la fertilización aumenta. Contrariamente, buena disponibilidad de agua en el barbecho y en el período vegetativo seguida por sequía en floración, reducen más la demanda que la oferta, por lo que la respuesta a la fertilización disminuye (Andrade et al., 2000a).

El efecto de la fertilización nitrogenada en diferentes cultivos agrícolas sobre la eficiencia en el uso del agua (EUA), la radiación (EUR) y el N (EUN) ha sido bien documentada (Cooper et al., Sinclair y Horie, Huggins y Pan, Paponov et al., citados por Caviglia et al., 2007). En general el incremento de la disponibilidad de N aumenta la EUA y la EUR, mientras que la EUN tiende a decrecer (Caviglia et al., 2007). Experiencias previas demostraron que la EUA estuvo explicada por las variaciones en la EUR por efecto de la nutrición nitrogenada (Caviglia y Sadras, 2001).

O'Neill et al. (2004) en un experimento en Shelton, USA reportan una mayor respuesta en rendimiento de maíz a aplicaciones de N en condiciones de riego y menores respuestas bajo condiciones de déficit hídrico. El promedio de rendimiento en condiciones de riego incrementó un 23% frente al promedio de rendimiento obtenido en secano y el rendimiento en situaciones con suficiente N supero en el orden de 100% al promedio de rendimiento de situaciones con niveles deficitarios de N en la región de las grandes planicies de USA.

Di Paolo y Rinaldi (2007) en un experimento en Chieti, Italia encontraron que el rendimiento en grano de maíz fue afectado positivamente por el riego y por el agregado de N y a su vez encontraron que la interacción "N- Riego" fue significativa.

De hecho la disponibilidad de N amplificó el efecto del riego y viceversa, el rendimiento de los tres tratamientos de N (N0, N150, N300) en secano estuvo en torno a los 4000 Kg.ha⁻¹, con 50 % de la necesidad de agua, el tratamiento sin N se ubica por debajo de los 8000 Kg.ha⁻¹ y N150 y N300 alcanzan niveles de 10 toneladas.ha⁻¹, cuando el riego cubre el 100% de las necesidades del cultivo, el tratamiento sin N no aumenta su rendimiento, en cambio los tratamientos de N150 y N300 se despegan y alcanzan rendimientos de 12000 y 14000 Kg.ha⁻¹ respectivamente. Los rendimientos en secano anduvieron en torno a los 3900 y 2600 Kg.ha⁻¹ para el 2000 y 2001 respectivamente.

2.5.4. Importancia de la fuente nitrogenada

Los fertilizantes nitrogenados más comúnmente utilizados a nivel mundial en la fertilización de maíz son; amoníaco anhidro, urea, nitrato de amonio y solución UAN (urea más nitrato de amonio) (Achaval y Ducamp, 1998). En Uruguay la fuente nitrogenada utilizada con mayor frecuencia es la urea (233939 tt.año⁻¹), aunque otras fuentes como el nitrato de amonio y UAN están tomando importancia según datos de importación de fertilizantes del MGAP (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011).

Borghini y Wornicov (1998), no encontraron diferencias significativas entre las dos fuentes de N evaluadas (urea y nitrato de amonio). Este resultado sin embargo estuvo influido por el hecho de que no hubo respuesta a N. Esto indicaría que la falta de respuesta a la aplicación de N en V6 no se relacionó con pérdidas importantes por volatilización de la urea. Tampoco reportan diferencias para el resto de los indicadores de suelo y planta evaluados, según la fuente de N. El experimento se desarrolló en condiciones de secano. Achaval y Ducamp (1998) en un experimento comparando urea con nitrato de amonio, tampoco encontraron efecto de la fuente nitrogenada en el rendimiento en grano ni en los componentes de rendimiento.

En un experimento en EEA INTA Balcarce conducido por Barbieri et al. (2003), no se encontraron diferencias significativas ni en rendimiento, ni en eficiencia biológica, ni en eficiencia agronómica cuando se probaron diferentes fuentes y formas de aplicación. En este estudio se evaluó la respuesta a la aplicación de urea en superficie y urea incorporada y CAN (nitrato de amonio calcáreo) siendo mayores las pérdidas de amoníaco en el tratamiento de urea en superficie. Cabe destacar que en ambos años del experimento (1998-1999/1999-2000) se registraron escasas precipitaciones posteriores a las aplicaciones de N. Las pérdidas por volatilización generadas fueron del 6% para urea en superficie, 1% para CAN y 0,1% para la urea incorporada, estos valores son muy bajos como para considerarlos de importancia agronómica.

Melchiori et al. (2007), evaluando el uso de distintas fuentes de N en maíz encontraron en primer lugar que el N aplicado produjo una respuesta media para todos los tratamientos de 2587 Kg.ha⁻¹. Las fuentes de N mostraron diferencias entre sí para el promedio de tres momentos de aplicación. El rendimiento de los tratamientos con CAN,

urea y UAN+T (UAN + tiosulfato de amonio, molécula que hace que el UAN sea menos susceptible a pérdidas de N por volatilización) no difirieron estadísticamente entre si y todos los tratamientos fueron superiores al testigo sin fertilizar.

Stecker et al. (1993), en el noreste de Missouri (USE) en un experimento de tres años de duración, en el que se evaluaron cuatro diferentes fuentes de N, encontraron que el rendimiento en grano fue afectado significativamente por la fuente de N en cada año. El rendimiento usando nitrato de amonio (7090 Kg.ha^{-1}) fue superior al de la urea (6260 Kg.ha^{-1}), solución UAN (5680 Kg.ha^{-1}) y UAN mas sulfato de amonio (5710 Kg.ha^{-1}) en condiciones de maíz continuo. Comparando estas tres fuentes el rendimiento obtenido con urea fue significativamente superior respecto al de solución UAN y al de solución UAN más sulfato de amonio. El experimento se desarrolló en tres localidades de Missouri en un periodo de tres años en maíz continuo y maíz con soja como cultivo antecesor. No hubo riego pero las condiciones hídricas fueron suficientes para expresar altos rendimientos. Los máximos rendimientos estuvieron en torno de las 10 toneladas y se lograron con nitrato de amonio o con las mayores dosis de N (202 Kg.ha^{-1}) y más que nada en los lugares que se hacia la rotación con soja.

Figueroa (2005) en un experimento en Corrientes, Argentina, reporta que independientemente de las fuentes de N el maíz mostró una respuesta cuadrática, con coeficientes muy similares entre las fuentes. El agregado de N tanto como urea o UAN, es positivo pero las dosis máximas asociadas al mejor rendimiento son mayores para la urea (80 Kg.ha^{-1}) que para el UAN (40 Kg.ha^{-1}). Esto indicaría que la respuesta por Kg de N aplicado como UAN, es superior, con esto se estimó que en general se debe a que la forma líquida de N aplicada en buenas condiciones de humedad, o inclusive con una lluvia posterior a su aplicación, las pérdidas por evaporación son mínimas, quedando disponible para la planta más rápidamente.

Existen muchos trabajos en investigación intentando buscar diferencias entre las fuentes de N, obteniéndose resultados muy diversos según las condiciones en donde se desarrolle el experimento. Las diferencias de resultados observados indican que las ventajas de unas fuentes respecto a otras dependen de condiciones ambientales y no pueden ser establecidas a priori.

2.6. INTERACCIÓN NITRÓGENO CON AZUFRE

La respuesta al azufre se presenta en lotes con bajo contenido de materia orgánica, reducida estabilidad estructural, prolongada historia agrícola, indicios de erosión en el suelo y escasa o nula historia de fertilización azufrada (Ferraris et al., 2004).

En la región se reportan algunos trabajos que señalan que la falta de azufre reduciría la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado (EUN) en el cultivo de maíz (Ceccoti, citado por Pagani et al., 2009).

En Santa Fé encontraron que la respuesta a N fue lineal en el rango de dosis de N explorado, desde 60 Kg.ha⁻¹ hasta 150 Kg.ha⁻¹. Se obtuvieron 16 Kg de grano de maíz por Kg de N aplicado sin Azufre y 30,6 Kg de maíz por Kg de N aplicado con 12 Kg de Azufre. La respuesta a S fue significativa con dosis de N superiores a 60 Kg.ha⁻¹ y mayor a dosis creciente de N demostrando una clara interacción N*S (Capurro et al., 2002).

Capurro et al. (2007) en el Sur de Santa Fé, determinaron que la fertilización con S incrementó los rendimientos, promediando a través de campañas y dosis de N en 673 Kg.ha⁻¹. La respuesta se explica por la prolongada historia agrícola de las chacras, los bajos niveles de S-SO₄ y las caídas de materia orgánica respecto a los niveles originales. Estos autores encontraron respuesta variable en los diferentes años analizados. En los años 2000/01 y 2001/02 observaron interacción N por S, por el contrario en el 2002/03 y 2003/04 no encontraron interacción para estos nutrientes. Las chacras que manifestaron interacción con S no tenían antecedentes de fertilización azufrada, en contraposición las chacras que no mostraron interacción con S, que si tenían historia previa de fertilización con este nutriente.

En un trabajo realizado en Malawi, Africa sobre suelos bajo severa deficiencias de azufre, se determinó interacción significativa entre N y azufre, pero con rendimientos máximos inferiores a 5000 Kg.ha⁻¹ (Weil y Mughogho, citados por Pagani et al., 2009).

En Corrientes, Argentina en un experimento de fertilización con N y S, se reporta que el análisis estadístico de los resultados de los tratamientos con las distintas fuentes y combinaciones (Urea y UAN; y estas con fuente de azufre), revela que no hubo interacción entre N y S (Figueroa, 2004).

García (1999) determinó que la respuesta a S en trigo es más probable que ocurra en sistemas de producción extractiva donde se retire gran parte de los residuos de los cultivos, o cuando se realice una mala preparación del suelo o exista alguna limitante para el desarrollo de las raíces en profundidad, (problemas texturales causados por erosión, excesivo laboreo, etc) y más aún, cuando a las condiciones previas se sume una alta fertilización con N que aumente significativamente la biomasa y los requerimientos de S del cultivo. En cambio en sistemas con siembra directa estabilizados su deficiencia parece menos probable lo que puede deberse al menos en parte, a una exploración más profunda de las raíces.

Reussi Calvo et al. (2008) en un experimento de comparación de métodos de determinación de N y azufre en planta citan que el nivel crítico basado en la relación N/S en trigo es de 16:1, este valor fue propuesto por Spencer y Freney, Blake Kalff et al., citados por Reussi Calvo et al. (2008)

2.7. INDICADORES DE STATUS NITROGENADO

La definición precisa de la dosis es una meta difícil de ser alcanzada, aunque a pesar de ello, cada día se torna más importante llegar a ella, por el hecho de que el N es requerido en grandes cantidades por el cultivo, dado su elevado costo y debido a las restricciones impuestas por la legislación (específicamente para USA y Europa) en cuanto a la contaminación del ambiente con N aplicado en exceso, (Hurtado et al., 2011). Por otro lado el empleo de subdosis de N restringe fuertemente la productividad de cualquier cultivo, especialmente la del maíz, sobre todo cuando el ambiente es de elevado potencial de rendimiento.

Por lo anterior han sido planteados por diversos autores, distintos indicadores que buscan optimizar el manejo de la fertilización nitrogenada. Algunos son de medida directa y otros basados en medidas indirectas relacionadas con el status nitrogenado del cultivo.

A siembra no se encontraron trabajos nacionales que permitan establecer niveles críticos claros de N a la siembra, si bien se sabe que el indicador usado a siembra es el N-NO₃ en suelo de 0-20 cm. Los niveles críticos no están muy claros, se mencionan niveles de 13-15 ppm de N-NO₃, pero lo que comúnmente hacen los productores es una aplicación de fertilizante binario (18-46-0) 130 Kg/ha para el cultivo de maíz (Perdomo y Hoffman, 2011). Algunos datos recomiendan un nivel crítico de 25-30 ppm N-NO₃ (0-20cm) si no se refertiliza en V6 (Giménez, 2011).

2.7.1. En el estadio de seis hojas

En Uruguay a V6, se recomienda la fertilización nitrogenada siguiendo la filosofía de nivel crítico” o de “suficiencia”, este método está respaldado por una profusa investigación que indica que la respuesta de un cultivo al agregado de un nutriente cesa o tiende a decrecer luego de que sobrepasa cierta concentración de este nutriente en el suelo (Olson et al., citados por Perdomo, 2006).

También se reportan diversos métodos para estimar el status nitrogenado a partir de N en planta, pero hay abundante bibliografía que pone en evidencia que no son buenos indicadores, ya que miden la concentración de N en un momento que la planta aún tiene bajos requerimientos de absorción de N, por lo que es poco probable que muestre síntomas de deficiencias³. En tal sentido Binford et al. (1992) determinaron que la concentración de N en la planta en estadio V5-V6, no es un buen indicador de la deficiencia de N, ya que la misma no se relacionó con el rendimiento del cultivo, ni con la concentración de nitratos en el suelo ni con la respuesta al N, por lo que este método de diagnóstico no puede ser usado en estadios tempranos de desarrollo. A demás esta metodología no es capaz de detectar sitios con excesos de N en el suelo.

Borghi y Wornicov (1998) reafirman que los indicadores evaluados a V6 (nitrato en planta, contenido de N en planta e índice de clorofila) no presentaron una relación clara con rendimiento relativo, impidiendo definir valores críticos. Sin embargo el N-NO₃ si se correlacionó con el rendimiento relativo, reafirmando la idea de que en V6 correspondería utilizar indicadores de suelo y no de planta.

Sainz Rozas y Echeverría (1998) en Balcarce intentaron establecer la relación entre valores de lectura de clorofila con el SPAD y la respuesta en rendimiento de maíz al agregado de N. Se concluyó que la lectura de clorofila no es una herramienta adecuada para diagnosticar la deficiencia de N en estadios tan tempranos como el de V6. En concordancia con lo anterior Blackmer y Shepers (1995) reportan baja correlación entre el rendimiento y las lecturas de clorofila en V6. Estos autores afirman que la utilización de la lectura de clorofila con SPAD 502 en V6 tiene un limitado potencial como herramienta de diagnóstico. Las causas podrían ser las variaciones de temperatura en este estadio ya que pequeños cambios en la temperatura media temprano en la estación de crecimiento pueden afectar la concentración de clorofila en la hoja, y por ende el valor de lectura del SPAD, independientemente de la disponibilidad de N (Sainz Rozas y Echeverría, 1998).

En tal sentido, existe un número importante de trabajos que muestran que la concentración de N-NO₃ en suelo de 0 a 20 cm en V5-V6 es un buen estimador de la respuesta al agregado de N al cultivo de maíz. Este indicador fue propuesto por Magdoff et al. (1984) y desarrollada en distintas regiones de USA. Validado por Blackmer et al., Fox et al., Meisinger et al., Klausner et al., citados por Sainz Rozas et al. (2000). En Argentina fueron validadas por: Melchiori et al., García et al., Ferrari et al., citados por Sainz Rozas et al. (2000).

Para Uruguay Perdomo et al. (1998) durante un período de tres años instalaron ensayos en cultivos comerciales para evaluar el test de nitrato en suelo en V6. Determinaron que existe relación entre la concentración de nitrato en el suelo (0-20cm) en el estadio de seis hojas y respuesta al agregado de N, determinando así un nivel crítico de 18 ppm de N y un porcentaje de aciertos en cuanto a separar sitios con alta y baja probabilidad de respuesta al N del 73%.

Borghi y Wornicov (1998) reportan en 10 ensayos realizados en el litoral oeste del país en predios comerciales, que el contenido de nitratos en los primeros 20 cm de suelo fue el indicador que mejor se relacionó con la variación en la respuesta al agregado de N. Por encima de un valor de 20 ppm de N-NO₃ en suelo la respuesta a la aplicación de N fue nula. El modelo “cuadrático más Plateau” fue el que mejor ajustó en este trabajo, y con este modelo se obtuvo un nivel crítico por encima del cual el maíz no responde al agregado de N de 17 ppm de N-NO₃. El ensayo se realizó en condiciones de secano, presentándose en 2 de los 10 sitios situaciones de déficit hídricos importantes.

A su vez analizaron la relación entre el contenido de NO₃ en los primeros 20 cm de suelo, respecto al contenido de nitratos en los primeros 40 cm de perfil,

obteniendo una buena correlación un ($r^2=0,93$), indicando que el N-NO₃ en los primeros 20 cm es un buen indicador del contenido de nitratos de los primeros 40 cm del perfil.

Sainz Rozas et al. (2000) en Balcarce Argentina, bajo siembra directa y con diferentes antecesores, determinaron un rango crítico entre 24 a 27 ppm a partir de dos experimentos, uno con maíz en condiciones de secano y otro en un maíz regado. Estos resultados tal como cita Salvagiotti et al. (2002), Perdomo et al. (2006) son superiores a las 20 ppm encontrado por Ferrari et al., en 25 ensayos en el norte de Buenos Aires, a las 21 ppm encontrado por Melchiori et al., en Entre Ríos aunque de 0-20 cm de profundidad y a los reportados por García et al., de 15 ppm en el Sudeste de Buenos Aires, citados por Echeverría y Sainz Rozas (2006a).

2.7.2. Aplicación tardía V10-11

En este estadio los mejores indicadores de status nitrogenado son en base al análisis de planta o su medición indirecta. Hay una serie de trabajos que muestran buenos resultados de los indicadores indirectos como estimadores del status nitrogenado del cultivo de maíz en torno a V10- V11. Los indicadores basados en la concentración de N-NO₃ no son precisos debido a que la planta se encuentra en el momento de máximo crecimiento y máxima absorción de N.

Entre los métodos directos está el análisis de N total en planta, mediante el análisis químico conocido como método de Kjeldahl.

Como indicadores indirectos se encuentran el índice de clorofila SPAD (Yadava, Marquard y Tipton, Dwyer et al., citados por Argenta et al. 2001a, Echeverría y Sainz Rozas 2006), índice de verde mediante cartilla de colores LCC (Perdomo 2008, Varinderpal et al. 2011). Además existen otras herramientas más sofisticadas y complejas en otros países para la determinación de la mejor dosis de N a utilizar en maíz (Perdomo y Hoffman, 2011).

El desarrollo del medidor portátil de clorofila SPAD 502 de Minolta, equipamiento que permite mediciones instantáneas del valor correspondiente al tenor de clorofila en la hoja, constituye una alternativa promisoriosa para estimar el nivel de N en las plantas (Argenta et al., 2001a), ya que evalúa indirectamente en forma no destructiva el estado nitrogenado del cultivo a través de una rápida lectura in situ de clorofila en la última hoja completamente desarrollada (Echeverría y Sainz Rozas 2006).

Algunos investigadores evidenciaron relación entre la lectura del clorofilometro (SPAD 502) y el tenor de clorofila en la hoja (Yadava, Marquard y Tipton, Dwyer et al., Argenta et al., citados por Argenta et al., 2003) y entre tenor de clorofila en la hoja y el tenor de N la planta (Smeal y Zhang, Argenta et al., citados por Argenta et al., 2003). En otro trabajo en que se evaluaron características de planta (tenor y acumulación de N, lectura correspondiente al tenor de clorofila en hoja en base al lector de clorofila, producción de materia seca y área foliar) como indicadores de nivel de N en planta de

maíz, fue constatado que la lectura del clorofilometro fue el mejor indicador del nivel de N en planta dentro de las características evaluadas (Argenta et al., 2001a).

Argenta et al. (2001b) determinó que para el diagnóstico del nivel de N en planta de maíz las lecturas de clorofila por encima de 45,4, 52,1, 55,3 y 58,0 respectivamente para los estadios de 3 a 4 hojas, seis a siete hojas, 10-11 hojas y espigazon representan niveles adecuados de N. Novoa y Villagran (2000) afirman que lecturas de SPAD inferiores a 56, equivalentes a 2,3 % de N en planta poco después de floración (determinado en las condiciones de su experimento), serían críticos.

Resultados de tres ensayos realizados en Uruguay en la zafra 2005-06, 2006-07 muestran que tanto la concentración de N como la lectura de clorofila en hoja con SPAD 502 Minolta se relacionaron con el estatus nitrogenado post V6 de la planta⁵. Novoa y Villagrán (2000) muestran datos que en términos generales poseen una relación clara entre los valores obtenidos por el clorofilometro y los valores de N en planta el $R^2 = 0,81$.

En estadios posteriores a V6 (15 días prefloración, R1 y R3) las lecturas de clorofila en hoja permiten detectar con gran precisión situaciones de deficiencia de N. Ya que el cultivo cuando transcurren estos estadios se encuentra en un rango de temperatura óptimo para la síntesis de clorofila y su concentración va a depender más de la disponibilidad de N. La precisión se determinó relacionando un índice de suficiencia de N con el rendimiento relativo, encontrándose un $R^2 = 0,46$ en V6, $R^2 = 0,86$ 15 días prefloración (V10-11), $R^2 = 0,87$ en R1 y $R^2 = 0,90$ en R3. Estos resultados indicarían que el uso del clorofilometro en estadios tempranos del crecimiento no sería útil para predecir los requerimientos de N, aunque esta hipótesis necesita ser investigada con más profundidad (Sainz Rozas y Echeverría, 1998).

En Mississippi, Williams et al. (2009) reportaron la respuesta de maíz al agregado de N con lecturas de clorofila (V9-V12) y rendimiento en grano. Las medidas de clorofilas (SPAD 502) y el rendimiento respondieron al incremento de la dosis de N de forma similar, la máxima lectura de clorofila y el máximo rendimiento ocurren aproximadamente en la misma dosis.

En la actualidad existe otro índice alternativo (LCC) Leaf Colour Chart, desarrollado en la Universidad de California en base a una tecnología que permite reproducir en forma precisa el color de las hojas con distinto grado de deficiencia de N. Según la información internacional disponible se relacionan tanto con la concentración de N como con el índice de clorofila de las hojas. Tiene como principal ventaja su practicidad y bajo costo, pero en Uruguay aún no hay información suficiente¹.

Hay una vasta información de aplicación de esta tabla de colores en arroz, (Woon-Ho Yang et al. 2002, Singh et al. 2002, Shukla et al. 2003, Witt et al. 2005) pero

⁵ Perdomo, C. 2009. Novedades en fertilización nitrogenada de maíz (sin publicar).

se encontró poca información de su aplicación para maíz. Para Uruguay Perdomo y Hoffman (2011) citan valores de 4 como críticos para LCC en V 11.

Para el caso de los índices de verde Isla y López-Lozano (2005) en un trabajo en Aragón, España probando diferentes índices de reflectancia en el verde (PSR, NPCI, MCARI, TCARI y PRI), demuestran que estos pueden resultar de gran utilidad para discriminar carencias de N en el cultivo de maíz a nivel de cubierta vegetal de cambios drásticos en el contenido de clorofila foliar (Tratamiento N=0 del resto). Sin embargo resulta difícil establecer una relación adecuada entre esos índices de vegetación y el contenido de N en planta cuando la dosis de N se encuentra cercana al óptimo.

Perdomo (2011) cita otras alternativas más sofisticada desarrolladas en EEUU, tales como el software llamado “Adapt N” desarrollado en la Universidad de Cornell. Es un programa que monitorea continuamente los flujos de N del suelo y del cultivo. Otra herramienta es el uso de sensores ópticos “activos”, instalados en los equipos de aplicación que permiten monitorear el estado de crecimiento del cultivo y las necesidades de N, y realizar a tiempo real aplicaciones variables de N dentro de cada sitio. Sin embargo estas nuevas tecnologías están aún en evaluación.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. LOCALIZACIÓN DEL ENSAYO Y MANEJO DEL CULTIVO

El experimento fue instalado en un Establecimiento comercial (“La Perdiz” del señor Casarino), en la ruta nacional 105 en el km 32 en la localidad de Dolores departamento de Soriano. El suelo fue un Brunosole Subeutrico Típico pertenecientes a la unidad “Cañada nieto” (11,7, según la carta 1:1000000 URUGUAY. MAP. DSF, 1976).

En cuanto al manejo general del cultivo, en el periodo de barbecho el 23 de agosto se realizó un control de “malezas de barbecho” con glifosato 48% (5 L), sulfamónio (1 L) y CLE (0.1 L), posteriormente el 10 de setiembre fertilizó con 140 Kg.ha⁻¹ de 18-46-46-0. La siembra se llevó a cabo el 6 de octubre con el híbrido NK900 con una densidad objetivo de 90000 plantas/ha, con distancia entre hileras de 0,53 m. Dos días después de la siembra se realizó un tratamiento pre-emergente con glifosato 48% (5 L), sulfamónio (1 L), Sauprim 90 (1 L), DualGold (1,5 L). El 18 de noviembre se realizó un tratamiento post-emergente con Basta (2 L) y Growspray (1 L).

3.2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El ensayo fue instalado en un cultivo de maíz de primera comercial que provenía de rastrojo de maíz del verano anterior, el cual constaba con un sistema de riego suplementario por medio de un pívot central; se instaló un experimento dentro del área de riego “Con Riego” y otro fuera del alcance del pívot “Sin Riego”.

Hasta V6 los ensayos fueron manejado de igual manera que el cultivo comercial, el 4 de diciembre se instalaron los 2 ensayos con diseño en bloques completos al azar con once tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos variaban en la dosis, el momento de aplicación y la fuente de nitrógeno y/o azufre. Los tratamientos se muestran en el Cuadro 1.

Por tanto, se estudió el efecto de diferentes dosis de nitrógeno aplicado como Urea, el efecto de diferentes fuentes de nitrógeno: Urea, Urea + azufre, UAN y Solmix. También el efecto de agregar todo el N a V6, fraccionar 50% V6 y 50% V10 o diferir todo a V10.

Cuadro 1. Esquema de los tratamientos evaluados

Tratamiento	Momento		N Total	Azufre V6	Fuente
	N-V6	N-V10			
1	0	0	0	0	Urea
2	50	0	50	0	Urea
3	100	0	100	0	Urea
4	50	50	100	0	Urea
5	0	100	100	0	Urea
6	150	0	150	0	Urea
7	200	0	200	0	Urea
8	200	0	200	20	Urea-SA
9	50	0	50	0	UAN
10	50	0	50	9	Solmix
11	50	0	50	9	Urea SA

En cuanto a las parcelas tenían un tamaño de 7 m de largo por 6 surcos de ancho (3,18 m), siendo 11 parcelas por bloque y 33 parcelas por experimento que ocuparon un área de 735 m².

3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS

3.3.1. Campo

Al momento de instalar el ensayo en V6 (4/12-10) se realizaron una serie de mediciones, una por bloque ya que el cultivo había sido manejado en forma homogénea hasta el momento. Se tomaron muestras de suelo, muestras de planta, se realizaron mediciones indirectas mediante tabla de colores Leaf Colour Chart (LCC) y estimador de clorofila en hoja SPAD Minolta 502. A demás se aplicaron las fertilizaciones según correspondía a cada tratamiento en V6.

En V10 (22-12-10) se realizaron las refertilizaciones correspondientes a los tratamientos (T4 y T5) y se realizaron las mediciones de todos los tratamientos por las técnicas indirectas de predicción del status nitrogenado de planta, mediante tabla de colores LCC y estimador de clorofila en hoja SPAD Minolta 502 y se tomaron muestras de la décima hojas para cálculo de N%.

En la cosecha se tomaron en cada parcela tres filas con una longitud de 5 metros, lo que suma 15 m lineales, para contabilizar el número de plantas por parcela y el número de espigas por planta. Se recolectaron todas las espigas para determinar rendimiento, lo que fue necesario para luego en laboratorio calcular el rendimiento usando la distancia entre filas.

Se determinó el rendimiento en grano por hectárea (corregido por humedad, así como los componentes del rendimiento).

3.3.2. En laboratorio

Las muestras de suelo se secaron, se molieron y se determinó la concentración de N-NO₃.

El análisis de nitrógeno en planta se llevó a cabo por el método de Johan Kjeldhal en el laboratorio de Isótopos estables de la Facultad de Agronomía.

Se determinaron los componentes del rendimiento; peso de grano, número de granos, plantas por m², número de granos por planta, espigas por planta, número de granos por espiga y rendimiento por espiga.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.4.1. Modelo estadístico

Para el análisis estadístico se utiliza el modelo de diseño en bloques completos al azar (DBCA) en dos sitios.

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

i: 1, 2, 3, ..., 11

j: 1, 2, 3

μ : Media general

τ_i : Efecto del i-esimo tratamiento

β_j : Efecto del j-esimo bloque

ε_{ij} : Error experimental de la unidad experimental i,j.

Y_{ij} : Observación en la unidad experimental i,j.

Supuestos:

ε_{ij} : N (0; σ^2) Aditivo, independiente e idénticamente definido.

Las comparaciones se realizaron mediante contrastes ortogonales, abajo se detallan los contrastes planteados, los contrastes 1 a 5 son ortogonales, siendo no ortogonal el 6.

CONTRASTE	DETERMINACIÓN
C1	Cero vs resto N agregado a V6
C2	100 V6 vs 100 V10
C3	Urea vs UAN
C4	Solmix vs Urea SA
C5	Urea y UAN vs Solmix y Urea + SA
C6	Respuesta al S a altos niveles de N

Se realizaron ajustes de modelos de regresión lineales y cuadráticos

Para analizar la evolución de las lecturas de los indicadores indirectos se realizaron otra serie de contrastes.

CONTRASTE	DETERMINACIÓN
C7	Lectura de N=0 versus lectura resto (N 50, 100, 150 y 200)
C8	Contraste lineal
C9	Contraste cuadrático

Los resultados fueron analizados mediante el Software Estadístico InfoStat, versión 2008.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. CARACTERIZACION CLIMATICA

La zafra agrícola 2010-11 se caracterizó por poseer un régimen de precipitaciones que fue inferior al promedio histórico, siendo de 318 mm inferior a la media histórica 1961- 1990 de la Zona de Mercedes (436mm vs. 754mm) (Figura 1).

Las temperaturas en el período setiembre-marzo en la misma zona no se alejan del promedio histórico. Por lo que la temperatura no fue una limitante relevante para el cultivo.

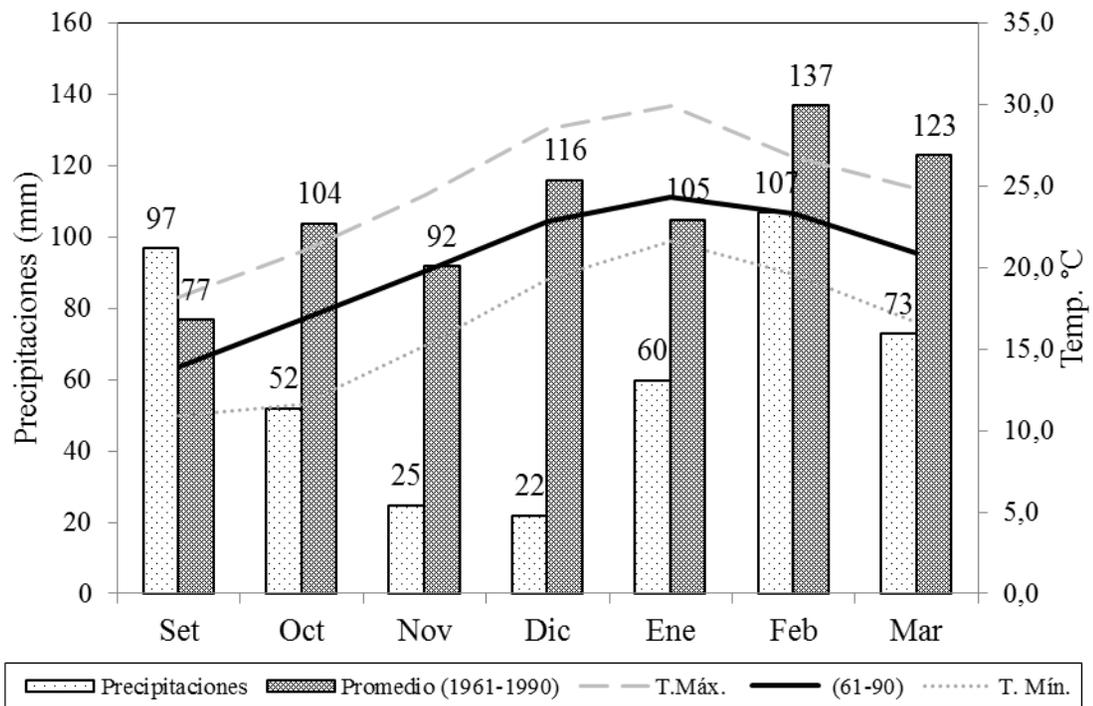


Figura 1: Precipitaciones mensuales del período Exp. en relación al promedio histórico y las temperaturas; máximas, mínimas y el promedio histórico (Estación meteorológica de Mercedes)

Las precipitaciones durante el mes de octubre si bien fueron inferiores al promedio se distribuyeron en forma más bien homogénea en el mes, lo que facilitó la implantación del cultivo. En noviembre y diciembre las lluvias fueron muy escasas, esto se observa claramente en las Figuras 1 y 2, donde ocurrió un único evento de precipitaciones al principio del mes en noviembre y a mediados del mes de diciembre.

En el mes de enero donde se inició el período crítico del cultivo, las lluvias fueron inferiores en 35 mm a la media histórica, tal vez esta falta de precipitaciones no

ocasionó grandes problemas porque en la primera década de febrero llovieron 72 mm. El déficit soportado por el cultivo que en ese momento se encontraba en floración fue de 75 mm (Figura 3 y Cuadro 2).

En el ciclo del cultivo fueron escasas las lluvias que realmente importaron, se destacan las ocurridas en torno al período crítico (PC. 15 días pre floración y 15- 20 días pos floración (Andrade et al., 2000b, Figura 2)

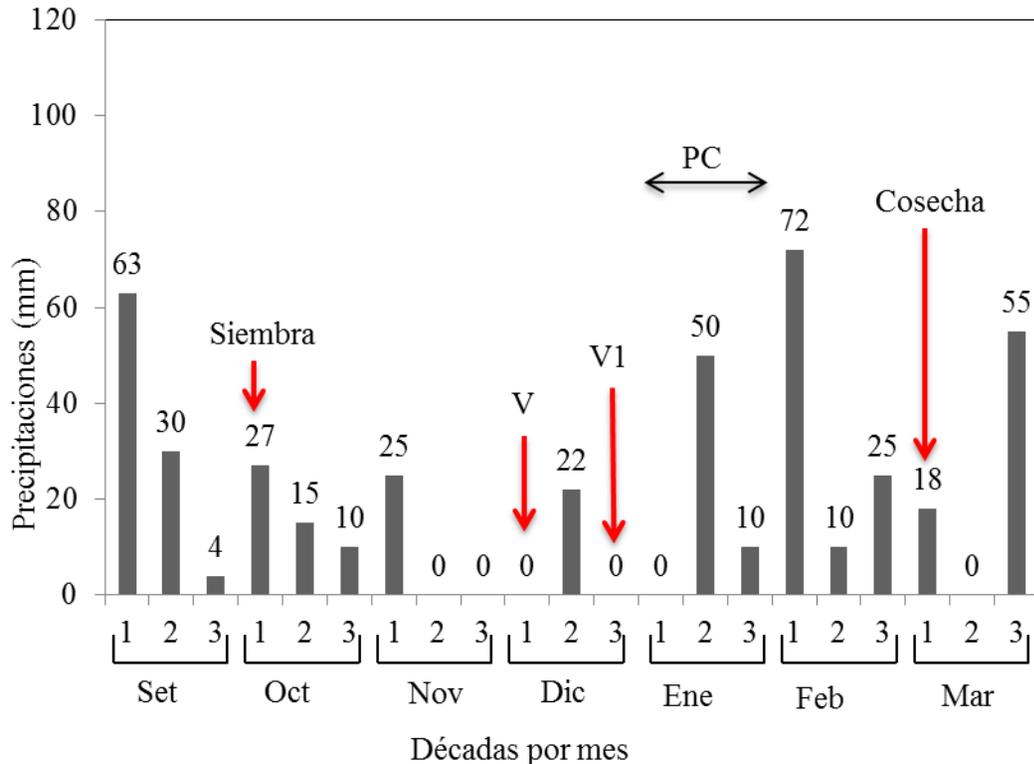


Figura 2: Precipitaciones por década mensual posterior al 1 de setiembre de 2010 y ubicación de los momentos más relevantes del ciclo del cultivo (siembra, V6, V10 Cosecha y el período crítico (PC)).

4.2. CARACTERIZACIÓN DEL RIEGO

Según la información cedida por el técnico a cargo del cultivo, se realizaron 18 eventos de riego, que llevaron a una lámina acumulada de 290 mm.

El riego se suspendió a los 126 días pos siembra luego de una lluvia de 50 mm, cuando el cultivo se encontraba en el estadio fenológico R3.

En la Figura 3 se presenta la evolución de las precipitaciones y del riego pos siembra.

El aporte de las precipitaciones fue muy irregular en relación a la demanda del cultivo, lo cual fue compensado con el aporte de riego suplementario (Figura 3).

En la Figura 3 se muestra la curva de la evapotranspiración acumulada del cultivo y por debajo la curva de agua acumulada precipitaciones más riego, en donde se ve que ni con el agregado de riego se alcanzó el agua requerida por el cultivo, siendo esta una limitante para lograr rendimientos potenciales para esta especie (Cuadro 2).

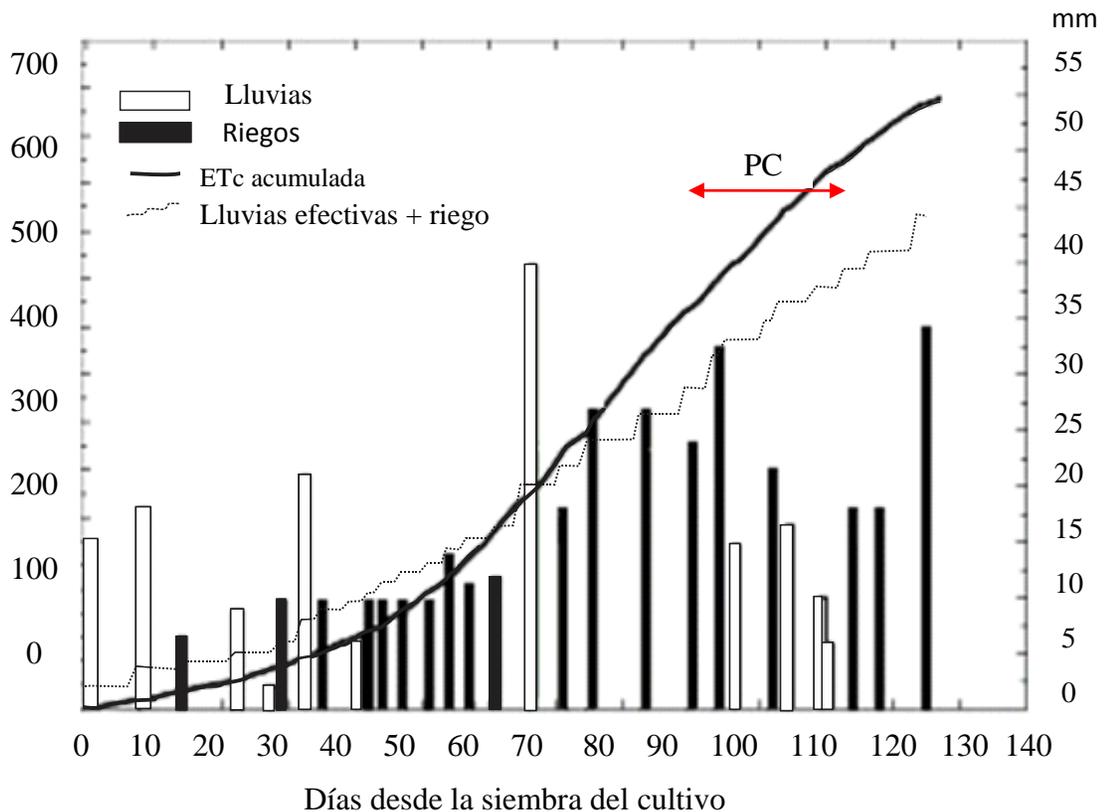


Figura 3: Información de lluvia y ETc acumulada utilizada por la empresa para decidir el manejo del riego. La línea fina muestra la suma de riego y lluvia acumulada a lo largo del ciclo del cultivo.

En el Cuadro 2 se ve que con el riego faltarían al menos 100 mm para que el cultivo pueda expresar su potencial de rendimiento, en relación a los requerimientos hídricos de 600-700 mm de agua disponible (Andrade et al. 2000b, Echeverría y Sainz Rozas 2006)

La eficiencia de uso del agua fue de 14,5 Kg de grano por milímetro de lámina de agua de riego, la cual es inferior a las encontradas por Otegui, citado por Echeverría y Sainz Rozas (2006), en Argentina.

Cuadro 2. Manejo del agua de riego

	RIEGO	SECANO
	----- mm de lámina acumulada-----	
Precipitaciones	192	192
Riego	290	----
Total	482	192
Rend. Promedio	8689	4475
Rend. Máximo	11238	6338

4.3. RENDIMIENTO Y COMPONENTES SEGÚN CONDICION HIDRICA

El maíz es un cultivo con alta sensibilidad al déficit hídrico durante el ciclo, sobre todo en el PC, en donde deficiencias severas pueden ocasionar importantes pérdidas de rendimiento (Andrade et al. 2000b, Echeverría y Sainz Rozas 2006). En la Figura 4 se observa que en promedio bajo riego el rendimiento fue superior al secano en 4274 Kg.ha⁻¹, (un 51% superior). Ocurre algo similar si se analizan los extremos, las diferencias oscilan entre 3178 Kg.ha⁻¹ y 4595 Kg.ha⁻¹ para mínimos y máximos respectivamente. Estos resultados de incremento de rendimiento por efecto del riego son superiores a los que obtuvieron Pedrol et al. (2008) donde el aumento de rendimiento fue de 28,5 % y a los que obtuvieron O'Neill et al. (2004) donde el rendimiento en condiciones de riego incrementó un 23% frente al promedio de rendimiento obtenido en secano. La mayor superioridad del riego frente al secano en el ensayo comparado con los demás se puede deber a que el año del experimento fue particularmente seco y se utilizaron 290 mm de agua en el riego, en cambio el experimento de Pedrol et al. (2008) ocurrió en un año más lluvioso y utilizaron 166 mm de agua de riego. Estas condiciones hacen que los rendimientos en secano sean más elevados (8442 Kg.ha⁻¹).

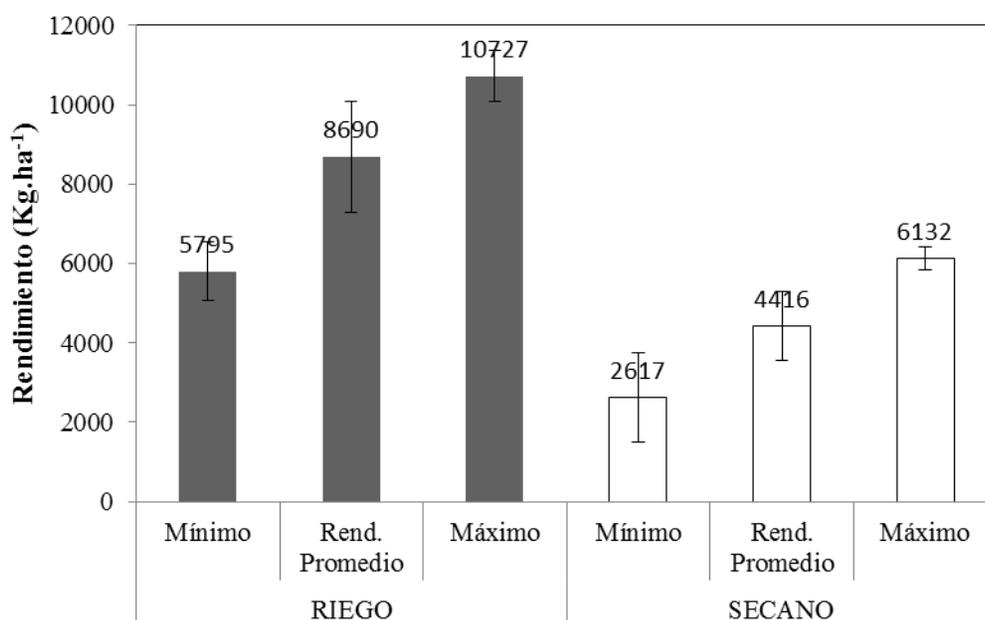


Figura 4. Efecto de la condición hídrica en el rendimiento, comparación de rendimiento promedios mínimos y máximos en riego y en seco. Líneas en las barras indican desvíos estándar.

El máximo rendimiento obtenido fue de 11238 Kg de grano, este rendimiento está por debajo de los potenciales reportados por Giménez (2010) en condiciones experimentales que oscilan en los 15000 Kg.ha⁻¹. Esta diferencia se podría explicar por la falta de agua a pesar de la utilización de riego o por la densidad de siembra utilizada. En este cultivo se sembraron 90000 semillas.ha⁻¹ lo que sería una densidad elevada para condiciones de seco y baja en condiciones de riego si se buscan altos rendimientos. La densidad óptima biológica en Uruguay para lograr los rendimientos reportados por la investigación son 120000 y 70000 pl.ha⁻¹ para riego y seco respectivamente según Giménez (2010).

Cuadro 3. Efecto de la condición hídrica sobre los componentes de rendimiento según rendimiento promedio, máximo y mínimo.

	RIEGO				SECANO			
	Mínimo	Promedio	Máximo	%	Mínimo	Promedio	Máximo	%
Rendimiento (Kg.ha⁻¹)	5795	8690	10727	100	2617	4416	6132	51
PG (mg)	208	241	266	100	223	221	223	92
Granos.m⁻²	2537	3581	4222	100	1129	2016	2849	56
Pl.m⁻²	8	8	8	100	7	8	8	96
No. granos. Pl⁻¹	298	456	515	100	164	270	358	59
Espigas.pl⁻¹	0,8	1,0	1,0	100	0,8	0,9	1,0	90
No. granos. Espiga⁻¹	373	456	515	100	205	300	358	65,7
Rendimiento. Espiga⁻¹	78	110	137	100	46	66	80	60,3

Del Cuadro 3 surge que, en condiciones de secano el promedio fue de 4416 Kg.ha⁻¹, con un mínimo que fue 59% inferior al promedio y un máximo 39% superior. Si bien no es posible comparar los dos experimentos, se observa que el rendimiento promedio en la situación con riego fue prácticamente el doble del secano, con un rendimiento de 8690 Kg.ha⁻¹ lo que demuestra que hubo un salto importante en rendimiento con el agregado de agua. En riego se obtuvo un mínimo 33% inferior al promedio y un máximo un 24% respecto al promedio.

El mayor rendimiento obtenido en riego se puede explicar por el agregado de agua, lo que hizo aumentar el número de granos (NG) por metro cuadrado, presentando un R² de este componente con el rendimiento de 0,95. En cambio en secano se logró menor NG y menor peso de grano (PG). Era de esperar que al aumentar el NG se genere un descenso en el PG debido a que hay más granos para llenar, pero esto no ocurrió en este caso, ya que se alcanzó un mayor NG, con un incremento de 20 mg en el PG. El descenso del NG en los tratamientos de secano fue importante, logrando únicamente el 56 % de lo obtenido en riego. Este descenso en NG no fue compensado por granos más pesados en secano.

Las diferencias entre NG obtenido en condiciones de riego frente a los de secano, se deben en gran medida al NG por espiga (en promedio 456 y 300 en riego y secano respectivamente), ya que la cantidad de plantas por metro cuadrado no difirió como tampoco tuvieron una diferencia importante las espigas por planta.

De lo expuesto se puede decir que los altos rendimientos obtenidos en riego respecto al secano, fue consecuencia principal del agregado de agua pero sin perder de vista el efecto del agregado de N que se desarrolla en capítulo siguiente.

4.3.1. Relación entre el rendimiento y sus componentes

En el siguiente conjunto de gráficos se analizará cómo fue afectado el rendimiento según la variación de sus componentes en los diferentes tratamientos del experimento.

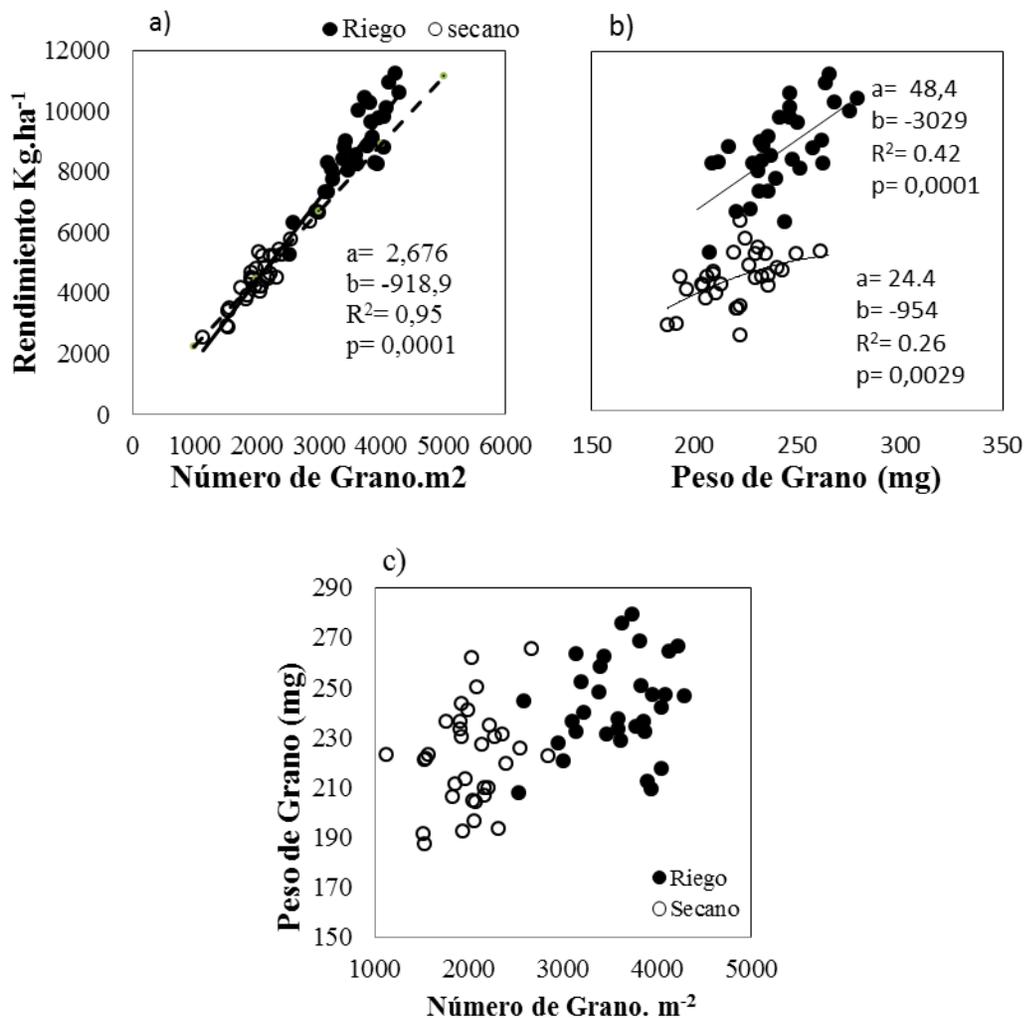


Figura 5: a) Relación entre rendimiento y NG; b) Relación entre rendimiento y PG; c) Relación entre el NG y el PG. Para condiciones de riego y de secano.

En la Figura 5a se puede apreciar que el aumento del rendimiento “fue de la mano” con el incremento del NG. En este sentido los tratamientos bajo riego arrojaron mayor rendimiento resultado de haber generado un mayor NG por unidad de superficie. La recta punteada representada en la gráfica indica como sería el aumento del rendimiento con el incremento del NG a PG constante. En principio los puntos están sobre la recta, lo que indica que el aumento de rendimiento fue especialmente causado por el mayor NG por metro cuadrado, en cambio en niveles de rendimientos elevados los puntos se comienzan a alejar de la recta, lo que indica que comienza a tomar importancia el PG. Esto se puede explicar considerando la forma en que se genera el rendimiento del cultivo de maíz. El rendimiento se logra en principio con NG en una mazorca, si la tasa

de crecimiento es suficientemente alta genera otra mazorca, si la tasa de crecimiento es intermedia se logran una mazorca con granos más pesados, siendo el peso el que hace que se logren rendimientos más elevados (Andrade et al., 2000b). Queda claro con esto que no hay una relación de competencia entre los componentes del rendimiento ya que se logran altos rendimientos con un elevado NG sin perder PG.

En la Figura 5b se ve claramente que cuando se expuso el cultivo a una situación con buena disponibilidad hídrica se obtuvo mejor rendimiento y el PG fue mayor que cuando el cultivo se encontró en condiciones de secano. A su vez en cada situación hídrica se dio una baja correlación entre el PG y el rendimiento, siendo esta de 0,42 y 0,26 en riego y secano respectivamente.

En la Figura 5c no se encontró relación alguna entre estos componentes, podría ser esperable encontrar que cuando existe menor NG, el cultivo compense con mayor peso en cada uno de los granos, pero no se dio esta situación ya que como se vio anteriormente el componente más importante de rendimiento fue el NG.

4.4. RESPUESTA AL AGREGADO DE N

La respuesta a la fertilización nitrogenada en V6, impactó de forma importante en el rendimiento en grano sobre todo bajo el agregado de riego.

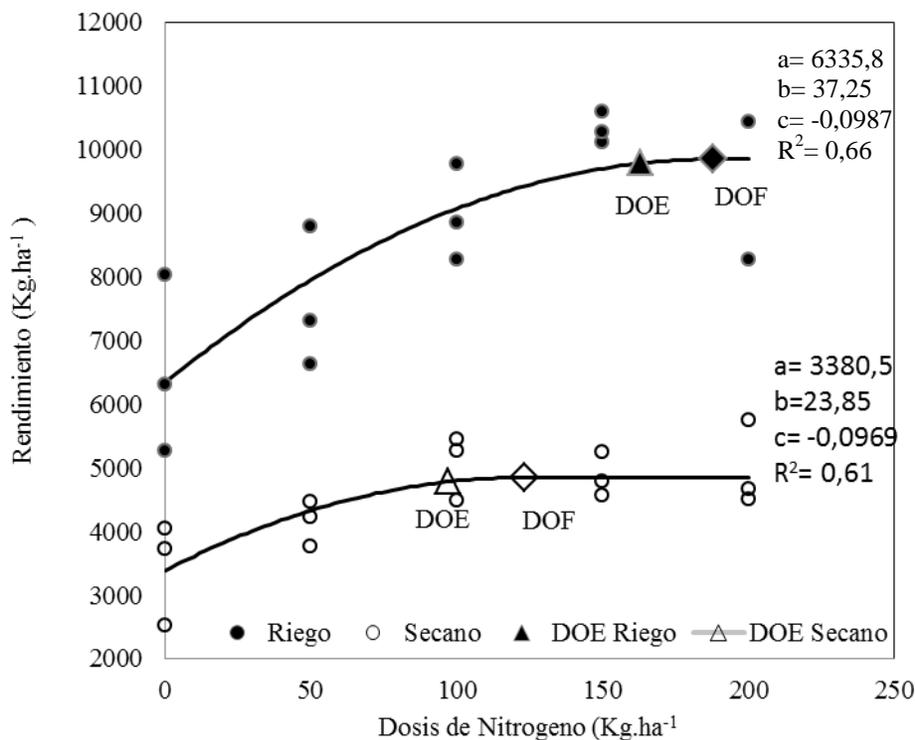


Figura 6. Respuesta al agregado total de nitrógeno como urea a V6 en condiciones de Riego y Secano y sus respectivas Dosis Óptimas Físicas (DOF) y Dosis Óptimas Económicas (DOE).

Esta respuesta estuvo determinada en gran medida por el estatus hídrico, ya que solo por el agregado de agua el rendimiento promedio se incrementó en 4214 Kg.ha^{-1} . Además se aprecia claramente una interacción positiva de riego por nitrógeno, la eficiencia de uso del N promedio en riego fue de $20 \text{ Kg de grano. Kg de N}^{-1}$ y en secano este valor fue de $10,7 \text{ Kg de grano. Kg de N}^{-1}$.

Era de esperarse alta respuesta al agregado de N ya que el nivel de N-NO_3 en suelo fue muy bajo a seis hojas (4 y 6 ppm en riego y secano respectivamente). Este valor está muy por debajo de los niveles críticos de suficiencia reportados por la bibliografía, siendo estos de 20-25 ppm de N-NO_3 en riego y 18-20 ppm en secano (Perdomo 1998, Borghi y Wornicov 1998, Sainz Rozas et al. 2000, Salvaggiotti et al. 2002, Perdomo et al. 2006).

Para el caso del riego si se toma el nivel crítico de 25 ppm, el sitio experimental se encontró 21 ppm por debajo de este valor. En base a que la mejor dosis fue la de 150 Kg.ha^{-1} , se estimó un equivalente fertilizante de 7,1 Kg de N. En el caso de secano por ser un ambiente de bajo potencial se tomó un nivel crítico de 20, el análisis de suelo estuvo 15 ppm por debajo de este, con la mejor dosis que es 100 unidades (U) de N se obtuvo un equivalente fertilizante de 6,7. Este último fue levemente inferior porque se tomó un nivel crítico de referencia más alto que el potencial del cultivo (20 ppm).

Efectivamente existió alta respuesta al N evidenciada por la significación del C1 (Cuadro 4). Las dosis óptimas físicas (DOF) estimadas de las ecuaciones de respuesta fueron de 188 y 123 U de N en riego y secano respectivamente. La dosis optima económica (DOE) para secano y riego fueron de 97 y 163 Kg de N.ha^{-1} respectivamente, calculado en base a un valor del maíz de 265 dólares la tonelada y un costo del N de 560 dólares la tonelada de urea. Resultados similares encontraron Pedrol et al. (2008) en INTA Oliveros, que por encima de $180 \text{ Kg de N.ha}^{-1}$ no lograron obtener respuestas en rendimiento y Pozzi y Halvorson (2011) en el noreste de Colorado EEUU donde la dosis optima alcanzada fue de 177 Kg N.ha^{-1} . (Figura 6).

Cuadro 4. Componentes del rendimiento según agregado de nitrógeno como urea en estadio de seis hojas.

Tratamiento (*)	0-0	50-0	100-0	150-0	200-0	CV	C1
Rendimiento (Kg.ha ⁻¹)	6537	7578	8958	10327	9349	10,7	0,0006
R PG (mg)	228	223	237	254	248	7,10	NS
I Granos.m ⁻²	2865	3402	3783	4072	3438	11,4	0,0068
E Pl.m ⁻²	7.9	8.1	8.1	8.3	7.7	7,83	NS
G No. granos. Pl ⁻¹	362	422	468	492	396		
O Espigas.pl ⁻¹	0.90	0.92	1.01	0.97	0.92	6,86	NS
No. granos. Espiga ⁻¹	402	458.2	463	508	430	8,17	0,0166
Rendimiento. Espiga ⁻¹	92	102	110	129	107		
Rendimiento (Kg.ha ⁻¹)	3432	4156	5071	4863	4978	12,28	0,0011
S PG (mg)	204	215	215	234	235	7,93	NS0,083
E Granos.m ⁻²	1711	1939	2361	2087	2127	13,48	0,0274
C Pl.m ⁻²	7.8	7.5	7.7	8.4	7.9	5,89	NS
A No. granos. Pl ⁻¹	215	259	311	250	268		
N Espigas.pl ⁻¹	0.85	0.87	0.90	0.86	0.88	5,49	NS
O No. granos. Espiga ⁻¹	253	298	345	290	304	8,86	0,0035
Rendimiento. Espiga ⁻¹	51	64	74	68	71		

*. Los dos números son los momentos de agregado de nitrógeno el primero N V6 y el segundo V10. C1 es el contraste ortogonal que compara 0N versus Resto (50, 100, 150, 200). NS= No significativo.

Se compararon en el Anova los valores de los componentes de rendimiento del testigo sin fertilizar contra el promedio de los tratamientos fertilizados en V6 por medio de contrastes ortogonales (Cuadro 4). En ambos escenarios hídricos el promedio de los tratamientos fertilizados fue significativamente superior en NG y granos por espiga que el testigo, sin embargo el número de plantas por metro cuadrado, el número de espigas por planta y el PG no fueron significativamente diferentes. En este análisis de varianza, sin embargo, no se había considerado evaluar contrastes lineales y cuadráticos incluyéndose solamente “0 versus el resto” como contraste no ortogonal. Por tanto, observando las tendencias de la Figura 7 podría deducirse que la falta de respuesta observada la N del PG pudo haberse debido a que se eligió un contraste inapropiado, ya que parece existir una respuesta lineal del PG al N. Para confirmar esta hipótesis se evaluaron estos dos contrastes no ortogonales (lineales y cuadráticos) observándose que efectivamente existió una tendencia lineal significativa para PG (datos no mostrados). En el caso de NG, en cambio, se observó que los contrastes cuadráticos fueron significativos.

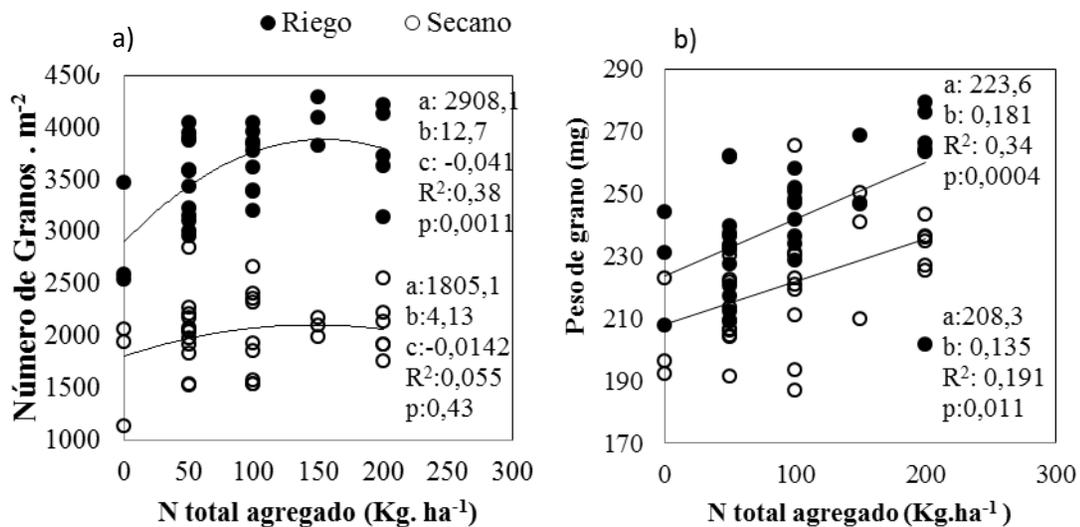


Figura 7. a) Relación entre la dosis de nitrógeno y el NG, b) Relación entre la dosis de N y el PG

Tomando como guía estos resultados, se ajustaron regresiones cuadráticas y lineales para NG y PG respectivamente siendo estas significativas en todos los casos (Figura 7). Estos resultados muestran que existió respuesta al N de NG sólo en la situación con riego pero que existió respuesta de PG al N en ambas situaciones. Por tanto existió interacción de N x Riego solo para NG.

Estos resultados coinciden con los de Melchiori et al. (2006), quienes encontraron diferencias en NG entre los tratamientos fertilizados y el testigo y también observaron una respuesta positiva del PG frente a la dosis de N.

En condiciones de riego si se compara el mínimo NG del testigo frente al máximo que se dio en el tratamiento con 150 N, se percibe que este último generó 1207 granos más por metro cuadrado, esto sería un 29,6 % del máximo NG. En cambio si se compara el mínimo PG que se da en el testigo con el máximo que se da en el tratamiento con dosis de 150 U, el mayor PG superó en 20 mg el testigo, esto sería un 8 % del máximo. En condiciones de secano los porcentajes son 27,5 % para NG y 13,2 % para PG. Este concepto coincide con el de Uhart et al., citados por Maturano (2002) en el cual afirmó que un estrés de nitrógeno afecta en menor medida el componente PG que el de NG.

4.4.1. Eficiencia agronómica del nitrógeno

En el cuadro 5 se presenta los diferentes valores de eficiencia agronómica de nitrógeno del fertilizante (EAN) según las dosis de N agregado en V6, que fueron calculadas para cada dosis evaluada en relación al testigo sin N.

Cuadro 5. Eficiencia agronómica de nitrógeno según dosis de urea agregada a V6 y condición hídrica

N agregado	RIEGO	SECANO
	----- Kg de grano.KgN ⁻¹ -----	
50	20.8	14.5
100	24.2	16.4
150	25.3	9.5
200	14.1	7.7

*las eficiencias de uso se calculan sobre el testigo

Se nota claramente que los tratamientos con riego presentaron una superior EAN en todos los niveles de N agregado. En los tratamientos bajo riego la mayor eficiencia se alcanzó con 150 U de N, siendo esta de 25,3 Kg de grano por Kg de N, mientras que en secano esta se alcanzó con 100 U de N representando 16,4 Kg de grano por Kg de N. Resultados similares encontraron Below et al. (2007) cercanos a 21,6 Kg de grano. KgN⁻¹, Fox et al. (1986) entre 24 y 27 Kg de grano. Kg N⁻¹, Di Paolo y Rinaldi (2007) reportan 26 Kg grano. Kg de N⁻¹, Gregoret et al. (2011) encontraron entre 19 y 22 Kg de grano. Kg N⁻¹.

4.5. RESPUESTA DEL CULTIVO DE MAÍZ AL MOMENTO DE APLICACIÓN DEL N

Como se comprobó una clara respuesta del cultivo de maíz al agregado de nitrógeno, posteriormente se planteó determinar si existió efecto del momento de agregado de este nutriente. Para esto se buscó diferenciar entre aplicar el N todo a V6, fraccionarlo agregando el 50% en V6 y 50% en V10 o el efecto de diferir el momento de aplicar todo en V10.

Se comparó estadísticamente la diferencia en rendimiento y sus componentes entre el tratamiento 3 (100-0) y el tratamiento 5 (0-100), por medio de contrastes ortogonales (C2), no encontrándose diferencias significativas en ninguna de las variables analizadas en condiciones de riego (Figura 8 y Cuadro 6). En cambio en situaciones de secano si difirió significativamente, agregando el fertilizante nitrogenado en V6 se obtuvo mayor rendimiento que agregando la misma cantidad en V10. Esto se podría explicar porque en condiciones de secano el estrés que se generó por falta de N hasta estados muy avanzados del cultivo comprometió el rendimiento sin posibilidades de recuperarlo. En cambio en condiciones de riego un estrés nitrogenado inicial (hasta V10) puede ser tolerado sin deprimir el rendimiento si se agrega N a V10. El déficit de N debería haber sido mayor en el riego ya que se dan las condiciones para expresar alto potencial, por lo tanto las deficiencias encontradas en secano se pueden deber a que el cultivo pudo absorber menos N.

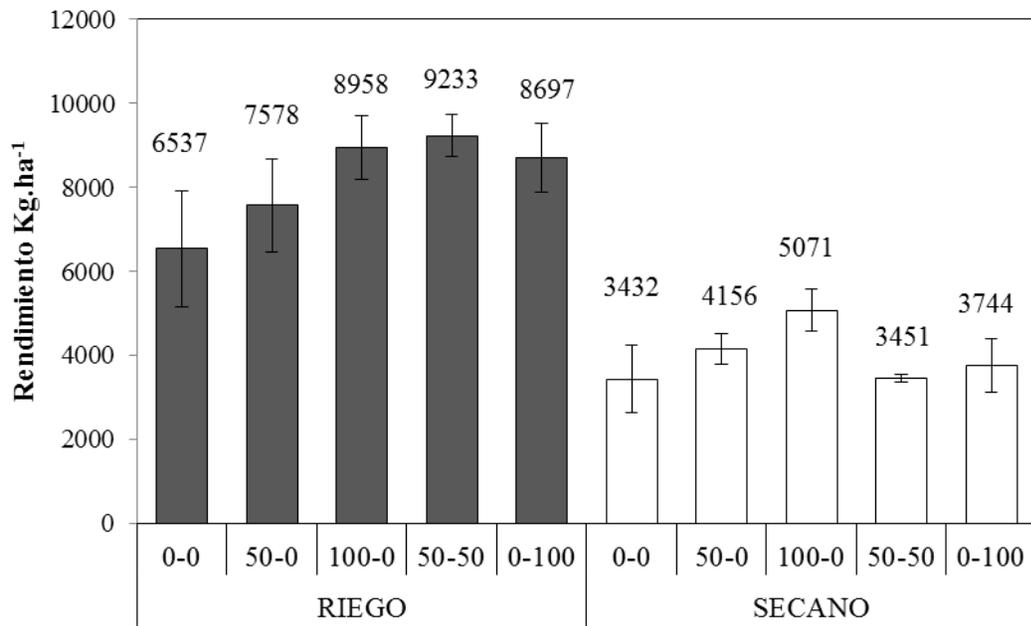


Figura 8. Efecto del momento de aplicación de N en el rendimiento. Líneas en las barras indican desvíos estándar. El primer número representa la dosis de N aplicada a V6 y el segundo número la dosis aplicada en V10.

Cuadro 6. Efecto del momento de aplicación de N sobre los componentes de rendimiento.

	0-0*	50-0	100-0	50-50	0-100	CV%	C2(p)**
Rendimiento (Kg.ha⁻¹)	6537	7578	8958	9233	8697	10,72	0,7353
PG (mg)	227,7	223,3	236,5	245,4	250,2	7,10	0,3376
R NG (granos.m⁻²)	2865	3402	3783	3771	3476	11,37	0,3669
I Pl.m-2	7,91	8,08	8,12	7,56	7,95	7,83	0,744
E No. granos. Pl⁻¹	362	422	468	502	437		
G Espigas.pl-1	0,9	0,92	1,01	1,07	0,96	6,86	0,3997
O No. granos. Espiga⁻¹	402	458	463	469	455	8,17	0,7916
Rendimiento. Espiga-1	91,5	102,3	109,5	115,2	113,9		
Rendimiento (Kg.ha⁻¹)	3432	4156	5071	3451	3744	12,28	0,0072
S PG (mg)	203,8	214,5	214,7	221,8	209,4	7,93	0,7169
E NG (granos.m⁻²)	1711	1939	2361	1555	1774	13,48	0,0156
C Pl.m-2	7,78	7,48	7,65	6,99	7,82	5,89	0,6528
A No. granos. Pl⁻¹	215	259	311	265	228		
N Espigas.pl-1	0,85	0,87	0,9	0,87	0,83	5,49	0,0625
O No. granos. Espiga-1	253	298	345	264	274	8,86	0,0039
Rendimiento. Espiga-1	51,5	63,9	74,1	58,5	57,4		

*. Los dos números son los momentos de agregado de nitrógeno el primero N V6 y el segundo V10.

C2 es el contraste ortogonal que compara 0-100 versus 100-0

** NS= no significativo

Independientemente del análisis estadístico en condiciones de riego, no hubo una gran diferencia entre agregar 100 U de N en V6, en V10 o fraccionado, aunque el rendimiento máximo se observó cuando se fracciono la dosis. En cambio en seco no existieron diferencias que favorecieron el agregado de 100 U de N todo en V6. En cuanto a los componentes de rendimiento se observó un efecto significativo similar a lo visto en rendimiento del momento de aplicación solo para el NG.

En seco el mayor NG fue dado por un mayor número de espigas por planta y NG por espiga. La misma dosis en estadio de 10 hojas logró significativamente menor cantidad de granos por espiga y por ende menor NG por metro cuadrado. Por lo anterior es que se afirma que una única dosis tardía en seco sería “llegar tarde” con el nitrógeno.

4.6. COMPARACIÓN DE FUENTES DE N Y S

Para una misma dosis (50 Kg.ha⁻¹), se evaluaron dos fuentes de N, una sólida (Urea) y otra líquida (UAN) para identificar la opción más eficiente de agregado de N a V6, analizándose estadísticamente los efectos de las fuentes por medio de contrastes ortogonales (C3. Ver materiales y métodos). No se encontraron diferencias ni en

rendimiento ni en sus componentes en ninguna de las situaciones hídricas (Figura 10 y Cuadro 7).

Se evaluaron además dos fuentes mixtas N y S, una sólida (Urea + SA) y una líquida (SOLMIX) ambas con 9 U de S, nuevamente para una dosis de N equivalente a 50 U de N, no encontrando diferencias significativas en rendimiento entre ellas en la situación con riego, en cambio en secano si existieron diferencias en rendimiento a favor de la Urea-SA (C4). Luego se compararon las fuentes con nitrógeno (Urea y UAN) versus las fuentes con nitrógeno y azufre (Urea-SA y Solmix, C5). En condiciones de riego no se observó diferencias en rendimiento ni en sus componentes entre las fuentes con N (Urea UAN) y las fuentes con N y S (Urea-SA y Solmix). En secano, en cambio, las fuentes con S fueron significativamente superiores en rendimiento, NG.m^{-2} y granos por espiga respecto a aquellas carentes de azufre (Cuadro 7). Fue justamente la superioridad de Urea-SA frente al Solmix lo que llevo a que el promedio de las fuentes azufradas fueran mayores que el promedio de las fuentes nitrogenadas sin azufre (Fig. 10).

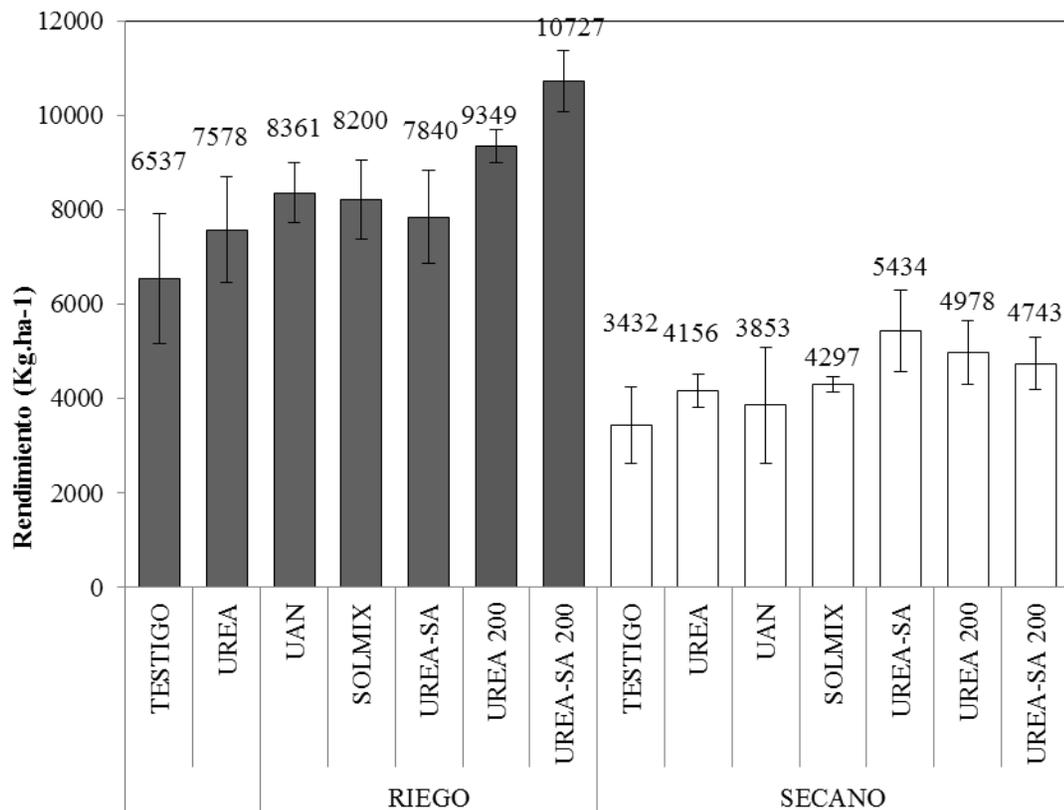


Figura 9. Efecto de las fuentes de nitrógeno y azufre agregadas en V6 con dosis equivalentes a 50 unidades de N. Líneas en las barras indican desvíos estándar.

En general no se encontraron diferencias lo que se podría explicar porque las dosis de 50 U de N evaluada estuvieron por debajo de la dosis óptima para obtener altos rendimientos tanto en riego como en secano.

Cuadro 7. Efecto de la fuente de Nitrógeno en los componentes de rendimiento para ambas condiciones hídricas.

		Testigo	UREA	UAN	SOL-MIX	UREA + SA	C3(p)	C4(p)	C5(p)
R I E G O	Rend. (Kg.ha⁻¹)	6537	7578	8361	8200	7840	NS	NS	NS
	PG (mg)	227,7	223,3	235,1	235,9	225,6	NS	NS	NS
	Granos.m⁻²	2865	3402	3560	3496	3274	NS	NS	NS
	Pl.m-2	7,91	8,08	8,29	8,12	8,21	NS	NS	NS
	NG. Pl⁻¹	362	421,5	429,6	433,8	423,5			
	Espigas.pl-1	0,9	0,92	0,95	0,95	0,98	NS	NS	NS
	NG. Espiga-1	402	458,2	452,2	456,6	432,1	NS	NS	NS
	Rend. Espiga-1								
S E C A N O	Rend. (Kg.ha⁻¹)	3432	4156	3853	4297	5434	NS	0,0182	0,0124
	PG (mg)	203,8	214,5	214,4	208,2	231,2	NS	NS	NS
	Granos.m⁻²	1711	1939	1779	2065	2366	NS	NS	0,0342
	Pl.m-2	7,78	7,48	7,82	7,44	7,82	NS	NS	NS
	NG. Pl⁻¹	215	259,0	224,9	278,2	300,4			
	Espigas.pl-1	0,85	0,87	0,85	0,88	0,9	NS	NS	NS
	NG. Espiga-1	253	297,7	264,5	316,2	333,8	NS	NS	0,0097
	Rend. Espiga⁻¹	51,5	63,9	56,7	65,8	77,2			

Se evaluó además la respuesta a S a altos niveles de N (200 kg.ha⁻¹ Urea+SA). Según el contraste ortogonal (C6, resultados en anexos) no existieron diferencias significativas en ninguna de las situaciones hídricas, no existiendo por tanto interacción N por S. Cabe señalar que en el caso de riego la probabilidad de este contraste fue de 0,113, lo cual es cercano al valor de 10%, considerado como aceptable a nivel agronómico. Independientemente de la estadística, se observó una tendencia de incremento en el rendimiento con agregado de S en la situación con riego, lo que pone de manifiesto que el S en estas condiciones pudo haber sido una limitante para obtener altos rendimientos. En el caso de secano, en cambio, no se vio un efecto del S ya que la limitante más importante fue la disponibilidad hídrica para la absorción de N. Quedando claro por la relación N/S más baja que en el riego. (Figura 9). Si bien se cuenta con muy pocos datos como para generar un nivel crítico de la relación N/S, se observó que tanto en secano como en riego el valor óptimo de esta relación se situó entre 13 y 14, lo cual fue inferior al umbral crítico de 16:1 propuesto por Spencer y Freney, Blake Kalff et al., citados por Russicalvo et al. (2000)

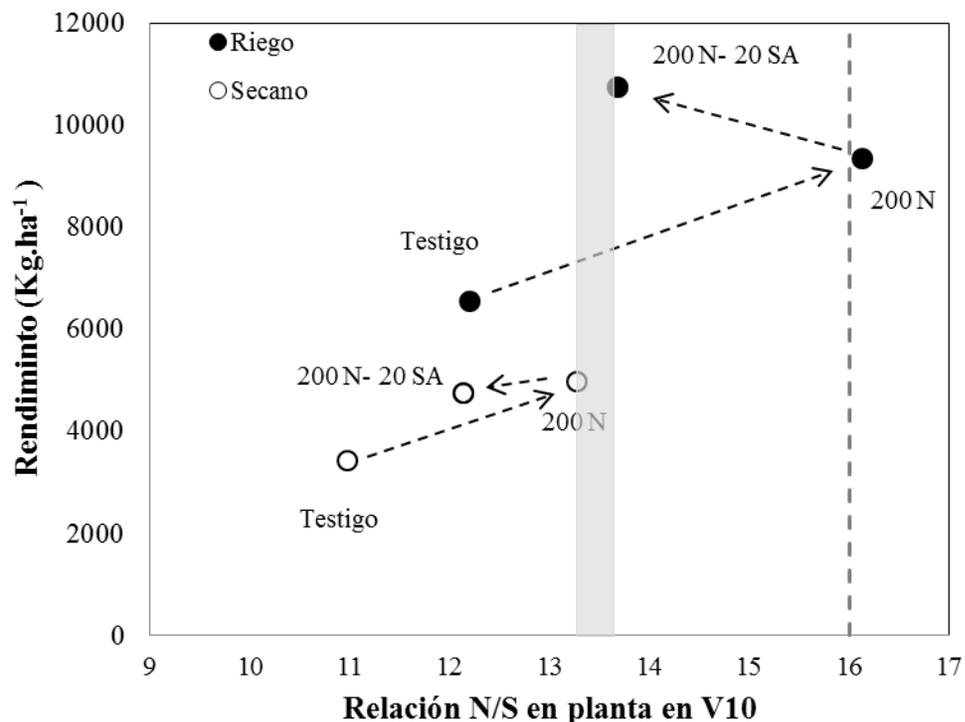


Figura 10. Rendimiento y relación N:S en planta en V10. La línea vertical punteada indica el umbral crítico de 16:1 propuesto por Spencer y Freney, Blake Kalff et al., citados por Russicalvo et al. (2000) y el área sombreada representa el rango N:S asociada al máximo rendimiento observado en la situación de secano y riego, para las condiciones en las que se realizó el ensayo. Las flechas representan el cambio conjunto con respecto al testigo de la relación N:S del rendimiento ante el agregado de N y/o S para riego y secano.

4.7. POSIBILIDAD DE PREDECIR LA RESPUESTA AL NITRÓGENO EN V10

Hay una serie de trabajos que muestran buenos resultados de los indicadores indirectos como estimadores del status nitrogenado del cultivo de maíz en torno a V10-V11. Como indicadores indirectos se encuentran el índice de clorofila (Yadava, Marquard y Tipton, Dwyer et al., citados por Argenta et al. 2001b, Echeverría y Sainz Rozas 2006), índice de verde mediante cartilla de colores LCC (Perdomo et al., 2008).

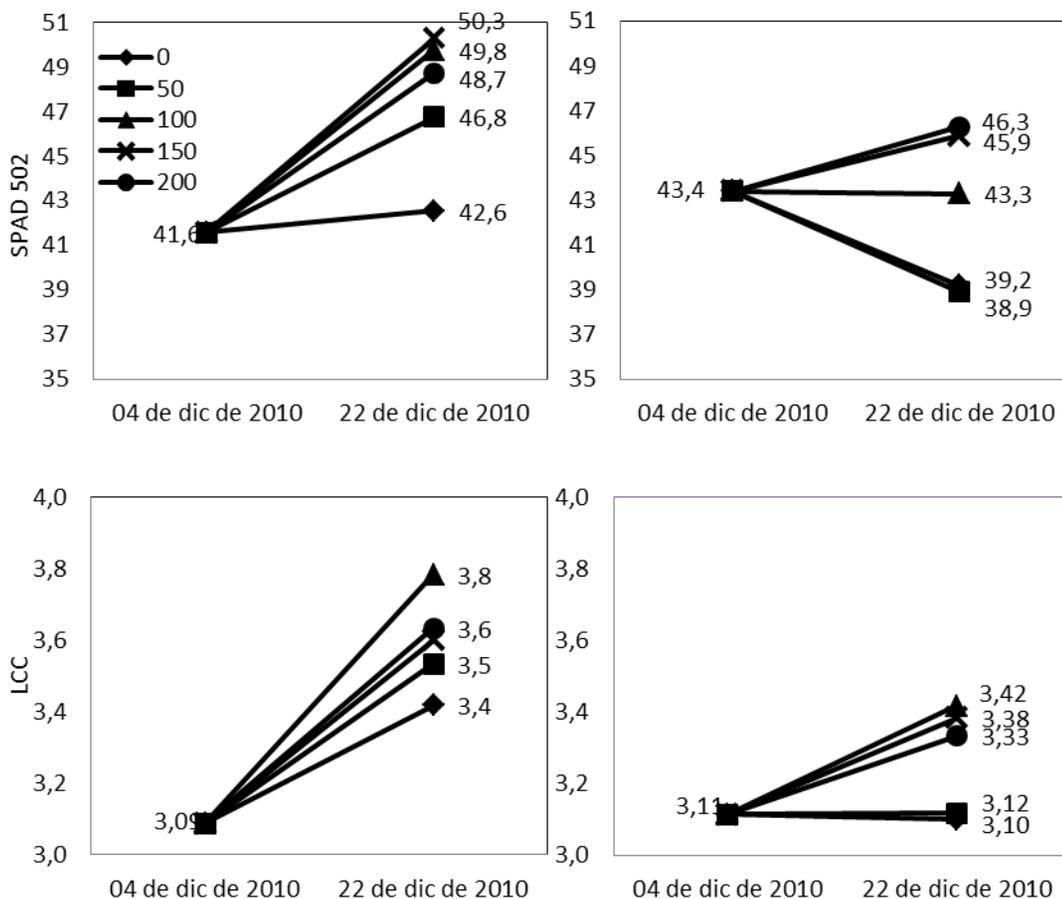


Figura 11: a) Evolución de las lecturas de SPAD y LCC desde V6 a V10 para distintas dosis de N en V6. Las figuras 11 a y b muestran respectivamente las lecturas de SPAD en condiciones de riego y seco y las 11 c y d la evolución de las de LCC también para riego y seco, respectivamente.

Las mediciones de SPAD 502 y LCC se realizaron solamente en V6 y en V10. Los valores de las lecturas de SPAD 502 en riego en el estadio de 10 hojas se incrementaron con respecto a V6 a medida que aumentó la dosis agregada en V6. De igual manera se comportaron las lecturas de la tabla de colores en condiciones sin limitantes hídricas.

En seco los tratamientos con 0 y 50 U de N dieron medidas de SPAD 502 en V10 inferiores que en V6, cuando se agregaron 100 U de N las lecturas se mantuvieron y con niveles mayores de N (150 y 200) estas fueron mayores a las obtenidas en el estadio de 6 hojas. Para el caso de LCC, en los tratamientos 0 y 50 las lecturas se mantuvieron, con el resto de las dosis estas se incrementaron. Estos resultados difieren de los obtenidos por Perdomo (2006) que en todas las ocasiones las lecturas de clorofila

descendieron desde V6 hasta V10, las diferencias se podrían deber a las condiciones hídricas donde se desarrolla el cultivo ya que el experimento de Perdomo fue en secano y pensamos que la falta de agua genera menos clorofila en hoja lo que hace que los índices descendan o los niveles de N-NO₃ presentes en el suelo. De todas maneras a los resultados en secano son similares a los obtenidos por Perdomo ya que en las dosis de 0 y 50 también descendieron las lecturas de SPAD.

El agregado de N en V6 incrementó significativamente el valor del porcentaje de N en hoja y SPAD 502 en V10 (Figura 11 y Cuadro 8) y el resultado de los contrastes reveló que la tendencia más significativa fue lineal. En el caso de LCC esta respuesta fue significativa sólo a un nivel de 10% aunque también la tendencia fue lineal a este nivel de probabilidad, pero similar en el caso de riego a la probabilidad del contraste 0 versus resto. El análisis de regresión lineal de esos datos se presenta en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Coeficientes de ecuaciones lineales entre dosis de N agregada en V6 y valores de índices directos e indirectos del status nitrogenado medidos en V10-11, para condiciones de riego y secano.

Coeficiente	%N		SPAD 502		LCC	
	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano
A	1,81	1,73	43,39	38,34	3,47	3,12
B	0,0052	0,0021	0,05	0,04	0,0016	0,0015
R²	0,82	0,54	0,58	0,51	0,28	0,20
P	0,001	0,0019	0,0015	0,0029	0,0518	0,0975

Las lecturas de SPAD 502 en riego tuvieron una tendencia lineal definida por el modelo $y = 0,05X + 43,39$, con un $R^2 = 0,58$ y un p valor = 0,0015, a medida que aumenta la dosis, aumenta la lectura de SPAD 502 (fig.11a). En condiciones de secano las lecturas también tuvieron una tendencia lineal definida por el modelo $y = 0,04X + 38,34$, tuvo un $R^2 = 0,51$ y con un p valor de 0,0029, pero a diferencia de riego el testigo sin fertilizar no difirió significativamente del promedio de los tratamientos fertilizados (Ver en anexos resultados de los contrastes).

En todos los casos los coeficientes obtenidos con riego fueron mayores que en secano. El valor del intercepto “a” indica el valor de índices sin efecto del N; con riego y sin N se obtuvieron valores superiores de todos ellos (%N en hoja, SPAD 502 y LCC). Esto podría ser explicado por que en condiciones de secano se limita el aporte de N, ya sea por menor mineralización del suelo o absorción de la planta. En el caso de la pendiente “b” también fue mayor en riego para todas las situaciones, esto significa que

una unidad de N aumenta en mayor medida los valores de %N, SPAD 502 y LCC medidos en V10 en condiciones de riego que en secano.

4.8. INDICADORES DEL STATUS NITROGENADO

Como el porcentaje de N es el índice más directamente relacionado con el estatus nitrogenado del cultivo, se analizó la correlación entre el porcentaje de nitrógeno en planta y las lecturas indirectas que intentan predecir este estatus a partir del color de la hoja o del nivel de clorofila.

Al estadio de seis hojas no se encontró relación entre el porcentaje de nitrógeno en planta ni con las lecturas de LCC ni con SPAD. El porcentaje de N en planta no es un buen indicador de deficiencias de N en estadios tan tempranos, tampoco tiene relación con la cantidad de N-NO₃ en el suelo, que es un buen indicador para determinar deficiencias de este nutrientes. Estos resultados coinciden con datos nacionales que establecen la baja correlación de estos indicadores; (Borghi y Wornicov 1998, Perdomo et al. 1998).

Sin embargo en el estadio de 10 hojas se encontró una buena relación entre el porcentaje de N en hoja y los indicadores indirectos del status nitrogenado, pero solo para condiciones de riego (Figura 14). En cambio en secano estas correlaciones fueron muy bajas ($R^2 = 0,156$ y $0,029$ para SPAD y LCC respectivamente), posiblemente debido a que en situaciones de limitantes hídricas como en las que se desarrolló el experimento estos indicadores indirectos pueden indicar cambio en el color de hoja que no necesariamente están asociados al déficit de N, sino que también pueden ser consecuencia de la falta de agua. Otra posibilidad es que la pobre correlación encontrada entre estos indicadores indirectos y el porcentaje de N de la hoja en condiciones de secano se debe en parte al bajo rango de variación encontrado en estas condiciones para los tres indicadores. En riego este rango de variación fue mucho mayor (Figuras 14a y b), pero a igual rango de variación se observa que la relación encontrada entre riego y secano fue similar.

Con este resultado queda claro que estos instrumentos de medición indirecta pueden ser utilizados con relativa seguridad para detectar deficiencias de N cuando las condiciones de deficiencia hídrica no son muy grandes. Estos resultados son similares además a lo encontrado por Novoa y Villagrán (2000), en condición de riego, quienes encontraron una correlación entre N y SPAD 502 de 0,81.

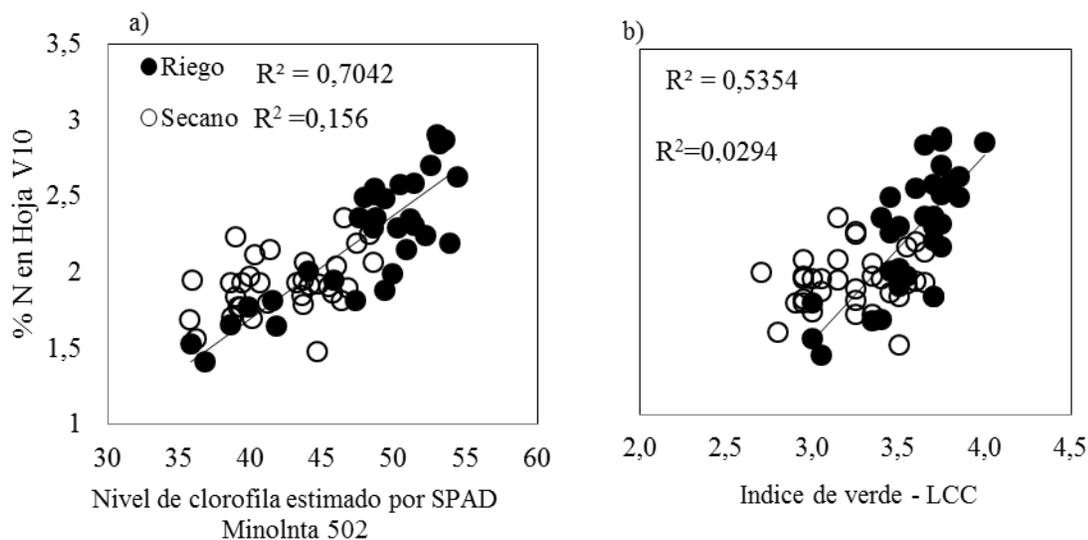


Figura 12. a) Relación entre el porcentaje de nitrógeno en la hoja opuesta a la mazorca en el estadio de V10 y el nivel de clorofila en hoja estimado por SPAD Minolnta 502; b) Relación entre índice de color LCC y el porcentaje de nitrógeno en la hoja opuesta a la mazorca.

4.8.1. Estimación de niveles críticos para los distintos indicadores evaluados

A pesar de que en la práctica el ajuste de la dosis de N es una meta difícil de ser alcanzada, igual resulta importante intentar aproximarse a ella, dado el elevado costo del N y los problemas ambientales asociados a aplicaciones excesivas de este nutriente.

En este sentido en este trabajo se intentó definir niveles críticos para los diferentes indicadores evaluados en V10, buscando generar información que facilite la recomendación de dosis en este momento del cultivo.

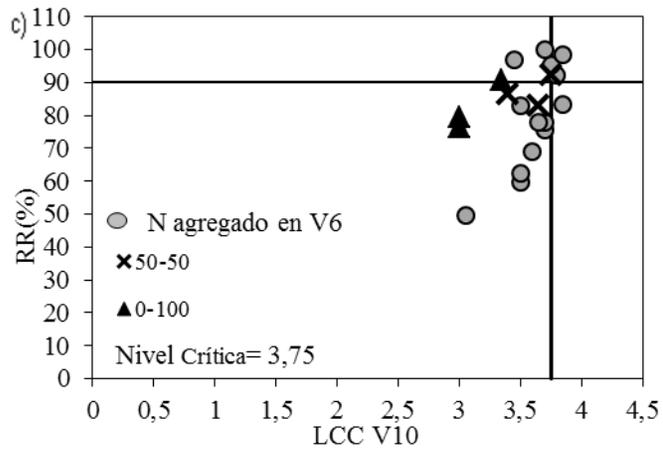
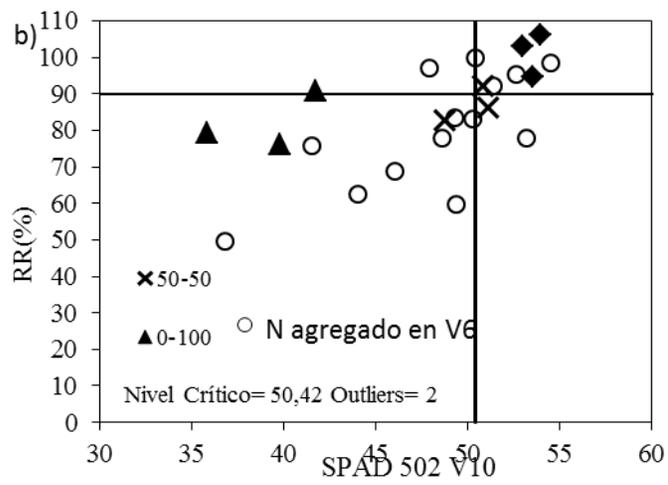
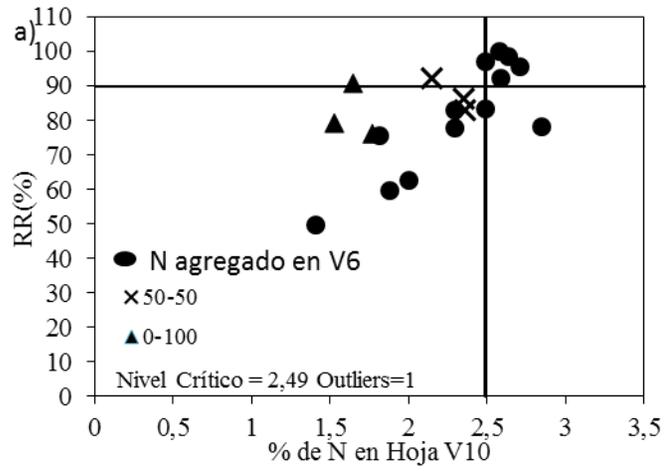


Figura 13. Relación entre valor de tres índices de respuesta a N en V10 y rendimiento relativo de maíz bajo riego. Los círculos corresponden a las distintas dosis (0, 50, 100, 150 y 200) agregadas en V6. El nivel crítico fue estimado en base al método gráfico Cate Nelson para valores de rendimiento relativo de 90%. Los indicadores tomados de la hoja opuesta a la mazorca son: a) concentración de N, b) Índice de clorofila SPAD 502 y c) carta de color de hoja LCC.

Los tres indicadores de respuesta evaluados mostraron una buena relación con el rendimiento relativo (RR, calculado $(\text{Rendimiento} \times 100) / \text{rendimiento máx.}$ por cada situación hídrica) al N en V10 en condiciones de riego, por lo cual cualquiera de ellos podría usarse para predecir la respuesta al N agregado en V10. La tabla de LCC utilizada en este trabajo fue diseñada para trabajar en arroz, ya que no se pudo conseguir la tabla diseñada expresamente para el cultivo de maíz. A pesar de esta limitante los resultados fueron satisfactorios, lo cual resulta promisorio ya que al igual que lo que ocurre con el lector de clorofila el dato se obtiene en tiempo real, pero a diferencia de este la tabla de LCC tiene bajo costo.

Se estableció un nivel crítico de aproximadamente 2,5 % de N en hoja a V10 para asegurar un 90 % de rendimiento (Figura 12). Los tratamientos con N agregado en V10 tendieron a alcanzar valores mayores de rendimiento relativo que los tratamientos sin refertilización cuando estos fueron inferiores al crítico. Cabe señalar que el valor encontrado concuerda con lo citado por la bibliografía nacional (Perdomo y Hoffman, 2011) e internacional (Benton Jones et al., 1990).

Para el lector de clorofila SPAD 502 se determinó un nivel crítico de 50 para obtener un 90 % del rendimiento relativo. Este valor es superior al 40 encontrado por Rubio y Cazaban e inferior a lo reportado por Argenta et al. (2001a), el cual encontró un valor óptimo de 55 para V10-11. Existen otros datos de niveles críticos reportados en la bibliografía, pero estos son para estadios más avanzados en el ciclo (Novoa y Villagrán 2000, Argenta et al. 2001a).

Para la tabla de colores el nivel crítico para obtener el 90% de rendimiento relativo fue 3,75. Este resultado es inferior al valor de 4.⁴ Una vez más se nota claramente que cuando los valores de lectura fueron inferiores a este nivel crítico la fertilización en estadios tardíos logró que el cultivo tuviera un incremento en el rendimiento frente al tratamiento sin fertilizar.

En condiciones de secano los niveles críticos establecidos alcanzan valores inferiores (% N en hoja 2,49, SPAD 48,5 y LCC 3,6) que en situaciones sin limitantes hídricas, como se muestra en la Figura 13. Estos resultados son esperables debido a que las limitantes hídricas generan una disminución en la absorción de N, lo que da niveles menores de todos los indicadores.

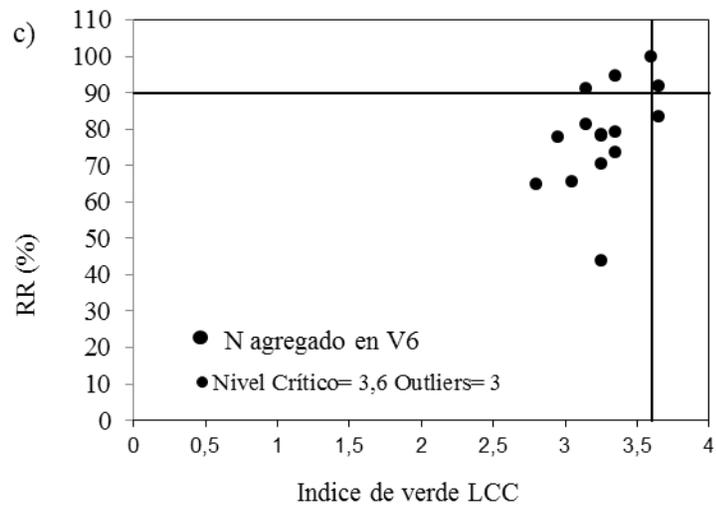
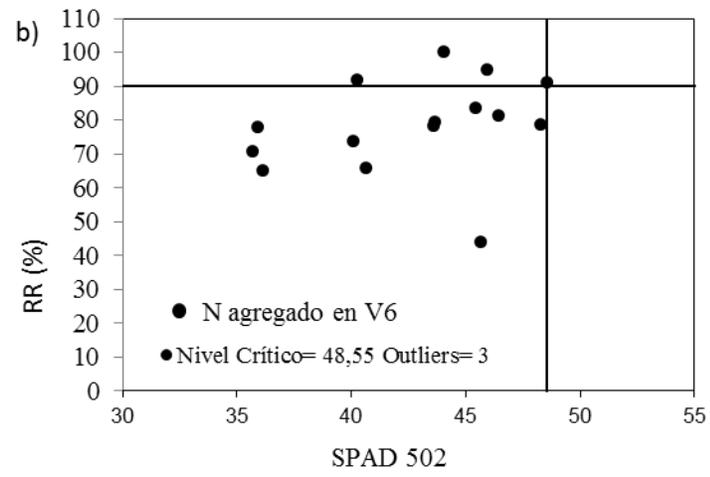
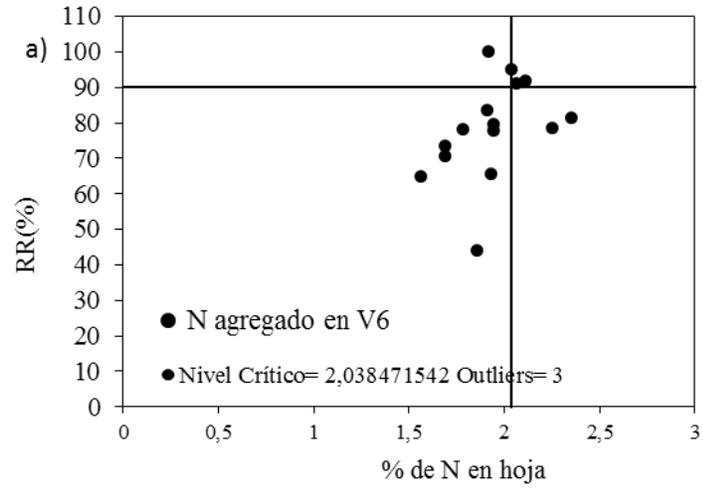


Figura 14. Relación entre valor de tres índices de respuesta a N en V10 y rendimiento relativo de maíz en secano. Los círculos corresponden a las distintas dosis (0, 50, 100, 150 y 200) agregadas en V6. El nivel crítico fue estimado en base al método gráfico Cate Nelson para valores de rendimiento relativo de 90%. Los índices tomados de la hoja opuesta a la mazorca son: a) Índice de clorofila SPAD 502, b) concentración de N y c) carta de color de hoja LCC.

Estos resultados muestran en definitiva que cualquiera de los tres indicadores evaluados (%N, SPAD 502 y LCC) podrían ser utilizados en condiciones sin limitantes hídricas para detectar deficiencias de N en los estadios V10-V11, pero no serían útiles para detectar deficiencias en los momentos más tempranos de cultivo, como V6.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de estos ensayos sugieren que el agregado de agua a un cultivo de maíz puede significar duplicar el rendimiento frente a condiciones de secano, en años con escasas de precipitaciones, por lo que parece imprescindible contar con un sistema de riego al momento de proponerse hacer un cultivo de maíz si se quieren obtener buenos rendimientos para evitar depender de la variabilidad de las precipitaciones.

Por tanto, en situaciones de bajos niveles de N-NO₃ en suelo el maíz presenta alta respuesta a la fertilización nitrogenada independientemente de la condición hídrica, con lo que se concluye que siempre hay que hacer un manejo objetivo del nitrógeno. Cuando los resultados dicen que “hay que agregar”, hay que agregar ya que la respuesta en rendimiento compensa el costo del N adicional.

En condiciones sin limitantes hídricas la respuesta encontrada en estos ensayos fue hasta 188 unidades de N, en cambio en secano a partir de 123 unidades de N no se encontraron diferencias en rendimiento. Esto se asocia con lo anterior; en condiciones de secano se debe ser algo más conservador con el N agregado ya que el óptimo económico va a ser inferior.

En condiciones de buena disponibilidad hídrica no se encontró diferencias entre agregar el N en V6 o V10. En cambio, en condiciones de secano, fue mejor agregar el N temprano (V6), ya que los tratamientos con N en V10 rindieron casi lo mismo que el testigo. Por tanto, el agregado tardío (V10) genera pérdidas en rendimiento. Esto puede ser utilizado como una estrategia para un manejo más efectivo del N en condiciones de riego.

En la comparación de fuentes de N no se encontró diferencias entre Urea (sólida) y UAN (líquida). Tampoco se encontraron diferencias entre fuente con S (Urea-SA y Solmix, sólida y líquida respectivamente) en el caso de riego, pero si se encontró respuesta al agregado de S en secano. Esta respuesta se debió exclusivamente al mayor rendimiento obtenido con Urea-SA. Esta falta de respuesta al S en condiciones de riego pudo deberse en parte a que las dosis de N a las que se hicieron estas comparaciones (50 unidades) esta muy por debajo del óptimo de respuesta. Sin embargo, cuando se comparó Urea y Urea-SA a 200 U de N si existió respuesta al S en condiciones de riego.

Los valores de los indicadores directos (% de N en hoja) e indirectos (SPAD 502 y LCC) son coincidentes con la bibliografía y se relacionaron con el nivel de respuesta del cultivo observándose mayor respuesta a menores valores de estos indicadores. Sin embargo, existieron diferencias en los niveles críticos entre riego y secano, siendo mayores en riego, lo que puede complicar la interpretación de estos índices en condiciones de campo. Este resultado puede deberse en parte a que la falta de agua afecte el color de hoja independientemente del status nitrogenado.

Con lo anterior se puede concluir que se afirma la hipótesis del trabajo, ya que existe respuesta al agregado tardío de N más aun en condiciones de buen status hídrico y esta puede ser predicha por indicadores directos e indirectos.

6. RESUMEN

El maíz es de los granos más antiguos del mundo, ocupa el segundo lugar en volumen de producción y el primero en producción por hectárea. En Uruguay ha aumentado el área sembrada pero los rendimientos se han estancado. Esto se debe a que el cultivo tiene gran dependencia del status hídrico y nutricional. Las posibles soluciones serían la utilización del riego complementario y la aplicación de mayores cantidades de N, pero es difícil agregar todo el N necesario en V6, pero es posible fraccionar la fertilización y agregar parte de este nutriente más tarde en el ciclo del cultivo. Por eso este trabajo evaluó la respuesta al N agregado en V10 en comparación con V6. Además se evaluaron diversos indicadores de planta que permitan diagnosticar deficiencias de este nutriente en el estadio de 10 hojas y se probaron distintas fuentes de N y S agregadas en V6. En la zafra 2010-2011 se instalaron dos ensayos en un predio comercial en condiciones hídricas contrastantes, bajo riego y seco. Los experimentos fueron en diseños en bloques completos al azar con tres repeticiones. Las dosis de N aplicadas en V6 fueron 50, 100, 150, 200 y un testigo sin fertilizar y las combinaciones V6-V10 50-50 y 0-100. Las fuentes de N ensayadas fueron Urea sólida y UAN en formulación líquida, a dosis equivalente a 50 U de N y las que contenían N y S fueron Solmix y Urea-SA a dosis equivalente a 50 U de N y de azufre 9 y 12 para Solmix y Urea-SA respectivamente. Los indicadores del estatus nitrogenado que se probaron en V6 y V10 fueron el %N en hoja, el medidor de clorofila en hoja SPAD Minolta 502 y la tabla de colores Leaf Colour Chart (LCC). Se encontró una importante respuesta al agregado de N la cual fue amplificada con buenas condiciones hídricas. No se encontraron diferencias en los momentos de aplicación de N con riego, pero sí en la situación de seco que resultó mejor agregar temprano que tarde y la respuesta es menor. Entre las fuentes de N no se encontraron diferencias significativas, explicado por las bajas dosis probadas (50 unidades). Entre las fuentes de S se encontró superioridad de la Urea-SA sobre Solmix en seco cuando se evaluaron. A dosis altas de N el agregado de Urea-SA 200 U, logró rendimientos más elevados que N200. En cuanto a los indicadores, los tres se relacionaron con el nivel de respuesta del cultivo y detectaron los tratamientos deficientes en N, y los valores de los tres se encontraron en el rango citado por la bibliografía.

Palabras clave: Maíz; Nitrógeno; Aplicación tardía; Dosis; Fraccionamiento; Solmix; Urea-SA; Azufre; Rendimiento relativo; SPAD; LCC.

7. SUMMARY

Corn is one of the world's oldest crops, and globally is the second crop in terms of total production and the first in terms of productivity (kg per hectare). In Uruguay the planted area has increased but yields have stagnated, which is partly due the crop dependence on water and nitrogen fertilization. Possible solutions include the use of supplemental irrigation and the application of higher amounts of N. Farmers however are not enthusiastic about applying high N rates early in the season (up to V6), but they probably would be more prone to apply extra N later in the crop cycle (i.e. V10-V11), when more information about the yield potential is available. Therefore, this study evaluated crop response to N added in V10 in comparison to V6 applications, and compared the ability of various plant indices for diagnosing N deficiencies at V10-V11, as well as the relative efficiency of several N and S sources applied at V6. In 2010-2011 two trials were installed at V6 in a commercial corn crop under irrigated and rainfed conditions. Each trial consisted of a control (0 N), 5 N rates (50, 100, 150, and 200) applied at V6 and 2 N rates (50-50 and 0-100) applied at V6-V10, using Urea as the fertilizer. In addition, four other treatments were applied at V6 using different fertilizer sources: 50 N as liquid UAN, 50 N+ 9 S as liquid Solmix, and two treatments using Urea- Ammonium sulfate (50 N + 12 S and 200 +20 S). The leaf N indexes used at V6 and V10-11 to evaluate the nutritional status of corn where leaf N concentration, leaf chlorophyll content (evaluated with the Minolta SPAD 502chlorophyll meter) and a color index using a Leaf Colour Chart (LCC). In both trials we found a significant crop response to N which was amplified under irrigation. Nitrogen timing, however, did not affect yield under irrigation, but in dryland conditions the yield was higher when N was applied at V6 instead of V11. There were no differences among N sources at the 50 kg/ha dose, but this result could have been influenced by the relatively low yield response to N obtained at this rate. There was a significantly higher yield when UREA-SA was used instead of Solmix at this rate of 50 N, but only under dryland conditions. At the 200 kg/ha N rate there was a trend toward higher yields when Urea-SA was used instead of Urea, but only under irrigation. The three leaf N indexes evaluated were closely related to N response, correctly discriminating at V10 between responsive and non-responsive treatments, and the observed critical values were within the range cited by other authors.

Keywords: Corn; Nitrogen; Late application; Rate; Split N-application; Solmix; Urea-SA; Sulfur; Relative yield; SPAD; LCC.

8. BIBLIOGRAFIA

1. ACHAVAL CASANOVA, M.; DUCAMP RODRIGUEZ, F. 1998. Fertilización fosfatada a la siembra y nitrogenada a 6 hojas de maíz para grano en siembra directa sobre tres chacras diferentes. Tesis Ing. Agr. Montevideo. Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 1-86.
2. ACKERMANN, P.; GASPARRI, N. 2011. Efecto de la intensidad de uso agrícola del suelo sobre el balance de nitrógeno, fósforo y potasio. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 72 p.
3. ALVAREZ, R.; STEINBACH, H.S.; ALVAREZ, C.R.; GRIGERA, S. 2003. Recomendación para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la Pampa ondulada. IPNI. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 18: 1-12.
4. ANDRADE, F.H.; ECHEVERRIA, H.E.; GONZALEZ, N.S.; UHART, S.A. 2000a. Requerimientos de nutrientes minerales. In: Andrade, F.; Sadras, V. eds. Bases para el manejo de maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. p. 450.
5. _____.; AGUIRREZÁBAL, L.A.N.; RIZZALLI, R.H. 2000b. Crecimiento y rendimiento comparados. In: Andrade, F.; Sadras, V. eds. Bases para el manejo de maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp.61-96.
6. ARGENTA, G.; FERREIRA DA SILVA, P.R.; BORTOLINI, C.G.; FORTSHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L. 2001a. Relação da leitura do clorofilômetro como os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal. 13(2):158-167.
7. _____.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G. 2001b. Teor de clorofila na folha como indicador do nivel de N em cereais. Ciência Rural. 31(3): 715-722.
8. _____.; _____.; FOSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L.; SUHRE, E.; TEICHMANN, L.L. 2003. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento de nivel de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 27 (1): 109-119.

9. BARBIERI, P.A.; ECHEVERRIA, H.E.; SAINZ ROZAS, H.R. 2003. Respuesta del cultivo de maíz bajo siembra directa a la fuente y al método de aplicación de N. *Ciencia del Suelo* 21(1): 18-23.
10. _____.; _____.; _____: 2005. Cuantificación de las pérdidas por volatilización en el cultivo de maíz en función de la fuente, dosis y métodos de colocación del fertilizante. Convenio INTA Balcarce-Profertil, 2004/05. s.n.t. s.p.
11. BELOW, F. E.; URIBELARREA, M.; MOOSE, S. P.; SEEBAUER, J. R. 2007. ¿Podemos mejorar la eficiencia del uso de nitrógeno en Maíz? *Fertilizar Asociación Civil*. no. 7: 23-31.
12. BENTON JONES, B. JR.; ECK, H. V.; VOSS, R. 1990. Plant analysis as an aid in fertilizing corn and grain sorghum. *In*: Westerman, R L. ed. *Soil testing and plant analysis*. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America. pp. 521-547.
13. BINFORD, G.D.; BLACKMER, A.M.; CERRATO, M.E. 1992. Relationships between corn yields and soil nitrate in late spring. *Agronomy Journal*. 84(1): 53-59.
14. BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. 1995. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. *Journal of Production Agriculture*. 8(1): 56-60.
15. BORGHI, E.; WORNICOV, C.G. 1998. Evaluación de la capacidad predictiva de distintos indicadores de suelo y plantas para el ajuste de la refertilización nitrogenada en el cultivo de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 53 p.
16. CALVIÑO, P.A.; ECHEVERRIA, H.E. 2003. Incubación anaeróbica del suelo como diagnóstico de la respuesta a nitrógeno del maíz bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*. no. 21: 24-20.
17. CAPURRO, J.; FRIORITO, C; GONZALEZ, M.C.; PAGANI, R. 2002. Fertilización del cultivo de maíz en Cañada de Gómez (Santa Fe). Resultados del ensayo Campaña 2000/01. IPNI. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 15: 8-11.
18. _____.; FRIORITO, C.; GONZALEZ, M.C.; CASASOLA, E.; ZAZZARINI, A.; ANDRIONI, J.; VERNIZZI, A. 2007. Respuesta del cultivo de maíz a la fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre en el sur de Santa Fe. IPNI. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 36: 17-21.

19. CAVIGLIA, O.P.; MELCHIORI, R.J.M. 2006. Análisis de la eficiencia de utilización del nitrógeno y sus componentes. In: Actualización técnica de maíz. Entre Ríos, INTA. pp.37-39 (Serie de Extensión no. 41).
20. _____.; _____.; KEMERER, A.; VAN OPSTAL, N.V.; GREGORUTTI, V.C. 2007. Relaciones entre las eficiencias en el uso del nitrógeno y de la radiación en maíz. In: Actualización técnica Maíz, Girasol y Sorgo. Entre Ríos, INTA. pp. 7-12 (Serie de Extensión no. 44).
21. _____.; SADRAS, V. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, wáter – and radiation – use efficiency of wheat. *Field Crops Research*. 69 (3):259-266.
22. CORAL; D.; MOLINA, C. 2010. Avances en la investigación de nutrición de maíz. (en línea). s.l., FENALCE. pp. 5-12. Consultado 24 feb. 2012. Disponible en http://www.fenalce.org/arch_public/AVANT95.pdf
23. DAHNKE, W.C.; JHONSON, G.V. 1990. Testing soils dor available nitrogen. In: Westerman, R L. ed. *Soil testing and plant analysis*. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America. pp. 127-139.
24. DI PAOLO, E.; RINALDI, M. 2007. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*. 105(3): 202-210.
25. ECHEVERRIA, H. E.; BERGONZI, R.; FERRARI, J. 1993. Estimación de la mineralización de nitrógeno en el suelo. In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (14°, 1993, s.l.). Texto completo. s.n.t. s.p.
26. _____.; SAIZ ROZAS, H. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno aplicado al estadio de 6 hojas del maíz bajo riego en siembra directa y labranza convencional. Balcarce, INTA. Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 57-66
27. _____.; _____. 2006a. Maíz. In: Echeverría, H.E.; García, F.O. eds. *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Buenos Aires, INTA. pp. 255-882.
28. _____.; _____. 2006b. Nitrógeno. In: Echeverría, H.E.; García, F.O. eds. *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Buenos Aires, INTA. pp. 69-97.

29. FAOSTAT. 2009. Food and agricultural commodities production; world statistics. (en línea). Rome, FAO. s.p. Consultado 11 de dic. 2011. Disponible en <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.
30. FERRARIS, G.; SALVAGIOTTI, F.; PRYSTUPA, P.; GUTIERREZ BOEM, F. 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. In: Congreso de la Ciencia del Suelo (19º., 2004, Paraná Entre Ríos, Argentina). Trabajos presentados. Informaciones Agronomicas. no. 23: s.p.
31. _____; COURETOT, L.; TORIBIO, M.; FALCONI, R. 2008. Efecto de diferentes estrategias de fertilización sobre el rendimiento de maíz y el balance de nutrientes en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Campaña 2006/07. IPNI. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 37: 20-22.
32. _____; _____; _____. 2009. Perdidas de Nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz: Efectos de fuente, dosis y uso de inhibidores. IPNI. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 43: 19-22.
33. FIGUEROA, E. 2005. Proyecto arroz. Campaña 2004-2005; evaluación de híbridos de maíz no-BT y BT/E. s.l., INTA. Centro Regional Corrientes. Estación Experimental Agropecuaria Corrientes. 2 p.
34. GARCIA, F.1996. El ciclo de nitrógeno en ecosistemas agrícolas. INTA. Boletín Técnico. no. 140: 1-11.
35. GIMÉNEZ, L. 2001. Maíz. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 1-76.
36. _____. 2010. Efecto de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. In: Seminario Internacional Potencial de Riego Extensivo de Cultivos y Pasturas (1º, 2010. Paysandú, Uruguay). Actas. Montevideo, Bascana. pp. 29-37.
37. GREGORET, M.C.; DÍAZ ZORITA, M.; DORDANELLI, J.; BONGIOVANNI, R.G. 2011. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. *Precision Agriculture*. 12 (6): 813-849
38. HAUCK, R. D.1981. Nitrogen fertilizer effects in nitrogen cycle processes. In: Clark, F.E.; Roswell, T. eds. *Terrestrial nitrogen cycle*. Stockholm,

Swedish National Science Research Council. pp. 551-562 (Ecological Bulletin no. 33).

39. HERNÁNDEZ, J. J.; OSORES, J. I. 2007. Efecto del manejo del barbecho invernal sobre los requerimientos de nitrógeno de maíz sembrado en sistemas de agricultura continua en siembra directa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 82 p.
40. HOFFMAN, E.; SIRI, G.; ERNST, O. 1996. Posibles manejos para minimizar pérdidas de nitrógeno. *Cangüé*. no. 8: 13-16.
41. HURTADO, S.; RESENDE, Á.; SILVA, C.; CORAZZA, E.; SHIRATSUCHI, L. 2011. Clorofilômetro no ajuste da adubacao nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade. *Ciência Rural*. 41(6):1011-1017.
42. ISLA, R.; LÓPEZ-LOZANO, R. 2005. Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz. *Revista de Teledetección*. no. 24: 5-9.
43. MAGDOFF, F.R.; ROSS, D.; AMADON, J. 1984. A soil test for nitrogen availability to corn. *Soil Science Society of America Journal*. 48(6): 1301-1304.
44. MAMANI-PATI, F.; CLAY, D.E.; CARLSON, C.G.; CLAY S.A.; REICKS, G.; KIM, K. 2010. Nitrogen rate, landscape position, and harvesting of corn stover impacts on energy gains and sustainability of corn production systems in south Dakota. *Agronomy Journal*. 102(6): 1535-1541.
45. MELCHIORI, R.J.M.; CAVIGLIA, O.P.; FACCENDINI, N.; BIANCHINI, A.; RAUN, W. 2006a. Evaluación de refertilización nitrogenada basada en la utilización de un sensor óptico. *In: Actualización técnica Maíz. Entre Ríos, INTA*. pp. 33-36 (Serie Extensión no. 41).
46. _____.; _____.; BIANCHINI, A. 2006b. Momentos de fertilización nitrogenada en maíz en el centro oeste de Entre Ríos. *In: Actualización técnica de maíz. Entre Ríos, INTA*. pp. 29-32 (Serie Extensión no. 41).
47. _____.; BARBAGELATA, P.A.; ALBARENQUE, S.M.; FACCENDINI, N. 2007. Momento de aplicación y fuentes de nitrógeno en maíz. *In: Actualización técnica maíz, girasol y sorgo. Paraná, INTA*. pp. 74-79 (Serie de Extensión no. 44)
48. MERONI, G.; DEL PINO, A.; MORI, C.; CERVENŠKY, A.; CASANOVA, O. 2010. Efecto del contenido de agua sobre la mineralización de la

materia orgánica en suelos del sur de Uruguay. In: Reunión Técnica-Dinámica de las Propiedades del Suelo bajo Diferentes Usos y Manejos (2010, Colonia, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, s.e. pp. 1-8.

49. METHOL, M. 2009 Maíz y sorgo; situación y perspectivas. (en línea). Anuario OPYPA 2009: 1-11. Consultado 25 nov. 2011. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/opypa/ANUARIOS/Anuario2009/material/pdf/12.pdf>
50. NOVOA, R.; VILLAGRÁN, N. 2000. Evaluación de un instrumento medidor de clorofila en la determinación de niveles de nitrógeno foliar en maíz. Agricultura Técnica (Chile). 63(1): 166-171.
51. O'NEILL, P. M.; SHANAHAN, J. F.; SCHEPERS, J. S.; CALDWELL, B. 2004. Agronomic responses of corn hybrids from different eras to deficit and adequate level of water and nitrogen. Agronomy Journal. 96(6): 1660-1667.
52. OTEGUI, M.; BONHOME, R. 1998. Grain yield components for different maize genotypes. Agronomy Journal. 87:29-33.
53. PAGANI, A.; ECHEVERRIA, H.; BARBIERI, P.; SAINZ ROZAS, H. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. IPNI. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 39: 14-19.
54. _____.; _____.; SAINZ ROZAS, H. 2009a. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la provincia de Buenos Aires. (en línea). Ciencia de Suelo. 27 (1):21-29. Consultado 19 dic. 2011. Disponible en http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1850-20672009000100003&Ing=es&nrm=iso&tlng=es.
55. _____.; _____.; _____.; 2009b. Respuesta física y económica de maíz a la fertilización nitrogenada y azufrada en Balcarce y 9 de julio (Buenos Aires). IPNI. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 39: 1-7.
56. PALIWAL, R.L.; GRANADOS, G.; LAFITTE, H.R.; VIOLIC, A.D. 2009. El maíz en los trópicos; mejoramiento y producción. (en línea). Roma, Italia, FAO. s.p. Consultado 23 mar. 2011. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/003/X7650S/x7650s00.html>

57. PEDROL, H.; CASTELLARÍN, J.; FERRAGUTI, F.; ROSSO, O. 2008. Respuesta a la fertilización nitrogenada y eficiencia en el uso del agua en el cultivo de maíz según nivel hídrico. IPNI. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 40: 17-20.
58. PERDOMO, C.H.; CIGANDA, V.S.; BORGHI, E.; WORNICOV, G. 1998. Evaluación del test de nitrato en suelo para las condiciones de maíz en Uruguay. In: Reunão Brasileira de Fertilidade de Solo e Nutrição (13°, 1998, s.l.). Trabalhos apresentados. s.n.t. p. 337.
59. _____.; CARDELLINO, G. 2006. Respuesta del maíz a fertilizaciones definidas con diferentes criterios de recomendación. Agrocienca (Montevideo). 10(1): 63-79.
60. _____.; BARBAZÁN, M.; DURAN MONZONI, J. M. 2008. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 1-74
61. _____.; HOFFMAN, E.M. 2011. Manejo de nitrógeno en maíz: actualidad y perspectivas. In: Simposio Nacional de Agricultura (2°, 2011, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 61-75.
62. POZZI JANTALIA, C.; HALVORSON, A. D. 2011. Nitrogen fertilizer effects on irrigated conventional tillage corn yields and soil carbon and nitrogen pools. *Agronomy Journal*. 103(3): 871-878.
63. PUPPO, L. 2002. Evaluación de maíz de cultivares de maíz con riego. In: Inserción del riego por gravedad en los sistemas de producción agropecuaria. Montevideo, Facultad de Agronomía. s.p.
64. REUSSI CALVO, N.; ECHEVERRÍA, H.; SAINZ ROZAS, H. 2008. Comparación de métodos de determinación de nitrógeno y azufre en planta; implicancia del diagnóstico de azufre en trigo. *Ciencia de Suelo (Argentina)*. 26(2): 161-167.
65. RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J. 1982. How a corn plant develops. Ames, Iowa, Iowa State University of Science and Technology. s.p. (Special Report no. 48).
66. SAINZ ROZAS, H.; ECHEVERRIA, H. 1998. Relación entre las lecturas de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Revista de Facultad de Agronomía (La Plata)*. 103(1): 37-44.

67. _____.; _____.; STUDDERT, G. A.; DOMINGUEZ, G. 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agronomy Journal*. 92(6): 1176-1183.
68. SALVAGIOTTI, F.; PEDROL, H.; CASTELLARIN, J. 2002. Diagnostico de la fertilización nitrogenada en maíz. II- relación entre la respuesta en rendimiento y la concentración de N-NO₃ en el suelo en el estadio V4-V6. s.n.t. s.p.
69. _____. 2005. Cuantificación de las pérdidas de nitrógeno por volatilización t su efecto en el rendimiento del cultivo de maíz EEA INTA Oliveros. Convenio INTA Oliveros – Profertil, 2004/05. s.n.t. s.p.
70. SANCHEZ, M.A.; MUÑOZ, S.J. 2008. Fertilización nitrogenada en maíz en el Sudeste de Córdoba. IPNI. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 39: 20-22.
71. SCHARF, P. C.; WIEBOLD, W. J.; LORY, J. A. 2002. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. *Agronomy Journal*. 94(3): 435-441.
72. _____.; KITCHEN, N.R.; SUUDUTH, K.A.; GLENN DAVIS, J.; HUBBARD, V.C.; LORY, J.A. 2005. Nitrogen management; field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agronomy Journal*. 97(2): 452-461.
73. SHUKLA, A.K.; LADHA, J.K.; SINGH, V.K.; DWIVEDI, B.S.; BALASUBRAMANIAN, V.; GUPTA, R.K.; SHARMA, S.K.; SINGH, Y.; PATHAK, H.; PANDEY, P.S.; PADRE, A.T. 2003. Calibrating the leaf color chart for nitrogen management in different genotypes of rice and wheat in a systems perspective. *Agronomy Journal*. 96(6): 1606-1621.
74. SINGH, B.; SINGH, Y.; LADHA, J. K.; BRONSON, K. F.; BALASUBRAMANIAN, V.; SINGH, J. 2002. Chlorophyll meter-and leaf color chart-based nitrogen management for rice and wheat in Northwestern India. *Agronomy Journal*. 94(4): 821-829.
75. STECKER, J.A.; BUCHHOLZ, D.D.; HANSON, R.G.; WOLLENHAUPT, N.C.; MCVAY, K.A. 1993. Broadcast nitrogen sources for no-till continuous corn and corn following soybean. *Agronomy Journal*. 85(4): 893-897.

76. TORRES DUGGAN, M. s.f. Fertilización nitrogenada del cultivo de maíz. (en línea). Pergamino, INTA. s.p. Consultado 18 ene. 2012. Disponible en <http://www.fertilizando.com/articulos/Fertilizacion%20Nitrogenada%20del%20Cultivo%20de%20Maiz.asp>.
77. TORRES MARTIGNIONI, D A. 1996. Tecnologías en cultivos de verano; II. Maíz y sorgo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. pp. 2-28.
78. UHART, S.A.; ANDRADE, F.H. 1995. Nitrogen deficiency in maize; I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Science*. 35: 1376-1383.
79. URUGUAY. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE SUELOS Y FERTILIZANTES. 1979. Carta de reconocimiento de suelos de Uruguay a escala 1:1000000. Montevideo. s.p.
80. _____. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES ESTADÍSTICAS AGROPECUARIAS. 2010. Anuario estadístico agropecuario 2010. Montevideo. pp. 49-60.
81. VARINDERPAL SINGH, Y.; ADVINDER SINGH, T.; AJAY KUMAR, V. 2011. Need-based fertilizer nitrogen management using leaf colour chart in hybrid rice (*Oryza sativa*). *The Indian Journal of Agricultural Sciences*. 81 (12): s.p.
82. WILLIAMS, J.D.; KITCHEN, N.R.; SCARF, P.C.; STEVENS, W.E. 2009. Within-field nitrogen response in corn related to aerial photograph color. *Precision Agriculture*. 11: 291-305.
83. WITT, C.; PASUQUIN, J.M.C.A.; MUTTERS, R.; BURESH, R.J. 2005. New leaf color chart for effective nitrogen management in rice. *Better Crop*. 89: 36-39.
84. YANG, W-H.; PENG, S.; HUANG, J.; SANICO, A. L.; BURESH, R. J.; WITT, C. 2002. Using leaf color charts to estimate leaf nitrogen status of rice. *Agronomy Journal*. 95(1): 212-217.

9. ANEXOS

Cuadro resumen de contrastes en riego

		Rendimiento		Peso de grano		No. de granos .m2		Pl/m2		Espigas /planta		Granos. Espiga	
F de V	gl	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F
Bloque	2	197269,9	0,7989	439,5	0,2473	31830,24	0,8269	0,52	0,291	0,01	0,2251	1319,7	0,4034
Tratamiento	10	4312733	0,0013	571,3	0,0978	323176,61	0,1012	0,15	0,944	0,01	0,1573	2457,88	0,1331
C1	1	14640224	0,0006	390,2	0,2622	1525838,66	0,0068	0,05	0,738	0,1	0,1828	9490,06	0,0166
C2	1	102181,5	0,7353	282,9	0,3376	141720,62	0,3669	0,04	0,744	0,0033	0,3997	99,63	0,7916
C3	1	918068,2	0,3167	207,7	0,4098	37735,70	0,6388	0,07	0,692	0,0017	0,5457	53,6	0,8462
C4	1	195481,5	0,6405	159,1	0,4697	260,96	0,9688	0,01	0,873	0,002	0,5067	901,97	0,4298
C5	1	7701,3	0,9259	7,36	0,8756	195,21	0,973	0,0001	0,953	0,0024	0,4685	352,36	0,62
C6	1	2394785,9	0,1131	642,7	0,1542	369814,19	0,1518	0,18	0,511	0,01	0,0898	5249,18	0,0661
Error	19	868132,3		293		165836,44		0,4		0,0044		1388,86	
CV exp.		10,72		7,1		11,37		7,83		6,86		8,17	

Cuadro resumen de contrastes en secano

		Rendimiento		Peso de grano		No. de granos .m2		Pl/m2		Espigas /planta		Granos. Espiga	
F de V	gl	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F
Bloque	2	2458837,9	0,0024	679,9	0,1357	571570	0,0032	0,28	0,2820	0,07	0,0001	5698,0	0,0027
Tratamiento	10	1271528,6	0,0028	465,7	0,2058	145046,1	0,0955	0,29	0,2547	1,9E-3	0,5997	2380,7	0,0098
C1	1	4278408,1	0,0011	1022,6	0,0832	418092,9	0,0274	0,06	0,8036	1,7E-3	0,3958	7704,7	0,0035
C2	1	2640066,7	0,0072	41,61	0,7169	515445,6	0,0156	0,21	0,6528	0,01	0,0625	7507,8	0,0039
C3	1	138016,7	0,4993	0,03	0,9927	38698,2	0,4775	0,18	0,3673	4,2E-4	0,6726	1651,5	0,1414
C4	1	1941428,2	0,0182	798,1	0,1229	135880,4	0,1901	0,23	0,3072	8,2E-4	0,5550	464,7	0,4262
C5	1	2219660,1	0,0124	83,21	0,6087	381629,8	0,0342	1,2E-3	0,9402	2,1E-3	0,3435	5762,2	0,0097
C6	1	83072,7	0,5993	7,04	0,8812	11648,6	0,6955	8,0E-5	0,9929	3,7E-3	0,2130	157,5	0,6415
Error	19	290973,6		307,5		73853,6		0,21		2,3E-3		704,4	
CV exp.		12,28		7,93		13,48		5,89		5,49		8,86	

Cuadro resumen de contrastes de evolución de lecturas

		SPAD 502				% N en HOJA				LCC			
		Riego		Secano		Riego		Secano		Riego		Secano	
F de V	gl	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F	CM	p>F
Bloque	2	44,16	0,0330	13,31	0,3478	0,13	0,0245	0,02	0,4733	0,02	0,5936	0,23	0,0009
Tratamiento	4	40,31	0,0280	37,85	0,0646	0,43	0,0008	0,09	0,0709	0,06	0,3011	0,07	0,0171
C1	1	136,28	0,0039	46,64	0,0736	1,36	0,0001	0,20	0,0257	0,16	0,0905	0,11	0,0160
C2	1	171,61	0,0021	135,26	0,0080	1,53	0,0001	0,33	0,0080	0,15	0,0988	0,16	0,0059
C3	1	2,71	0,5705	0,04	0,9533	0,10	0,0558	0,00018	0,9372	0,03	0,4183	0,05	0,0810
Error	7	7,65		11,01		0,02		0,03		0,04		0,01	
CV exp.		5,73		7,77		5,77		8,51		5,57		3,31	

Salidas del programa Infostat sobre regresiones de tendencia de lecturas de indicadores en V10

***Regresión lineal de tendencia para SPAD 502 en riego

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
SPAD V10	14	0,58	0,55	15,44	76,52	78,44

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor
const	43,39	1,47	40,19	46,60	29,51	<0,0001
N V6	0,05	0,01	0,02	0,08	4,10	0,0015

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	176,81	1	176,81	16,80	0,0015
N V6	176,81	1	176,81	16,80	0,0015
Error	126,26	12	10,52		
Total	303,07	13			

***Regresión lineal de tendencia para LCC en riego

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
LCC V10	14	0,28	0,22	0,05	-3,63	-1,71

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor
const	3,47	0,08	3,28	3,65	41,27	<0,0001
N V6	1,6E-03	7,3E-04	-1,5E-05	3,2E-03	2,16	0,0518

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
------	----	----	----	---	---------

Modelo.	0,16	1	0,16	4,66	0,0518
N V6	0,16	1	0,16	4,66	0,0518
Error	0,41	12	0,03		
Total	0,57	13			

*****Regresión lineal de tendencia para SPAD 502 en riego.**

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
SPAD V10	15	0,51	0,47	14,21	81,06	83,18

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor
const	38,48	1,42	35,41	41,55	27,12	<0,0001
N V6	0,04	0,01	0,02	0,07	3,67	0,0029

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	135,26	1	135,26	13,44	0,0029
N V6	135,26	1	135,26	13,44	0,0029
Error	130,85	13	10,07		
Total	266,11	14			

*****Regresión lineal de tendencia para LCC en secano**

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
LCCh V10	15	0,20	0,14	0,07	1,66	3,79

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	3,12	0,10	2,91	3,34	31,05	<0,0001	
N V6	1,5E-03	8,2E-04	-3,1E-04	3,2E-03	1,79	0,0975	4,03

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,16	1	0,16	3,19	0,0975

N V6	0,16	1	0,16	3,19	0,0975
Error	0,66	13	0,05		
<u>Total</u>	<u>0,82</u>	<u>14</u>			