

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA TARDÍA (V10-11)
SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ**

por

Mario CAZABAN LOZADA

Daniel Nicolás RUBIO CAT

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2014

Tesis aprobada por:

Director:

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

Ing. Agr. Esteban Hoffman

Ing. Agr. Joaquín Ponce de León

Fecha: 29 de diciembre de 2014

Autores:

Mario Cazaban Lozada

Nicolás Rubio Cat

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias. Por todo.

A todos los docentes y funcionarios que nos dieron una mano, siempre dispuestos y abiertos a nuestras consultas y pedidos de rescate.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL CULTIVO DE MAÍZ Y MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA.....	3
2.2. CARACTERÍSTICAS DEL NITRÓGENO EN SUELO.....	4
2.2.1. <u>Fuente de N para las plantas</u>	5
2.2.2. <u>Formas de pérdida de nitrógeno</u>	5
2.3. REQUERIMIENTOS Y ACUMULACIÓN DE N POR EL CULTIVO DE MAÍZ	7
2.4. RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA.....	10
2.4.1. <u>Respuesta a la fertilización nitrogoenada en interacción con nivel hídrico</u>	12
2.5. IMPORTANCIA DEL MOMENTO DE AGREGADO DE N	15
2.6. MODELOS DE AJUSTE A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ.....	19
2.6.1. <u>Indicadores de N a la siembra</u>	19
2.6.2. <u>Indicadores de N al estado de 6 hojas desarrolladas</u>	21
2.6.2.1. Indicadores de suelo	21
2.6.2.2. Indicadores en planta	23
2.6.2.3. Medidor de clorifila SPAD Minolta 502	26
2.6.2.4. Índice de status nitrogenado Leaf Color Chart (LCC)	28
2.6.2.5. Concentración de N-nitratos en la base de tallos.....	29
2.7. AZUFRE	30

2.7.1.	<u>Función y movilidad</u>	30
2.7.2.	<u>Requerimientos de azufre</u>	30
2.8.	ENTEC.....	33
3.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	34
3.1.	LOCALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS Y MANEJO DEL CULTIVO	34
3.2.	DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	35
3.3.	DETERMINACIONES REALIZADAS	37
3.3.1.	<u>A campo</u>	37
3.3.2.	<u>A laboratorio</u>	37
3.4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	37
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	39
4.1.	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	39
4.2.	RENDIMIENTO EN GRANO Y COMPONENTES.....	42
4.3.	RESPUESTA AL AGREGADO DE N	45
4.3.1.	<u>Componentes del rendimiento según agregado de nitrógeno como urea en V6</u>	48
4.3.2.	<u>Eficiencia de uso del nitrógeno</u>	51
4.4.	MOMENTO DE APLICACIÓN Y RESPUESTA AL NITRÓGENO.....	53
4.5.	EL AZUFRE COMO POTENCIAL LIMITANTE DE LA RESPUESTA AL AGREGADO DE N.....	57
4.6.	INDICADORES DEL ESTATUS NITROGENADO EN V10-11 EN FUNCIÓN DEL N AGREGADO A V6.....	61
4.6.1.	<u>Posibilidad de predecir la respuesta al nitrógeno en V10-11</u>	63
4.6.2.	<u>Relación entre la respuesta al N tardío y los indicadores del estatus nitrogenado a V10-11</u>	65
4.6.3.	<u>Estimación de niveles críticos para los distintos indicadores evaluados</u>	68
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	70
6.	<u>RESUMEN</u>	72

7.	<u>SUMMARY</u>	73
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	74
9.	<u>ANEXOS</u>	84

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Caracterización de los experimentos.....	34
2. Análisis de suelo a la siembra.....	35
3. Fecha y densidades de siembra.....	35
4. Diseño experimental Sitios 1 y 2.....	36
5. Diseño experimental Sitio 3.....	36
6. Componentes de rendimiento para el rendimiento promedio, máximo y mínimo de los 3 sitios experimentales. No están incluidos los tratamientos con azufre.....	43
7. Efecto del agregado de N en V6 sobre los componentes del rendimiento.....	46
8. Efecto del agregado de N al pasar del tratamiento de 100 unidades al de 150 sobre el rendimiento, EUN y la renta marginal.....	52
9. Rendimiento y componentes según respuesta al momento de aplicación de N. Por razones de manejo no fue posible tomar las medidas en V10 de S3.....	55
10. Rendimiento y componentes según respuesta al agregado de azufre junto con 200 UN en V6.....	59
11. Coeficientes de ecuaciones lineales entre dosis de N agregada en V6 y valores de índices del status nitrogenado medidos en V10-11, para los dos sitios en estudio.....	65

Figura No.

1. Ubicación de los sitios experimentales en mapas INIA-GRAS. Precipitaciones acumuladas desde diciembre 2009 a febrero 2010.....	39
2. Precipitaciones mensuales para cada sitio en comparación con precipitaciones históricas promedio para la Estación meteorológica de Mercedes y temperatura diaria para el período en estudio en la misma estación.....	40
3. Precipitaciones por década mensual para los 3 sitios a partir del 1 de setiembre de 2009 y ubicación de los momentos más relevantes del ciclo	

del cultivo (siembra, V6, V11, período crítico (PC) y cosecha. a) Precipitaciones acumuladas (* desde 1 de setiembre al 30 de marzo), sus respectivos eventos desde setiembre a marzo y lluvias en el PC, 1 y 2 corresponden a los 15 días pre floración y post floración respectivamente.....	41
4. Comparación de tratamiento de rendimiento mínimo, máximo y promedio para los 3 sitios evaluados. Están incluidos todos los tratamientos menos los tratamientos con azufre. Líneas en las barras indican desvíos estándar	42
5. Relación entre el rendimiento y sus componentes para los diferentes sitios en estudio y relación entre rendimiento.esp-1 y espigas.m-2.....	44
6. Respuesta al agregado total de nitrógeno como urea a V6 para los sitios 1, 2, 3 y sus respectivas Dosis Óptimas Físicas (DOF) y Dosis Óptimas Económicas (DOE)	47
7. a) Relación entre número de plantas a V6 y número de espigas por metro cuadrado a cosecha para cada sitio b) Relación entre el rendimiento por espiga -1 y número de espigas por planta.....	49
8. Variación de los componentes de rendimiento en función de la dosis de N agregado en V6 para los sitios estudiados.....	50
9. Eficiencia agronómica de uso del nitrógeno (EUN) según sitio y Dosis de N a V6	51
10. 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-V11	54
11. Respuesta al agregado total de nitrógeno como urea según momento de aplicación del fertilizante	57
12. Respuesta al agregado de azufre para los tres sitios. Letras diferentes indican diferencias significativas (p menor a 0.05), a través del contraste entre el tratamiento con 200 UN y el tratamiento con 200UN + 20S (C6)	58
13. Respuesta en grano al agregado de N a V6 y su interacción con el agregado de S cuando se aplican 200 UN en el mismo momento	60

14. Efecto del agregado de N en V6 sobre los diferentes indicadores de status nitrogenado evaluados a V10-11. Valores con diferente letra indican diferencias significativas	61
15. Relación entre el porcentaje de nitrógeno en la hoja opuesta a la espiga en el estadio de V10-11 y la altura de planta para el mismo estadio	63
16. Evolución de las lecturas de SPAD y LCC desde V6 a V10-11 para distintas dosis de N en V6.....	64
17. a) Relación entre el porcentaje de nitrógeno en la hoja opuesta a la mazorca en el estadio de V10-11 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 espiga	66
18. Relación entre los diferentes indicadores del status nitrogenado y altura en V10-V11 y el rendimiento del cultivo.....	67
19. Relación entre valor de tres índices de respuesta a N en V10 y la respuesta en rendimiento de maíz. Los puntos corresponden a las distintas dosis (50,100) agregadas en V10-11 para los 2 sitios en estudio. El nivel crítico fue estimado en base al método gráfico Cate Nelson para valores de rendimiento relativo de 90%. Los índices fueron tomados de la hoja opuesta a la mazorca y son: índice de clorofila SPAD 502, concentración de N y carta de color de hoja LCC	68

1. INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos más importantes por su impacto económico y agronómico en el mundo. Tiene usos muy variados que van desde la alimentación humana y animal a la producción de plásticos y biodiesel. Ocupa el primer lugar en volumen de producción, estimando el USDA un total de 832 millones de toneladas para la zafra 2012/2013 liderado por EEUU con una producción de 274 millones de toneladas (USDA, 2014). El área sembrada del cultivo proyectada para 2013/2014 llega a las 176 millones de hectáreas (USDA, 2014) siendo China el que más área siembra con 35,6 millones de hectáreas. El Rendimiento promedio mundial del cultivo es de 5.446 kgs.ha⁻¹.

En el Uruguay ha existido una fuerte expansión del área del cultivo en los últimos años. La misma se ha casi triplicado, pasando de 38,9 miles de has en la zafra 2002/2003 a 123 mil has en la zafra 2012/2013 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2013). Según datos elaborados por DIEA, la evolución de la productividad en los últimos 20 años (84/85-06/07), el cultivo de maíz ha tenido un crecimiento de 7.2 % anual en producción logrando un incremento de casi 300 % en rendimiento para el período en estudio. De todos modos analizando los datos de rendimiento elaborados por URUGUAY. MGAP. DIEA (2013) la producción total de maíz del Uruguay ha aumentado, principalmente debido al incremento del área de siembra ya que el promedio para el período 2005-2013 se ha estancado prácticamente entre 4000 y 5000 kgs.ha⁻¹, con un promedio de 4522 kgs.ha⁻¹.

Estos bajos rendimientos se pueden explicar por la fuerte sensibilidad del cultivo a las deficiencias hídricas y su alto requerimiento nutricional. De aquí que se hace necesario la aplicación de la mejor tecnología disponible para poder aprovechar los años “buenos” y minimizar las pérdidas de rendimiento en los años “malos”.

Tradicionalmente el manejo de nitrógeno para el cultivo en Uruguay según Perdomo y Hoffman (2011) consiste en agregar a la siembra 130 kgs.ha⁻¹ de 18-46-0 y luego fertilizar con urea en V6 a razón de 90 kgs.ha⁻¹, obteniendo un total de 65 kgs.ha⁻¹ de N. Sin embargo existe gran incertidumbre sobre esta técnica de fertilización, entendiendo que la misma es una simplificación práctica que no logra satisfacer las necesidades tecnológicas actuales. Esta tecnología de fertilización desde el punto de vista ambiental y económico es considerada una simplificación para una situación más compleja en las condiciones de producción de Uruguay, pudiendo la misma ser causa de dosis menores o excesivas de N. De aquí la necesidad de generar información sobre el fraccionamiento de N para nuestras condiciones.

La hipótesis de éste trabajo es que existe respuesta al agregado de N en estadios del cultivo más avanzados y que existen indicadores de estatus nitrogenado de hoja que ayudan a determinar el mismo. Por lo tanto el objetivo de éste estudio es determinar el nivel de respuesta al agregado de N en V10-11 y si existe correlación entre ésta y los indicadores de hoja estudiados.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL CULTIVO DE MAÍZ Y MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

La planta de maíz es muy eficiente en la producción de biomasa, dado que en condiciones de cultivo puede alcanzar en 4-5 meses un peso seco 1.000 veces superior al de la semilla que le dió origen, superando ampliamente en la capacidad de producir biomasa al girasol y la soja (Andrade, citado por Echeverría y Sainz Rozas, 2005). Además, casi la mitad de este peso corresponde a órganos reproductivos, lo que lo transforma en uno de los cultivos de mayor rendimiento por unidad de superficie. Esta alta capacidad de producción es debida a la elevada eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa, al bajo valor energético de la biomasa producida y a una adecuada estructura de cultivo (Echeverría y Sainz Rozas, 2005)

Su alto potencial de crecimiento y alta sensibilidad del rendimiento al estrés, hacen del maíz un cultivo de gran capacidad de respuesta biológica a un manejo adecuado, al riego, a la aplicación de fertilizantes y de insumos en general (Cirilo, 2004).

El cultivo de maíz es muy sensible a situaciones de estrés ambiental o edáfico durante la floración, dado que su principal órgano de interés comercial, la espiga, se encuentra relegada por la dominancia apical ejercida por la panoja. Esta característica, junto con su hábito de crecimiento determinado, le confiere al maíz inestabilidad en el rendimiento frente a situaciones de estrés en floración (Andrade et al., 1996).

El conocimiento de los procesos y mecanismos determinantes del crecimiento y del rendimiento de los cultivos en nuestros ambientes es necesario para aumentar la producción de manera sostenible, ya que nos orienta en la elección de prácticas de manejo más apropiada y brinda información para un manejo más eficiente y adecuado de los insumos (Satorre et al., 2001).

En cuanto a la construcción del rendimiento Otegui et al. (2003), destaca la constancia en el índice de cosecha (proporción total de la biomasa aérea que se encuentra en los granos a madurez fisiológica) de maíz cuando no existen déficit hídricos ni temperaturas de crecimiento bajas. El rendimiento en maíz está más asociado al número final de granos logrados que al peso de los mismos. La generación de estructuras capaces de dar origen a un grano no sería un factor determinante del número final que alcanza la madurez, los autores señalan que para lograr aumentos de

rendimiento es más importante aumentar la supervivencia de dichas estructuras que el número potencial de granos.

El número de granos queda establecido en un período de 30 días centrado en la floración, motivo por el cual se define a ésta etapa como período crítico. Durante el mismo la tasa de crecimiento por planta (TCP) es indicativa de la condición fisiológica de la misma y por lo tanto de su capacidad para fijar granos. Se observa para valores de TCP por debajo de $0,5 \text{ gr.pl}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ aproximadamente no hay fijación, entre ése valor y $4 \text{ gr.pl}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ aproximadamente se generan pequeños aumentos en el NG, mientras que por encima de $4 \text{ gr.pl}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ comienza a definirse la segunda espiga (Otegui et al., 2003).

2.2. CARACTERÍSTICAS DEL NITRÓGENO EN SUELO

Las plantas pueden absorber N como NO_3 o NH_4 . Como en la mayoría de los suelos las condiciones permiten la acción de bacterias nitrificantes, normalmente la mayoría de los cultivos absorben la mayor parte de su N como NO_3 (Perdomo et al., 2008).

La mayor parte del N se encuentra bajo formas orgánicas de distinta labilidad. Desde el punto de vista nutricional las más importantes son las formas del N asociadas al C liviano, las que por mineralización disminuyen cuando un suelo es laboreado intensamente y se recuperan rápidamente cuando el mismo es puesto bajo pastura (Achaval y Ducamp, 1998).

La tasa de caída de las formas orgánicas lábiles de N depende del clima, siendo más acentuada en climas tropicales. Por lo tanto, deficiencias de N son frecuentes en suelos fríos, inundados o arenosos, con prolongada historia agrícola, o se pueden generar por el aporte de gran cantidad de residuos de alta relación C/N (Echeverría y Sainz Rosas, 2005).

Varios estudios concuerdan con que el contenido de N en los 20cm superficiales de los suelos oscila entre 0,02 y 0,4%. La variación de estos valores se da a partir de factores locales como ser clima, vegetación y el material generador del suelo. El 98% de este N se encuentra bajo formas orgánicas en el suelo, el restante 2% es el que estaría disponible para la plantas bajo formas inorgánicas (Rabuffetti, citado por Achaval y Ducamp, 1998).

Es importante destacar que dentro de estos compuestos inorgánicos encontramos al amonio, nitrito y nitrato en la solución del suelo y que como forma gaseosa encontramos al N_2 , N_2O y NO_3 (Perdomo et al., 2008).

2.2.1. Fuente de N para las plantas

La disponibilidad de nitrógeno para un cultivo en un momento dado es el resultado de la interacción de muchos factores.

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. 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, citados por Cerianni e Inella, 2012).

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 de maíz realizados 3 o 4 años después de la etapa de pasturas y de 240 Kg de N ha⁻¹ para cultivos con antecesor pastura.

Perdomo y Hoffman (2011), mencionan que los sitios de mayor potencial de rendimiento también tienen mejores condiciones de “calidad de suelo”, entre ellas superior potencial de mineralización de N. Por tanto, si bien en estos sitios va a haber mayor demanda por mayor rendimiento también va a existir una mayor oferta de N.

2.2.2. Formas de pérdida de nitrógeno

Los mecanismos de pérdidas de N conocidos y cuantitativamente más importantes son: lixiviación, desnitrificación y volatilización.

Como pérdidas del sistema, la volatilización para el caso del maíz es de las más importantes (Stanford, 1973). Éstas pérdidas se incrementan en suelos con alta cantidad de residuos (por mayor concentración de ureasa), temperaturas mayores a 15-18 °C, viento y bajo pH del suelo. McInnes et al. (1986), reportaron que las pérdidas de amoníaco por volatilización son mínimas cuando se aplica urea a suelos secos en superficie y también cuando se producen precipitaciones (mayores a 10 mm) luego de la aplicación. Sin embargo se detectaron pérdidas importantes de N como amoníaco cuando las precipitaciones luego de la aplicación de urea fueron escasas (menores a 10mm).

Ferraris et al. (2009) sostiene que 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. El mismo autor estimó pérdidas para un cultivo de maíz fertilizado con $80 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ por presencia de rastrojo bajo vs. alto para el mes de octubre de 14% y 21% respectivamente, aumentando para el mes de noviembre a 26% y 36%. Concluyó también que al aumentar las dosis de N las pérdidas porcentuales aumentaron debido a la saturación de la capacidad buffer de amonio por la baja materia orgánica del suelo en el experimento (2,53%).

Gasser y Peachey (1964) concluyó que la CIC del suelo fue el factor más importante gobernando las pérdidas de amoniaco desde aplicaciones de urea y sulfato de amonio al suelo, ya que suelos con alta CIC tienen más capacidad de retener el NH_4 en sus sitios de intercambio evitando que el mismo pase al aire.

Hoffman et al., citados por Borghi y Wornicov (1998) también señala que las condiciones que favorecen la rápida hidrólisis y el mejor uso del nitrógeno por parte del cultivo (humedad y temperatura), también son las que maximizan el potencial de pérdidas. Bajo determinadas condiciones se pueden esperar hasta un 70% de pérdidas del nitrógeno agregado.

El factor de manejo que más impacto tiene en determinar el porcentaje de pérdidas del nitrógeno agregado como urea, es la incorporación o no del fertilizante al suelo (Hoffman et al., 1996).

La lixiviación es otra forma de pérdida, entendiéndose como el lavado de NO_3 por el agua de percolación del suelo hacia zonas de no disponibilidad para las raíces. Esto se da con mayor intensidad en suelos de texturas livianas sin horizontes texturales en el perfil del suelo (Perdomo et al., 2008). La Lixiviación aumenta 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 macro poros (Echeverría y Sainz Rozas, 2005), esto solo se da si el suelo está saturado.

Por otro lado la denitrificación es un proceso de reducción biológica, realizado por un número importante de microorganismos anaerobios facultativos. En condiciones anaerobias estos microorganismos toman el NO_3 y el NO_2 en lugar del O_2 como aceptores de electrones, produciendo dos formas gaseosas de N, N_2O (óxido nitroso) y N_2 (N molecular). 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.,

citados por Ceriani e Inella, 2012). El principal factor que controla la magnitud de las pérdidas por desnitrificación es el contenido de humedad del suelo. Varios trabajos realizados indican que las mayores pérdidas ocasionadas por este proceso, se dan en el período entre siembra y V6, alcanzando pérdidas 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, citados por Ceriani e Inella, 2012).

2.3. REQUERIMIENTOS Y ABSORCIÓN DE N POR EL CULTIVO DE MAÍZ

El N juega un rol esencial en el crecimiento vegetal, ya que es constituyente de moléculas como: i) clorofila; ii) aminoácidos esenciales; iii) proteínas; iv) enzimas; v) nucleoproteínas; vi) hormonas; vii) trifosfato de adenosina (ATP). Los contenidos de N expresados en relación a su peso seco total generalmente oscilan entre 1 y 5%, siendo los tejidos jóvenes los que generalmente presentan más concentración del mismo (Perdomo et al., 2008).

La acumulación de N en la planta sigue una curva sigmoide, siendo al principio escasa porque la planta está comenzando a desarrollarse, llegando a una etapa de máxima absorción correspondiente a la etapa de activo crecimiento y luego finalmente se reduce (Perdomo et al., 2008).

Rengel (2004) en Venezuela vio que el N en maíz se acumula progresivamente y en apreciables cantidades en la etapa vegetativa, desde el día 27 al 46 después de la siembra. A su vez observó que durante la etapa de floración prácticamente no existió acumulación entre los días 53 y 66 dds seguida de una etapa de alta acumulación entre los días 76 y 88 dds.

García (2005), sostiene que la adecuada disponibilidad de nutrientes especialmente a partir del momento en que los nutrientes son requeridos en mayores cantidades (a partir de 5-6 hojas desarrolladas) asegura un buen crecimiento foliar y una alta eficiencia de conversión de la radiación interceptada.

Las necesidades nutricionales del cultivo se definen de acuerdo al nivel de rendimiento alcanzado. De acuerdo numerosas referencias nacionales e internacionales, se estima un requerimiento de 22 Kg de N por tonelada producida. Considerando un índice de cosecha de 0.66, la extracción de N sería de 14.5 Kg de N por tonelada de maíz (Satorre et al., 2001).

Stanford (1973), al igual que Morón y Beathgen (1996), Borghi y Wornicov (1998), a través de diferentes ensayos, indican que a medida que aumentó el rendimiento en grano, aumentó el total de N absorbido por el cultivo, determinando que el cultivo requirió 24 Kg de N para producir una tonelada de grano.

La absorción de N durante la floración determina el número de granos, esto estaría explicado por la alta demanda de los embriones luego de la fertilización. Como resultado el número de granos es muy susceptible a la falta de N en comparación con el peso de los mismos (Uhart y Andrade 1995, Below et al., citados por Gallais y Hirel 2004).

Lemcoff y Loomis (1986), Uhart y Andrade (1995), Below et al., citados por Gallais y Hirel (2004) observaron una reducción del rendimiento de 30% comparando entre alta y baja dosis de N. Entre los componentes del rendimiento, el número de granos se redujo un 32% mientras que el peso de granos 9%. Este descenso se da a partir del aborto de los óvulos luego de ser fecundados, ya que la disponibilidad de foto asimilados se ve disminuida por la falta de N. Este déficit afectó el crecimiento post anthesis en un 29%, comparado con un 14 % de reducción que se dio en la etapa vegetativa

Delgado (2002), evaluó el patrón y tasa de acumulación de materia seca (PA de MS y TA de MS) y N de un híbrido de maíz, sembrado bajo 0, 30, 60, 90, 120, y 180 kg N.ha⁻¹, y diferentes contenidos iniciales de N mineral (N-NO₃, y N-NH₄), en un suelo Fluventic Haplustoll del estado Aragua, Venezuela. El patrón de acumulación relativa de MS, contrario a lo observado para N, no se afectó por los diferentes niveles de N disponible. La máxima acumulación relativa de N se prolongó hasta 90 días, acortándose hasta 60 días en los tratamientos 0 y 120 kg N.ha⁻¹, y 75 días en los otros tratamientos. Generalmente las tasas más elevadas de absorción de N y producción de MS ocurrieron a las dosis más elevadas de N y/o de N disponible: 8,7 y 424 kg.ha⁻¹.d⁻¹, respectivamente, para el tratamiento 180 kg N ha⁻¹. La Materia seca total (MST) a 90 días está significativamente correlacionada ($r = 0,97$) con N total absorbido (Nab), y con la razón MST:Nab a los 30 d ($r = -0,92$). Una razón de 18 kg MS.kg N⁻¹ absorbido (6% N en toda la planta) a los 30 d, parece ser el límite por debajo del cual no existe incremento en MSF a los 90 d.

La acumulación de N se anticipa al crecimiento. En condiciones no-limitantes del mismo, la tasa de acumulación de N es máxima en el período que transcurre entre el estadio V₅₋₆ y los 15-20 días después de la floración, alcanzando valores de 3,8 kg N ha⁻¹ día⁻¹. En floración, el cultivo puede acumular entre el 60 y el 70% de los requerimientos

totales, lo que indica que este nutriente debe estar disponible después del estadio de V₅₋₆. Los requerimientos nutricionales de las estructuras reproductivas durante el llenado de granos son satisfechos por absorción de N durante este período y por removilización del mismo desde estructuras vegetativas (Uhart y Andrade, citados por Echeverría y Sainz Rosas, 2005). En este mismo sentido García et al. (2005) en Argentina observó que a floración el cultivo absorbió un 50% del total del N acumulado a madurez fisiológica, viendo también que el patrón de acumulación de N es muy similar al de Materia Seca.

Crawford y Glass, citados por Gallais y Hirel (2004) concuerdan con estudios llevados a cabo por Teyker et al. (1989), en donde se llegó a la conclusión de que en muchas especies de plantas cuando el nitrato es absorbido en exceso, se almacena en las vacuolas y sirve como sustancia osmótica y como fuente mineral de N cuando la absorción desde el suelo se ve deprimida. En definitiva el nitrato acumulado en el pool vacuolar durante etapas vegetativas puede colaborar en etapas posteriores. Se han reportado valores de removilización de N desde las vacuolas al grano de 17 al 53%

Al momento de la madurez, el grano contiene alrededor de 2/3 del N total de la planta. La mitad de ese N en grano, según Hanway (1962) proviene de la translocación desde otras partes de la planta.

Cualquier factor que limite la fotosíntesis durante el llenado, baja la cantidad de energía disponible para la absorción y reducción de N, lo que incrementa la removilización desde partes vegetativas (Andrade et al., citados por Echeverría y Sainz Rosas, 2005). En otros estudios Di Fonzo et al. (1982), Moll et al. (1987) mencionan a su vez que la absorción de nitrógeno post anthesis puede estar relacionado con la senescencia foliar.

Ciampiatti et al. (2012) en Argentina encontraron que la remoción de N en granos incremento a medida que el N se hacía limitante. Asociada a esto observaron una senescencia anticipada del cultivo, debido a que al reducirse el contenido de N en las hojas la actividad fotosintética de las mismas reduce.

Por este motivo sería importante identificar híbridos de maíz que incrementen la longevidad de las hojas, prolongando la capacidad de absorber N. Hoy en día existen híbridos con estas características las cuales le dieron al cultivo un salto importante en rendimiento ya que de alguna manera le brinda al cultivo elasticidad frente a momentos de estrés.

2.4. RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

Según Perdomo et al. (2008) el N es uno de los elementos esenciales para la producción de grano, siendo el elemento que tiene efectos más espectaculares en el crecimiento de la planta.

La respuesta a la fertilización es un proceso complejo, en el que interactúan el cultivo y el medio edafo-climático, y cuya magnitud dependerá tanto de la fertilidad de la chacra, dependiente de la disponibilidad de nutrientes durante el ciclo del cultivo, como del rendimiento potencial que el cultivo pueda lograr, relacionado con la oferta de radiación, temperatura y la disponibilidad del agua (Salvagiotti et al., citados por Sánchez y Muñoz, 2008).

El crecimiento del cultivo de maíz depende de la eficiencia con la que es interceptada la radiación solar incidente y de la eficiencia con que la misma es transformada en materia seca. En situaciones de baja disponibilidad de N el crecimiento del cultivo se resiente debido a una menor intercepción de la radiación incidente, y en menor medida, por la reducción de la fotosíntesis según Uhart y Andrade (1995). Los mismos autores sostienen que en el maíz es más frecuente determinar disminuciones en la eficiencia de intercepción que en la eficiencia de conversión debida a una menor área foliar y a una menor duración de la misma. A su vez, la menor área foliar es consecuencia de un menor tamaño de las hojas y no del número de hojas diferenciadas. Por otro lado Muchow y Davis (1988) sostienen que la expansión foliar es afectada en mayor medida que la fotosíntesis ante deficiencias de N.

El rendimiento del cultivo de maíz está determinado principalmente por dos componentes: el número de granos por unidad de superficie y el peso de granos (Otegui et al., 2003) siendo el primero el de mayor importancia. García (2005) en concordancia con lo anterior observo que el rendimiento del maíz está determinado principalmente por el número de granos logrados por unidad de superficie, el cual es función de la tasa de crecimiento del cultivo alrededor del periodo de floración.

Melchiori et al. (2006) en Argentina reportan que aumento el NG en los tratamientos fertilizados frente al testigo, pero no presento variaciones frente a la dosis ni el momento de aplicación.

Como ya se mencionó, es claro que existe respuesta en rendimiento a la fertilización N, lo que aún está en estudio son los diferentes niveles de respuesta que van a estar determinados fundamentalmente por la oferta de N del suelo y la demanda del

cultivo. Esta demanda varía según el estadio fisiológico en el cuál se encuentre la planta y por ello la importancia del momento en el cuál es agregado el N.

Capurro et al., citados por Ceriani e Inella (2012), en Argentina encontraron respuesta lineal al N en cinco años, 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 ácuicos en el sur de Santa Fe. Resultados similares obtuvieron Salvagiotti et al., Maddonni et al., citados por Otegui et al. (2003), Pedrol et al. (2008), en donde la dosis de N crítica, por encima de la cual no se lograron respuestas significativas fue de 180 kg.ha⁻¹, en estos ensayos todos los componentes de rendimiento evaluados se incrementaron con el agregado de N. Pozzi y Halvorson (2011) en el noreste de Colorado EEUU también obtuvieron respuesta hasta 177KgN.ha⁻¹, valor cercano a los 180 KgN.ha⁻¹ obtenidos en Argentina.

Perdomo y Cardelino (2007) en Uruguay obtuvieron en 3 zafras diferentes un promedio de 2000 Kg.ha⁻¹ más para los tratamientos fertilizados frente al testigo. A su vez las diferencias entre los tratamientos fertilizados fueron pequeñas (cercasas a los 500 Kg.ha⁻¹). Encontraron diferencias en los incrementos de rendimiento por el agregado de fertilizante entre zafras, siendo el incremento para la zafra I de 4113 kg.ha⁻¹ y para las zafras II y III menor a 2000 kg.ha⁻¹.

Borghí y Wornicov (1998) en Uruguay estudiaron la respuesta del rendimiento al agregado de N para 10 sitios, no encontrando respuesta para ninguno de ellos. Esto se explicaría por la falta de precipitaciones para el caso de dos sitios y el alto nivel de nitrato en suelo a V6 para el resto.

Evaluaciones más recientes, también llevadas a cabo en Uruguay sobre un suelo Brunosol Subeutrico Típico pertenecientes a la unidad “Cañada Nieto”, se pudo verificar que existió alta respuesta al N. Las dosis óptimas físicas (DOF) fueron de 123 y 188 U de N en seco y riego respectivamente. La dosis óptimas económicas (DOE) para seco 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. Era de esperarse alta respuesta al agregado de N ya que el nivel de N-NO₃ en suelo fue muy bajo a seis hojas (4 y 6 ppm en seco y riego respectivamente) (Ceriani e Inella, 2012).

Fox et al. (1986), en EEUU obtuvieron respuestas de 24 y 27 Kg de grano.Kg de N agregado⁻¹. Ceriani e Inella (2012), en Uruguay obtuvieron resultados similares con

valores desde 25,3 y 14,1 Kg de grano.Kg de N agregado⁻¹ para maíces bajo riego y secano respectivamente.

Para el estadio de V6 existen diferentes valores críticos por debajo de los cuáles se espera respuesta al agregado de N arrojados por varios ensayos, que van desde 17 a 25 ppm. En la costa atlántica de USA, Sims et al., citados por Achaval y Ducamp (1998), obtuvo respuesta hasta 17 ppm. Por otro lado Fox y Piekielek (1992) en Maryland y Pensilvania obtuvieron valores críticos entre 21 y 22 ppm, mientras que Blackmer y Schepers (1995) obtuvieron entre 20 y 25 ppm en la zona de Iowa.

En estudios llevados a cabo en Uruguay por medio de Achaval y Ducamp (1998) sobre Brunosoles éutricos típicos para la zafra 1996-1997, la respuesta a la fertilización nitrogenada varió entre chacras. Chacras con un contenido de N-NO₃ en suelo a V6 de 22 ppm tuvieron respuesta en producción de grano a la fertilización nitrogenada, mientras que en chacras diferentes existieron tratamientos en donde con un nivel de 19.5 ppm de N-NO₃ no se vió respuesta. Según los autores esto se debió posiblemente a limitantes para el cultivo a nivel de propiedades físicas y/o a una buena capacidad de aporte de N por parte del suelo.

2.4.1. Respuesta a la fertilización nitrogenada en función del nivel hídrico

Existen varios trabajos en diferentes suelos, climas y regiones que arrojan resultados similares. Gran parte de estos estudios se llevaron a cabo bajo condiciones de riego, en donde también se estudió la interacción que existe entre la fertilización N y el nivel hídrico.

Andrade et al. (2000a) sostienen que el maíz tiene un elevado requerimiento de agua (alrededor de los 600 mm) y alta sensibilidad al estrés hídrico, particularmente durante el período crítico (PC) que comprende aproximadamente 15 días antes a 20 días después de la floración, por ello este cultivo se adapta bien a ambientes con precipitaciones durante el ciclo del cultivo superiores a 250 mm.

Giménez (2012) estudiando el rendimiento cuando se aplican estrés hídricos en diferentes etapas del cultivo, determinó que el mayor rendimiento se obtenía en nuestro país con densidades de 100.000 pl.ha⁻¹, llegando a rendimientos de entre 13,5 a 15,3 t.ha⁻¹. Una caída del 60% en el consumo de agua durante el período crítico puede reducir el rendimiento en un 60%, lo que demuestra la alta sensibilidad del maíz al estrés hídrico.

La sequía durante el período vegetativo puede afectar el rendimiento al disminuir el IAF si el cultivo no se recupera y alcanza un óptimo estado fisiológico durante el PC.

Sequías puntuales durante la floración pueden reducir el rendimiento por una menor eficiencia de conversión de la radiación interceptada en materia seca y por una reducción en el número de granos por efectos directos de la sequía. Sequías durante el llenado de granos reducen el rendimiento a través de una disminución del peso de los mismos por una menor duración del área foliar y eficiencia de conversión, aunque la ocurrencia de sequía durante este estadio no deprime severamente el rendimiento (Andrade et al., 2000b).

Ensayos realizados por Prosser et al., citados por Andrade et al. (1996) determinaron que un período de 2 días de estrés hídrico en plena floración redujo 22% el rendimiento en maíz, y con 8 días la reducción fue de 50%. Al mismo tiempo para Shipley et al. (1977) en Etter, Texas, la reducción fue de 39%. Para Prosser et al., citados por Andrade et al. (1996) el estrés aplicado después de la floración redujo el rendimiento 21%. La disminución por día del rendimiento al aplicar estrés hídrico en llenado de grano fue de 1,2%/día. Mientras que para Shipley et al. (1977) con un estrés hídrico de 14 días antes y 14 días después de floración el rendimiento se redujo en 17%. Eck (1984) dedujo que el mayor efecto del N para incrementar los rendimientos en maíz, se dió a partir del aumento en el número de granos. El estrés hídrico durante el período vegetativo redujo el rendimiento a través de la disminución del número de granos, a su vez mismo estrés aplicado durante el llenado afectó el peso de granos. Lo mismo aplicado en floración, mostró una disminución en número y peso de granos. Esto es bastante lógico ya que el número de granos se define en la etapa vegetativa y en la etapa de llenado el mismo ya está definido.

Con respecto a los requerimientos hídricos del cultivo de maíz, con adecuado manejo (densidades, fertilización, fechas de siembra) es factible alcanzar eficiencias en la producción de materia seca aérea de 20 kg.mm⁻¹ de agua consumida en suelos degradados y hasta 40 kg.mm⁻¹ en ambientes de alta productividad (Pedrol et al., 2008). Por otro lado Otegui et al. (2003), determinó respuestas de alrededor de 20 kg de grano.mm⁻¹ de agua consumida durante el periodo crítico valores que pueden llegar hasta 40 kg de grano.mm⁻¹ de agua consumida según el grado de estrés hídrico (Andrade et al., 2000b).

La falta de agua afecta tanto la demanda de nutrientes por el cultivo como la oferta de los mismos 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, seguida por buena disponibilidad hídrica durante la floración, reducen en

mayor medida la oferta que la demanda de N y S 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, reduce más la demanda que la oferta, por lo que la respuesta a la fertilización disminuye (Echeverría y Sainz Rosas, 2005).

Por otra parte, para igual cantidad de precipitaciones, la distribución de las mismas durante el ciclo de los cultivos puede afectar diferencialmente la disponibilidad de los nutrientes como consecuencia de los ciclos de humedecimiento y secado del horizonte superficial del suelo. Por ejemplo, lluvias poco frecuentes y de alta intensidad producirán menor mineralización de N y S, por secado del horizonte superficial, donde se encuentra la mayor cantidad de dichos nutrientes y raíces, respecto de lluvias más frecuentes. Inclusive, precipitaciones de alta intensidad disminuyen la disponibilidad de nutrientes para los cultivos al favorecer los mecanismos de pérdida de los mismos (Echeverría y Sainz Rosas, 2005).

Andrade et al. (2000b) sostienen que las precipitaciones son un factor clave a tener en cuenta en el cultivo de maíz, ya que existe una alta relación entre la disponibilidad de agua durante el cultivo y la respuesta a la fertilización.

Eck (1984) en Bushland Texas, realizó ensayos en los cuales determinó la respuesta en rendimiento variando el momento y la intensidad del estrés hídrico en interacción con la fertilización nitrogenada. Los resultados indican que no existió efecto negativo de fertilizar en condiciones de estrés hídrico aunque el efecto de fertilizar no reduce las pérdidas por el déficit. En estrés hídrico el N interactúa positivamente con el rendimiento, pero en menor medida que con buena disponibilidad hídrica. Este estudio contradice algunas teorías que llevan a algunos productores a fertilizar con bajas dosis en V6 por temor a un posible déficit hídrico.

De todas formas, en otros estudios, Bauer y Carter (1986) demostraron descenso en el rendimiento de materia seca de maíz con fertilizaciones de 200 kgs N/há en secano. Esto demuestra que hay que tener en cuenta el nivel de fertilización y el nivel de déficit hídrico.

Para Burman et al. (1962) 70 kgs N.ha⁻¹ fueron suficientes para el máximo rendimiento en secano, mientras que se obtuvo una respuesta adicional con 140 kgs N.ha⁻¹ en tratamientos con mayor humedad. Russell et al., citados por Gallais y Hirel (2004) en Nebraska encontró que con 150 kgs N.ha⁻¹ se obtenía el máximo rendimiento en todos los tratamientos con riego.

Pedrol et al. (2008) en Santa Fe Argentina, sobre un suelo Argiudol típico de mediana a baja fertilidad encontraron diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento promedio y sus componentes según nivel hídrico. No encontraron interacción nivel hídrico x dosis de nitrógeno en ninguna de las variables analizadas, sin embargo las diferentes dosis de N evaluadas generaron aumentos de rendimientos similares tanto en seco como riego. Esto que indica que los diferentes niveles de N afectaron el rendimiento y sus componentes de manera similar bajo riego y en seco. Cuando se analizó la eficiencia de uso del agua (EUA) para cada dosis de N y entre seco y riego se observó que fueron la misma (15,5 Kg de grano.mm⁻¹). Se observó que la eficiencia del uso de N para seco y riego en promedio fue de 21,6 y 31,1 kg de grano.kg de N⁻¹. Lográndose las mayores eficiencias en seco con dosis de 120, 180 y 240 kg.ha⁻¹ de N, en cambio bajo riego se lograron con las dosis de 180 y 240 kg.ha⁻¹ de N.

Ceriani e Inella (2012) en Uruguay encontraron una interacción positiva entre el riego y el agregado de N, obteniéndose datos de eficiencia en el uso del N para los tratamientos con riego de 20 kg de grano.kg de N⁻¹ frente a 10 kg de grano.kg de N⁻¹ en seco. Para alcanzar los máximos rendimientos en seco necesitaron de 123 kg de N, mientras que en riego fueron necesarios 188 kg de N, obteniendo rendimientos máximos promedios de 6132 y 10727 kg.ha⁻¹ en seco y riego respectivamente.

2.5. IMPORTANCIA DEL MOMENTO DE AGREGADO DE N

El fraccionamiento del N busca hacer coincidir la fertilización con los momentos de mayor demanda de este nutriente. En el estadio V6 (seis hojas completamente desarrolladas) se inicia la diferenciación del primordio de la espiga y el tallo comienza su mayor elongación (Otegui y Bonhome, 1998). En V10 (10 hojas completamente desarrolladas) el primordio de la mazorca define el número de hileras por mazorca y el número de granos por hilera, la planta comienza un rápido y sostenido incremento en el consumo de nutrientes y acumulación de MS (García y Espinosa, 2009). Todos los cultivos tienen una etapa de ontogénica particularmente sensible a restricciones impuestas por el ambiente y/o factores bióticos, conocida como periodo crítico (García, 2005). Andrade et al. (1996) sostienen que el periodo crítico para la definición del rendimiento en maíz abarca aproximadamente un mes centrado en la floración femenina.

Evitar el uso de altas cantidades de N a la siembra, podría contribuir a reducir el potencial de pérdidas de NO₃ por lixiviación y desnitrificación aplicando N una vez que el cultivo está preparado para tomarlo. La absorción del N por el maíz es mínima hasta

los 35 días después de la emergencia, por eso según Beegle y Durst (2003), del 50 al 90% del N requerido debería aplicarse cuando el maíz esta entre V3 y V6.

Existen varias razones que justificarían diferir y fraccionar el momento de fertilización de maíz hacia estadios más avanzados luego de la siembra, suponiendo ventajas en: (i) diferir trabajos de la muy atareada época de siembra, (ii) evitar las continuas condiciones húmedas del suelo durante la primavera, evitar pérdidas de N en caso que ocurran fuertes precipitaciones y (iii) poder utilizar herramientas de diagnóstico confiables en estadios posteriores (Scharf et al., 2002).

Gudelj et al., citados por Ferraris et al. (2009), observaron respuestas similares entre aplicaciones a la siembra y en V6 cuando las precipitaciones en este período fueron de poca intensidad, las ventajas para las aplicaciones diferidas se presentaron cuando las lluvias ocurridas predispusieron a la lixiviación de nitratos del perfil.

Son muy variables los resultados que se pueden observar con respecto a los rendimientos obtenidos con aplicaciones de N a la siembra frente a fertilizaciones en postemergencia. En muchos casos no existen diferencias significativas (Jokela y Randall 1989, Roth et al. 1989), en otros casos existen aumentos en producción al aplicar el fertilizante a la siembra (Reeves y Touchton 1986, Bundy et al., citados por Scharf et al. 2002) y en otras ocasiones los resultados dan rendimientos mayores para las fertilizaciones postemergencia (Stecker et al., 1993).

Según García y Espinosa (2009), la dinámica del suelo no permite que aplicaciones tempranas de fertilizantes nitrogenados garanticen la disponibilidad de este nutriente durante todo el ciclo de un cultivo o cuando se da el período de mayor absorción, Según Russell et al., citados por Gallais y Hirel (2004), la tasa máxima de absorción de N depende en gran medida del clima, fecha de siembra y momento de aplicación del fertilizante, pero por lo general es máxima entre los estadios de V8 y floración femenina.

Para maíz bajo riego en suelos arenosos, aplicaciones tardías desde V5 y hasta V12, mostraron rendimientos mayores que aplicaciones pre siembra (Bundy et al., citados por Scharf et al., 2002).

Jung et al. (1972) observó sobre maíces con riego, rendimientos equivalentes con una sola aplicación a la siembra, o cuando la misma se hacía entre los estadios de V5 y V12. Cuando demoró la aplicación a estadios posteriores a V12, el rendimiento se vio comprometido.

Resultados similares obtuvieron Scharf et al. (2002) para ensayos realizados con riego sobre suelos más pesados, donde aplazando aplicaciones de N hasta V11 usualmente muestran rendimientos iguales o mayores a aquellos con fertilizaciones tempranas. Observaron también en el mismo ensayo que para fertilizaciones entre V11 y V16 la reducción en rendimiento fue solamente de un 3%, y a su vez difiriendo la fertilización hasta floración la reducción en rendimiento fue de 15%, cosa que los autores concluyeron como agrónomicamente factible.

En contraste Binder et al. (2000), encontró disminuciones en los rendimientos cuando las aplicaciones se realizaron en etapas posteriores a V6 en el primer año y a VT en el segundo.

En resumen a no ser por las evaluaciones realizadas por Jung et al. (1972) o Binder et al. (2000), aplicaciones realizadas en maíz bajo riego en etapas tardías dieron resultados similares o mayores en rendimiento que los realizados en etapas tempranas.

Según Binder et al. (2000), la respuesta potencial de aplicaciones tardías de N está dado principalmente por el bajo rendimiento del testigo sin N. Para su ensayo, cuanto menor fue el nivel de N inicial, la respuesta en rendimiento a la fertilización tardía fue menor. El rendimiento se vió disminuido más de 4 tt.ha⁻¹ cuando el nivel de deficiencia inicial fue máximo (0 kg de N.ha⁻¹) contra una disminución de solamente 1 tt.ha⁻¹ cuando el nivel de deficiencia fue el mínimo (202 kg de N.ha⁻¹).

Estudios llevados a cabo por Binder (2000), Scharf et al. (2002) muestran que existe respuesta a la fertilización nitrogenada en estadios avanzados pero siempre y cuando el grado de deficiencia en estadios anteriores sea bajo. Con respecto a esto, algunos estudios no encontraron evidencias significativas de pérdidas irreversibles en rendimiento cuando las aplicaciones de N se realizaron en estadios avanzados como V11, incluso cuando el estrés N era visible.

Ensayos realizados por Barraco y Díaz Zorita (2005), en los años 2001, 2002 y 2003 en suelos arenosos de la región pampeana muestran que no existieron diferencias significativas entre rendimiento y momento de aplicación del fertilizante. Éstos resultados difieren de los encontrados por Ferrari et al. (2000), en suelos de texturas similares, en los que las aplicaciones a V6 mostraron mayores rendimientos que las realizadas a la siembra. Una causa de esto pudo haber sido la poca lixiviación que existió en el período entre siembra y V6, información que se comprueba en la correlación que existió entre NO₃ en el suelo a la siembra y a V6. Para los resultados obtenidos por Barraco y Díaz Zorita (2005) habría que considerar el efecto año, ya que

en condiciones de elevadas precipitaciones en suelos arenosos es probable que la lixiviación entre siembra y V6 sea de gran importancia.

En cinco ensayos de fertilización nitrogenada en maíz implantados en suelos Arguidoles del área del centro de Buenos Aires y el sur de Santa Fe, Ferraris et al. (2009) no detectaron diferencias significativas entre aplicaciones a la siembra contra aplicaciones en sexta hoja (V6), aún cuando en algunos sitios las precipitaciones alcanzaron 323 mm entre siembra y V6, pero en dos de tres ensayos en suelos Hapludoles detectaron diferencias significativas a favor de la aplicación a V6. Los autores atribuyen éste diferente comportamiento al menor potencial de lixiviación que presentan los Arguidoles por presencia de B textural respecto de los Hapludoles de textura más gruesa.

Echeverría y Sainz Rosas (2005) cuando estudiaron el efecto de déficit de N para diferentes momentos del ciclo hallaron que en V5-V6, IEN (Índice de estrés nitrogenado, relación entre la concentración de N actual y la concentración crítica) de 0,5-0,6 pueden resultar en reducciones de sólo el 10% con respecto al rendimiento máximo. Por el contrario, IEN menores a 0,7-0,8 a los 15 días prefloración producen rendimientos relativos menores a 0,9. La menor sensibilidad del rendimiento al estrés de N en las primeras etapas se explica porque el cultivo tiene oportunidad de recuperarse antes del período crítico.

Ceriani e Inella (2012), estudiando la respuesta en estadios avanzados (V10-V11) en Uruguay compararon la diferencia en rendimiento entre aplicaciones de 100 Kg.ha⁻¹ de N a V6 frente a la misma dosis pero en V10-V11. No se encontraron diferencias significativas en ninguna de las variables analizadas en condiciones de riego para un valor de N-NO₃ a V6 de 4 ppm. En cambio en situaciones de secano sí difirió significativamente, agregando el fertilizante nitrogenado en V6 se obtuvo mayor rendimiento que agregando la misma cantidad en V10, presentando valores de N-NO₃ a V6 de 6 ppm. Concluyeron que estos resultados se podrían explicar porque en condiciones de secano el estrés generado por falta de N hasta estadios 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.

Por otro lado, Perdomo y Hoffman (2011), también en Uruguay encontró que la aplicación de N en V10, tuvieron 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.

2.6. MODELOS DE AJUSTE DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ

Trabajos de Perdomo y Cardellino (2007), muestran que sería posible pensar en predecir la demanda de N en estadios cercanos a V11 (aprox. 4 semanas post-V6) en base a índices de análisis foliar. Estos índices pueden ser tanto la concentración de N en hoja, o índices de verde estimados con SPAD Minolta 502o una escala numérica de color de la hoja relativo a una escala patrón (Leaf color chart), que tienen como principal ventaja, la velocidad, el bajo costo y la facilidad de muestreo.

Los métodos de diagnóstico pretenden predecir la probabilidad de respuesta al N, a partir de la disponibilidad de N en suelo y/o en planta, y el requerimiento previsto para un determinado nivel de rendimiento. Los métodos evaluados en la región para el cultivo de maíz incluyen el balance de N, el análisis de suelo en pre-siembra y al estado de 5-6 hojas de desarrollo del cultivo (V5- 6, Ritchie et al., 1993), el análisis de planta en estadios tempranos y avanzados de desarrollo, y el uso de modelos de simulación y sensores remotos (García, 2005).

Para García (2005), el análisis de suelo es la herramienta básica y fundamental para determinar los niveles de fertilidad de cada lote y diagnosticar las necesidades de nutrientes. Los análisis vegetales permiten integrar los efectos de suelo y del ambiente sobre la nutrición de las plantas ampliando la base de diagnóstico, y son de particular importancia para nutrientes cuya dinámica en suelo es particularmente compleja. La información complementaria utilizada para el diagnóstico de la fertilización incluye las características climáticas de la zona, del suelo y su manejo, y del manejo del cultivo.

En el mismo sentido, Perdomo y Cardellino (2007), sostienen que dentro de los diferentes criterios de fertilización existen aquellos más conservadores que tienden a realizar lo que se denomina “fertilización del cultivo”, basados en la teoría del nivel crítico en base a análisis de suelo, y otros métodos más simplistas tendientes a manejar niveles óptimos con la teoría de “subir y mantener” los niveles de nutrientes. Este último se le denomina “fertilización del suelo” y sería más aplicable a nutrientes inmóviles como el K y el P, no resulta lógico este método para el N ya que se incrementaría el riesgo de pérdidas además de comprometer el retorno económico de la fertilización.

2.6.1. Indicadores de N a la siembra

Para el caso de Uruguay los niveles críticos a la siembra no están muy claros, se mencionan niveles de 13-15 ppm de N-NO₃, pero lo que comúnmente hacen los

productores es una aplicación basal de un fertilizante binario, que básicamente corrige las necesidades de P (Perdomo y Hoffman, 2011).

Según Echeverría y Sainz Rosas (2005), la prueba de nitrato en presiembrado es fundamentalmente una medida del nitrato residual, por lo que resulta de utilidad cuando la lixiviación de nitrato en el período previo a la siembra no es de magnitud y la mineralización en el período posterior a la siembra no es importante.

Echeverría y Sainz Rosas (2005) coinciden con Gambaudo y Fontanetto, citados por Barraco y Díaz Zorita (2005), en que si bien, la determinación del contenido de N-NO₃ en el suelo al momento de la siembra es utilizado frecuentemente como método de diagnóstico en la Región Pampeana, resulta de poca utilidad en condiciones de altas pérdidas de N por lixiviación o de abundante producción por mineralización (Bock et al., citados por Barraco y Díaz Zorita, 2005).

En regiones húmedas, este método de diagnóstico no ha demostrado ser muy sensible dado que una fracción variable del N puede ser perdida antes del comienzo de máxima absorción de N por los cultivos (Hergert, citado por Echeverría y Sainz Rosas, 2005). Además, esta metodología no tiene en cuenta el aporte de N por mineralización, fuente de N que en suelos con elevados contenidos de materia orgánica puede cubrir una fracción considerable de los requerimientos de N del cultivo (Echeverría y Sainz Rosas, 2001). Sin embargo, esta determinación es utilizada en regiones subhúmedas, con bajas precipitaciones durante el invierno o en regiones húmedas con suelos de textura fina y en aquellas en las que el suelo permanece congelado durante el invierno, condiciones que en general determinan una baja lixiviación de NO₃⁻ durante dicha estación y en la primavera temprana (Bundy et al., citados por Echeverría y Sainz Rosas, 2005).

Salvagiotti et al. (2002a), utilizando información de varios ensayos llevados a cabo en la provincia de Santa Fe (Argentina) durante tres años sobre suelos Arguidoles típicos y vérticos, para los primeros 20 cm de profundidad, encontraron umbrales críticos de N disponible en el suelo de 126 Kg/ha de N. Resultados similares encontró Alvarez et al., citados por Echeverría y Sainz Rosas (2005) empleando resultados experimentales de una amplia red de ensayos de la región pampeana, donde determinaron que el ingreso neto del cultivo se maximiza cuando el N disponible en el suelo (suelo más fertilizante) al momento de la siembra totalizan 150 kgNha⁻¹.

No existen equivalentes de fertilizante precisos aunque podemos tomar una base que surge de la información de respuesta y en base al conocimiento de cultivos de invierno y dinámica de N asociada a la respuesta vegetal. En base a esto se definió que

el equivalente fertilizante a la siembra es de 3 Kg de N.ppm⁻¹ por debajo del NC. Para el estado de V5-6 se utiliza de 3 a 5 Kg de N.ppm⁻¹ por debajo del NC (Perdomo et al., 2008).

2.6.2 Indicadores de N al estado de 6 hojas desarrolladas

2.6.2.1. Indicadores de suelo

Para N, se ha utilizado el test de NO₃ de suelo en V6, validado para Argentina (Melchiori et al. 1996, García et al. 1997, Ferrari et al. 2000, Sainz Rozas et al., citados por Perdomo et al. 2008) y Uruguay, donde se estableció un rango crítico de 17 a 19 ppm de N para los primeros 20 cm del suelo (Perdomo et al., 1998).

Según Perdomo y Hoffman (2011), dentro de las distintas metodologías de recomendación de fertilización nitrogenada disponibles en la actualidad, podemos encontrar el diagnóstico del estatus nitrogenado del cultivo basado en la concentración de N-NO₃ en la capa de 0-30 cm de suelo en el estadio de V6 del cultivo (desarrollado en el medio Oeste de EE.UU.) La razón de elegir este momento de muestreo se basa en que es lo suficientemente tarde como para permitir que el suelo exprese su capacidad de mineralizar N en condiciones reales de clima (Meisinger et al., citados por Perdomo y Hoffman, 2011), y lo suficientemente temprano como para que el cultivo responda a la aplicación de N.

La determinación del contenido de nitratos en V6 es una metodología simple y adecuada para el diagnóstico de la necesidad de fertilización, ya que ha mostrado ser confiable en un amplio rango de ambientes productivos. Además, esta metodología constituye un muy buen complemento al método del balance de N a la siembra del lote (Echeverría y Sainz Rosas, 2001).

Estudios llevados a cabo en suelos arenosos de la región pampeana en 4 años consecutivos determinaron niveles críticos de 19 ppm a 20cm de profundidad (no podemos encontrar el autor, es anónimo Maizar, 2006). Sainz Rozas et al. (2000), encontraron concentraciones críticas superiores, entre 24 y 27 ppm en el Sudeste de Buenos Aires. Estas diferencias pueden estar explicadas por la mayor capacidad de respuesta del cultivo en estos suelos de mayor potencial. En el mismo experimento se determinó que fueron necesarios 12.8 kg de N.ha⁻¹ para incrementar 1 mg.Kg⁻¹ de N-NO₃ en el suelo a 0-20 cm de profundidad en el estadio de V6. Estos valores son similares a los reportados por Blackmer y Schepers (1995) en Iowa, EE.UU.

En otros estudios llevados a cabo por Salvagiotti et al. (2002a), en 7 localidades de Santa Fé, Argentina durante cinco campañas sobre Arguidoles Típicos y Vérticos, permitieron definir niveles críticos de 26 ppm de N-NO₃ en los primeros 30 cm de profundidad para lograr un 90% de rendimiento relativo. Este umbral es superior a las 20 ppm encontrado por Ferraris y Couretot (2006) en veinticinco ensayos en el Norte de Buenos Aires, a las 21 ppm encontradas por Melchiori et al. (2006) en Entre Ríos aunque para los primeros 20 cm de profundidad, y a los reportados por García (2005) de 15 ppm en el Sudeste de Buenos Aires.

Sainz Rosas, citado por Salvagiotti et al. (2002b), encontraron una relación lineal entre el rendimiento medio y los umbrales de respuesta al nivel de nitrógeno en suelo en V4-V6, con un incremento en 2 ppm en el umbral de N-NO₃ por cada 1000 Kg de aumento en el rendimiento en grano. García et al., citados por Salvagiotti et al. (2002b), propuso elevar el nivel de 15 a 18 ppm en situaciones de riego, mientras que Ferrari et al. (2000) remarcaron el umbral mayor a 20 ppm para rendimientos superiores a 13000 kg.ha⁻¹.

Binford, citado por Echeverría y Sainz Rosas (2001), trabajando en Iowa en suelos similares a los de la región pampeana sobre suelos con diferentes condiciones de drenaje y concentraciones de N total, reportaron una adecuada correlación entre el rendimiento relativo (RR) y la concentración de N-NO₃ en los primeros 30 cm. La concentración crítica para alcanzar un RR del 95% fue de 25 mg.kg⁻¹, con rendimientos máximos que oscilaron entre 10,4 y 12,6 tt.ha⁻¹. Dichos autores reportaron que la capacidad predictiva del test, evaluada por el valor del R², mejoró notablemente cuando sólo se tuvieron en cuenta los sitios-años con respuesta a N en los cuales el déficit hídrico no limitó el rendimiento, o cuando en los sitios con respuesta sólo se usaron las dosis de N más contrastantes. En el mismo sentido, Bundy y Andraski (1995) reportaron que la capacidad predictiva del test mejoró cuando el mismo se usó en suelos con buena capacidad de retención de agua y sin limitaciones físicas.

Para el caso de Uruguay, 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. El nivel crítico que encontraron, por encima del cuál no existe respuesta a la fertilización N fue de 20 ppm de N-NO₃ en suelo. Cuando aplicaron El modelo “cuadrático más Plateau” que fue el que mejor ajustó en este trabajo, obtuvieron 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.

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

Para Salvagliotti et al. (2002a), los umbrales de respuesta fueron diferentes de acuerdo al potencial de producción de cada ambiente, definido por el rendimiento promedio de cada ensayo. Esto pone de manifiesto la importancia de caracterizar la productividad de cada lote y el uso de diferentes niveles críticos.

Queda de manifiesto, a partir de los resultados encontrados por los diferentes autores en ambientes y años contrastantes, que existe una clara respuesta a la fertilización en el estadio de V6. Sin embargo la variación a la respuesta a la fertilización a V6 que se obtiene en las diferentes evaluaciones, nos llevan a pensar que resulta muy importante caracterizar el ambiente en el cuál se va a desarrollar el cultivo para evitar posibles sobre o sub fertilizaciones nitrogenadas.

Según Perdomo y Hoffman (2011), sumado a estas diferencias en el potencial de producción de cada ambiente, al estadio de V6, existe todavía gran incertidumbre sobre las condiciones de crecimiento futuras del cultivo, que van a determinar el rendimiento y por lo tanto la demanda de N del cultivo. Por consiguiente, para pronosticar la dosis óptima de N en estadios tempranos del cultivo, habría que poder predecir en V6 el rendimiento con buena exactitud.

2.6.2.2. Indicadores en planta

El análisis de planta es una herramienta interesante para evaluar o monitorear la nutrición del cultivo. La gran ventaja respecto del análisis de suelos es que integra los factores de clima y manejo que afectan al cultivo. Para ello se pueden determinar nutrientes en diferentes etapas fenológicas y en diferentes órganos de la planta (planta entera, hoja de la espiga en floración, etc.) y es posible comparar la concentración de nitrógeno con rangos de suficiencia de nutrientes internacionales o de calibración local. También pueden ser empleados índices de verde (mediante clorofilómetros), entre otros.

Todas las herramientas de diagnóstico deberían ser utilizadas en forma sistémica o integral para evaluar cuál de ellas se ajusta mejor a las necesidades técnicas, operativas y económicas de cada sistema de producción, Torres Duggan (s.f.). la fuente está en la bibliografía.

Los análisis de planta entera o de órganos de la planta han sido utilizados como elementos de diagnóstico. Para N, se han reportado rangos críticos de N en planta entera al estado V3-V4 de 3.5-5.0% y de N en hoja de la espiga en floración de 2.75-3.5% (Binford et al., 1992).

Para Wolfe et al., citados por Waskom et al. (1996), el contenido de clorofila en la hoja de maíz se relaciona positivamente con la concentración de N en hoja y por lo tanto refleja el estado nitrogenado del cultivo.

Estos análisis permiten caracterizar la nutrición nitrogenada del cultivo pero al realizarse en estados de desarrollo avanzados, como en el caso del análisis foliar a floración, la metodología no permite corregir el estado nutricional actual del cultivo, aunque es útil para decidir el manejo nutricional de futuros cultivos. En una red de ensayos realizada en la zafra 2000/01 en siete localidades de la región pampeana, Ambrogio et al. (2001) encontraron una concentración crítica de 2.7% de N en hoja de la espiga a floración por arriba de la cual los rendimientos eran superiores a 9000 kg.ha⁻¹, esta concentración se ubicó en el rango considerado crítico por Binford et al. (1992).

Valenzuela y Ariño (2000) en Entre Ríos, utilizaron la metodología DRIS la cual permite identificar desbalances nutricionales. Estos trabajos indican que los índices DRIS identificaron adecuadamente los lotes deficientes en N, aunque en casos de excesos de N no consideraron el consumo de lujo de N, indicando desbalances con otros nutrientes.

Entre los índices de análisis foliar más utilizados en V6, los que han tenido mayor difusión en la región y en el mundo son el clorofila SPAD y una escala numérica de color de la hoja relativo a una escala patrón denominada comúnmente Leaf Color Chart (LCC).

Según Argenta et al. (2001), los medidores de clorofila no son considerados muy adecuados para evaluar el nivel de N en maíz en V5-V6 en la etapa vegetativa. Demostraron que diferencias en la edad fisiológica de la planta puede producir errores en la interpretación de estos medidores en etapas vegetativas iniciales. Binford et al. (1992), determinaron que indicadores del cultivo podrían integrar muchos factores tales

como presencia y disponibilidad del nitrógeno mineral del suelo, el clima y el manejo del cultivo. Por el contrario plantas jóvenes no podrían indicar el estatus nitrogenado durante todo el período del cultivo y tampoco es útil para detectar excesos de nitrógeno. Iversen et al., citados por Salvagiotti et al. (2002a) encontraron una correlación significativa entre rendimiento y la concentración de nitrógeno basal del jugo del tallo, sin embargo Fox et al. (1986) sugirieron que esta técnica es poco confiable para determinar el estatus nitrogenado del cultivo.

Trabajos de Perdomo y Cardellino (2007), muestran que es posible predecir la demanda de N en estadios cercano a V11 (aprox. 4 semanas post-V6) en base a éstos índices de análisis foliar. Los resultados de tres experimentos realizados en las zafra 2005-6 y 2006-7 muestran que tanto la concentración de N, como la lectura de clorofila en hoja (SPAD 502, Minolta) se relacionaron con el status nitrogenado del cultivo de maíz (Perdomo y Cardelino, 2007). Luego de 20 días pos-V6 ya fue posible detectar claramente situaciones de deficiencia de N a través de estos dos indicadores. Además, en la zafra 2006-7 se fertilizó con N, 30 días post V6, y se observó una importante respuesta a este nutriente en las situaciones identificadas como deficientes en base a estos índices.

El LCC fue desarrollado en la Universidad de California y es una herramienta que permite reproducir en forma precisa el color de hojas con distinto grado de deficiencia de N. Según la información internacional disponible, las lecturas de éste índice se relacionan tanto con la concentración de N como con el índice de clorofila de las hojas (Perdomo et al., 2008). Éstos resultados indican que con este monitoreo sería posible corregir deficiencias tardías de N, evitando así pérdidas económicas debido a subfertilizaciones sobretodo en años de alto potencial de rendimiento.

De todas formas la mayoría de la variabilidad de éstos medidores de clorofila en la medición realizadas en hojas más jóvenes que difieren en edad fisiológica, puede deberse a las diferentes propiedades como espesor, posición relativa, etc. (Blackmer y Schepers 1995, Sunderman et al. 1997).

El estudio de las plantas a través de sensores es complejo, porque la reflectancia del dosel no es sólo función de la morfología y fenología de la vegetación, sino también de las características del suelo, la irradiación, el ángulo de observación y las condiciones atmosféricas. Se han desarrollado diversos índices espectrales de vegetación, para maximizar la contribución de esta información y minimizar el efecto de factores exógenos. Estos índices se basan en la premisa de que el comportamiento espectral de la vegetación se correlaciona con características biofísicas de la misma. La

expresión de la señal obtenida como combinación de respuestas en diferentes sectores del espectro (en forma de un cociente, por ejemplo) puede lograr una mejor estimación de los parámetros biofísicos de un cultivo (Echeverría y Sainz Rosas, 2005).

2.6.2.3. Medidor de clorofila SPAD Minolta 502

El SPAD Minolta 502, es muy utilizado y ha sido estudiado durante años principalmente en países como EEUU. Los resultados alcanzados a través de este método son variables, pero en su gran mayoría existe poca correlación entre la medida en estadios tempranos de desarrollo del cultivo y el rendimiento del cultivo. A continuación se intentará dar una idea de las bases fisiológicas que determinan la utilización de estos índices y discutir los diferentes resultados alcanzados en los años de experimentación.

El medidor de clorofila SPAD Minolta 502 mide la trasmittancia de luz de la hoja a 650 y 940 nm. La longitud de onda larga sirve como referencia y tiene en cuenta factores relacionados con el espesor de la hoja y la humedad de la misma, mientras que la trasmittancia a la longitud de onda más corta provee una medida relativa del contenido de clorofila (Blackmer y Schepers, 1995), permitiendo, en consecuencia, evaluar indirectamente y en forma no destructiva el estado nitrogenado del cultivo a través de una rápida lectura in situ. Por lo tanto, esta metodología es considerada también como un índice de la disponibilidad de N en el suelo (Echeverría y Sainz Rosas, 2005).

Según Echeverría y Sainz Rosas (2005) el SPAD Minolta 502, permite medir un “índice de verdor” (IV) que se correlaciona con el contenido de clorofila y N de las hojas. En determinaciones realizadas en el sudeste de Buenos Aires, Sainz Rosas y Echeverría (1998), encontraron que la sensibilidad de las mediciones no fue lo suficientemente elevada al estado de V5-V6 para diferenciar niveles contrastantes de disponibilidad de N. En estadios más avanzados del ciclo (15 días pre-floración, floración y 15 días post-floración), los valores del índice de suficiencia de N ($ISN = IV \text{ Testigo} / IV \text{ fertilizado}$) oscilaron entre 0.97-0.98 para lograr el 95% del rendimiento máximo del cultivo.

Ferrari et al. (2000), en Pergamino, tampoco encontraron relaciones ajustadas entre el índice de verdor en V5-V7 y el rendimiento.

Blackmer y Schepers (1995) bajo riego, estudiaron la habilidad de las lecturas de SPAD como herramienta para determinar deficiencias de N y cuando es el mejor momento para aplicar el fertilizante. Estos autores coinciden con Binford et al. (1992) en

que existe poca correlación entre las deficiencias tempranas (V6) de N y el Rendimiento final en grano. Los factores que pueden explicar este hecho son la dinámica del suelo que se encuentra en constante movimiento sumado al reducido tamaño de la planta en ese estadio. En cambio, los niveles N en estadios avanzados de desarrollo (R4-R5) sí mostraron una alta correlación con el rendimiento.

Waskom et al. (1996), coinciden en que el momento óptimo para utilizar el SPAD es a partir del estado de V11 o en floración. En éste sentido Ceriani e Inella (2012), no encontraron correlación entre el N en hoja y el SPAD para el estadio de V6, sin embargo al estado de V10 encontraron una buena correlación entre los mismos (con un $R^2= 0.58$ en condiciones de riego y $R^2=0.51$ en seco), siempre y cuando no haya niveles de deficiencias hídricas muy grandes.

Schroeder et al. (2000), encontró también que el nivel de nitratos en suelo era mejor indicador que los indicadores de clorofila en los primeros estadios del cultivo. Este autor afirma también que estos medidores de clorofila pueden estar afectados por la ubicación y las condiciones ambientales donde se utilizan además de la reflectancia propia del suelo. Ma et al. (2005) realizaron estudios en Canadá en donde evaluaron diferentes métodos como reflectancia del canopeo y el Minolta SPAD comparado al método de análisis de suelo o de planta en estadios tempranos del cultivo. En este experimento se llegó a la conclusión de que estas herramientas fueron útiles para detectar deficiencias de N en el estado de V6 y además predijeron razonablemente el rendimiento final.

En cultivos de maíz cultivados sin laboreo, el contenido de clorofila varió durante el desarrollo del cultivo y las menores diferencias entre los distintos tratamientos (dosis de N) fueron observadas en V6, mientras que en los estadios más avanzados los distintos tratamientos produjeron diferencias significativas en el contenido de clorofila (Sainz Rozas y Echeverría, 1998). Este comportamiento determinó que se observara una baja relación entre el contenido de clorofila y el rendimiento del maíz en V6, y una elevada relación entre ambas variables 15 días antes de la floración y 15 días después de dicho estadio fenológico. En prefloración y floración los valores del ISN (Índice de suficiencia de N) para la obtención de un 95% del rendimiento máximo oscilaron entre 0,97-0,98 (Sainz Rozas y Echeverría, 1998). En línea con estos resultados, Blackmer y Schepers (1995) reportaron bajas correlaciones entre el rendimiento y las lecturas absolutas del SPAD realizadas en V6. Jemison y Lytle (1996) también informaron un bajo poder de predicción de la respuesta (22%), aun cuando el rendimiento relativo se relacionó con el índice de suficiencia de N en V6.

Ceriani e Inella (2012) encontraron como nivel crítico para asegurar un 90% de rendimiento relativo un valor de IV estimado con el SPAD Minolta 502 de 50 en V10-V11. Por otro lado Argenta et al. (2001) encontraron un nivel crítico de 55 para el mismo estadio del cultivo.

Por lo tanto, a partir de estos antecedentes se deduce que este método tiene un limitado potencial para diagnosticar deficiencias de N en el estadio de V6, siendo el mismo promisorio para monitorear la nutrición nitrogenada del cultivo en estadios posteriores a V6 (Echeverría y Sainz Rosas, 2005).

2.6.2.4. Índice de status nitrogenado Leaf Color Chart (LCC)

El IV mediante Leaf color charts (LCC), ofrece oportunidades sustanciales para productores para estimar la demanda de nitrógeno en tiempo real y para realizar un eficiente uso del fertilizante. Es también una técnica de muestreo rápida y económica. En este sentido, Ceriani e Inella (2012), concluyeron que ésta técnica de muestreo es efectiva solamente en casos en los que no hay deficiencias hídricas que puedan disminuir la actividad fotosintética, ya que la misma se va a traducir en verde menos intenso en las hojas del cultivo. Además concluyeron que esta tabla de colores es solamente efectiva en V10-V11, ya que no existió correlación ninguna entre las mediciones con el estatus nitrogenado del cultivo en V6. A su vez los autores llegaron a concluir que el nivel crítico de LCC a V10 para obtener un 90% de rendimiento relativo ($=\text{rendimiento} \times 100 / \text{rendimiento máximo por tratamiento}$) se situó en 3,75 para maíz bajo riego y 3,6 para secano.

García y Espinosa (2010), en evaluaciones llevadas a cabo en diferentes localidades de Colombia, concluyeron que las lecturas del índice de verdor utilizando LCC en la etapas más susceptibles a estrés por falta de N (V6 a V12) permiten afinar la dosis de N a ser aplicada y consecuentemente incrementa la EAN (Eficiencia de Absorción de nitrógeno). Para los autores, índices de verdor superiores a 4 en el estadio de V6 indican suficiencia de N y valores iguales o superiores a este en el estado vegetativo V12 garantizan rendimientos altos si las condiciones climáticas son adecuadas en los estados reproductivos comprendidos entre R1 y R3, etapas donde se determina el peso final del grano. Usando la TCC de colores se puede ajustar la cantidad de N a aplicarse, si la lectura a V6 es mayor a 4 se debe aplicar la cantidad de N definida y que corresponda al 40% del total de N, lo mismo sucede a V10 si la lectura de la TCC es más de 3.5. Si las lecturas con la TCC son menores a 4.0 en V6 y menos que 3.5 en V10 es aconsejable utilizar un 10% más de la cantidad de N requerida para esa aplicación.

2.6.2.5. Concentración de N-nitratos en la base de tallos

Existen metodologías de diagnóstico que se desarrollaron en otros países que permiten conocer el estado nutricional del cultivo a través de análisis de nitratos en jugo de la base de los tallos de las plantas (JBT) (Iversen et al., citados por Salvagiotti et al., 2002b).

Los resultados obtenidos con concentración de nitratos en savia al estado V4-V6 en el Sur de Santa Fe por González Montaner y Di Napoli, citados por García (2005) indican un nivel crítico de 4500 mg.L^{-1} . Sin embargo, trabajando en el sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires, Ferrari et al. (2000) encontraron un nivel crítico, para alcanzar el 90% del rendimiento máximo del orden de 1439 mg.L^{-1} de NO_3 .

Trabajos realizados en el sudeste de Buenos Aires mostraron niveles críticos variables entre años y ensayos de $1200\text{-}2400 \text{ mg.L}^{-1} \text{ NO}_3$ (Sainz Rozas et al., 2008).

La variabilidad observada en los umbrales críticos ha sido adjudicada a diferencias en la humedad del suelo. Las determinaciones en base seca o en estados avanzados (V12, R3, R6) han demostrado una menor variabilidad (Sainz Rozas et al., 2008).

Cuando el abastecimiento de N es suficiente, los nitratos tienden a acumularse en la base de los tallos al final de la estación de crecimiento. En Balcarce, Sainz Rozas et al. (2008) reportaron un valor de 800 mg.kg^{-1} para el umbral de suficiencia al estado R6, próximo al rango reportado por autores norteamericanos.

Estudios realizados en la provincia de Santa Fe Argentina en la zafra 1997/98 (sin autor), se intentó comparar indicadores edáficos a V6 con aquellos basados en el estado nutricional de la planta como el N del jugo de la base del tallo. El nivel crítico encontrado para el método de JBT (jugo de la base del tallo) fue de 2900 ppm. La respuesta en V6 se ubicó en 78 Kg.ha^{-1} de N. La respuesta a la fertilización fue mejor explicada por la PNPE que por JBT. Se pudo observar que con menos de 51 Kg.ha^{-1} de N- NO_3 (35 ppm N- NO_3) en V4-V6, aumenta la probabilidad de una respuesta positiva a la fertilización. Las concentraciones críticas de N en hoja de la espiga, base del tallo y grano fueron 2.3% de N, 400 mg.kg^{-1} de N- NO_3 y 1.4% de N, respectivamente.

Estas concentraciones son similares a las encontradas por otros autores en el cinturón maicero norteamericano (Cerrato y Blackmer 1990, Binford et al. 1992).

2.7. AZUFRE

2.7.1. Función y movilidad

El S es un constituyente esencial en los aminoácidos (cisteína, metionina y cistina) que están envueltos en la producción de clorofila, en la síntesis de proteínas y en el funcionamiento y estructura de las plantas. También es un constituyente de las coenzimas necesarias para la síntesis de proteínas. El S se encuentra en las hormonas tiamina y biotina que intervienen en el metabolismo de los carbohidratos. También está involucrado en algunas reacciones de óxido-reducción. Es menos móvil que el N en la planta, por lo tanto, la deficiencia de S tiende a presentarse en las hojas jóvenes (Dobermann y Fairhurst, 2000).

2.7.2. Requerimientos de azufre

La dinámica del S en el suelo es muy similar a la de N, en ambos casos la materia orgánica es la principal reserva en el suelo y la disponibilidad de nitratos o sulfatos para las plantas depende de la mineralización de las fracciones orgánicas. En general, las deficiencias de S se observan en situaciones de bajo contenido original de materia orgánica, y en situaciones en las que los niveles de materia orgánica disminuyeron a través de los años debido al laboreo continuo de los suelos (García, 2005).

El azufre es normalmente absorbido por las plantas como ión SO_4 y alcanzan las raíces por difusión masal (Cerveñansky, 2004). La deficiencia de S provoca disminución en la intensidad del color verde de las hojas con una leve clorosis internerval. La clorosis se manifiesta en las hojas superiores o más jóvenes, debido a la menor movilidad de este nutriente con respecto al N. Otros síntomas característicos de la deficiencia de S son el retraso en la senescencia y el menor crecimiento del maíz (Echeverría y Sainz Rozas, 2005).

Generalmente el cultivo de maíz requiere entre 3 y 3,5 Kg.ton de grano⁻¹, disponiendo como fuente de S para la planta de la mineralización del S de la materia orgánica que está en el orden de 1 a 2% y el aporte de lluvias de zonas industriales (Uhart y Andrade, 1995). Por otro lado, para García (2005), el requerimiento es de 4 Kg de S.ton de grano⁻¹ y maneja un índice de cosecha de 0.45.

Según García (2005), en los últimos años se han observado respuestas a la fertilización azufrada en numerosos cultivos (maíz, soja, trigo, canola, alfalfa, pasturas) en la región pampeana, principalmente en el Oeste de Buenos Aires, Este de La Pampa y en la zona Centro-Sur de Santa Fe y Norte de Buenos Aires. En estos sitios las

respuestas al S son más importantes una vez que se han cubierto las deficiencias de los otros nutrientes, principalmente N y P. En la zona Oeste, las respuestas a S se relacionan con el bajo nivel de materia orgánica del suelo (<2-2.5%) y disponibilidad de S, y a los altos rendimientos que se han obtenido en los últimos años (Ventimiglia et al., citados por García, 2005). En la zona Norte, las respuestas se observan en suelos degradados, con muchos años de agricultura continua (especialmente soja), y con cultivos de alta producción con fertilización nitrogenada y fosfatada (González Montaner y Di Napoli, citados por García, 2005).

Las experiencias desarrolladas hasta la fecha no han permitido generar metodologías de diagnóstico confiables para determinar las necesidades de S para maíz y otros cultivos. El análisis de S-sulfatos en suelo a la siembra ha sido evaluado en algunos estudios con resultados dispares. García (2005) en el centro-sur de Santa Fe y sur, respectivamente, estimaron niveles críticos de Sulfatos en suelo a la siembra de 10-12 mg.Kg⁻¹. Sin embargo, no se encontró relación alguna entre respuesta a S y S-sulfatos en suelo en otras experiencias. Por otro lado para Cerveñansky (2004) las concentraciones de 3 a 5 ppm de SO₄ en el suelo o en soluciones nutritivas tienen demostrada adecuación para el crecimiento de muchas especies vegetales.

Por estas razones, actualmente la recomendación de la fertilización azufrada se basa en la caracterización de ambientes deficientes: disminución significativa de materia orgánica, prolongada historia agrícola, adecuado manejo de N y P y manejo en siembra directa, entre otros (García, 2005).

Torres Duggan (s.f.), concuerdan con lo mencionado anteriormente y señalan que en los últimos años se han presentado numerosas evidencias que demuestran aumentos de rendimiento por agregado de azufre como fertilizante. Estas respuestas son más frecuentes con lotes con alto potencial de rendimiento y que presentan respuestas importantes a nitrógeno y fósforo. No se han encontrado correlaciones estrechas entre estas respuestas y los niveles de azufre de sulfatos (S-SO₄) sin embargo es posible inferir mayores posibilidades de respuesta con valores bajos, menores a 5 ppm. Así como con suelos degradados, con baja materia orgánica (MO) y/o baja relación MO/arcillas (indicador de baja proporción de MO joven o recientemente agregada), o con textura gruesa.

Estudios llevados a cabo por Ferraris y Couretot (2006) en INTA Pergamino demostraron que el agregado de N y S permitieron incrementar significativamente los rendimientos del cultivo. El efecto N fue independiente de la dosis y del momento de aplicación. Si bien no determinó interacción NxS estadísticamente significativa, los

resultados del ensayo confirman el efecto muy importante del S como elemento que, a través de un efecto aditivo, permite maximizar la EUN (Eficiencia de utilización de nitrógeno). Esto se visualiza a través del cálculo de la EUN de los tratamientos, donde se observa que N60S0, N60S15 y N120S15 superaron el nivel de indiferencia necesario para alcanzar el costo de fertilización, lo que no sucediera con N120S0.

Capurro et al. (2007) estudiando el efecto del agregado de N y S en maíz en Santa Fe, encontraron respuesta lineal al agregado de N en el rango estudiado (de 0 a 150 N) obteniendo 16 kg de maíz. Kg N⁻¹, mientras que con el agregado de 12 S a la dosis de N, también con respuesta lineal obteniendo 30,6 kg de maíz. Kg N⁻¹. También en la provincia de Santa Fe, Capurro et al. (2007) 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, sí tenían historia previa de fertilización con este nutriente.

Evaluaciones llevadas a cabo en nuestro país por Ceriani e Inella (2012) donde se compararon a dosis bajas (50 UN) fuentes de N y S (Urea-SA y Solmix, sólida y líquida respectivamente) en condiciones de secano y bajo riego, no se encontraron diferencias en el caso de riego, pero sí 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) está muy por debajo del óptimo de respuesta. Por otro lado, evaluaron la respuesta a S a altos niveles de N (200 kg.ha⁻¹ Urea+S). En este caso cuando se comparó Urea y Urea-SA a 200 U de N si existió respuesta al S en condiciones de riego. En el caso de secano, para estas dosis, no se vio un efecto del S ya que la limitante más importante fue la disponibilidad hídrica para la absorción de N. En este trabajo obtuvieron resultados de relación N/S tanto en secano como en riego de 13:1 y 14:1 respectivamente.

2.8. ENTEC

Es un fertilizante nitrogenado con 3-4 dimetilpirazol fosfato (DMPP), compuesto que inhibe la actividad de las nitrosomonas encargadas de la oxidación del

NH₄. La duración de su actividad depende de las diferentes condiciones de temperatura y humedad, permaneciendo activo a pesar de intensas lluvias. Díez-López et al. (2008) estudiaron la lixiviación del N y rendimiento del maíz comparando en el 2004 y 2005 para dosis de 160 y 200 N fuentes con y sin DMPP fertilizados en aproximadamente V₄₋₆. No se registraron diferencias en el rendimiento entre las dos fuentes, pero se vieron diferencias significativas en las pérdidas por lixiviación entre tratamientos manteniendo además mejores niveles de N-NO₃ en suelo durante más tiempo.

Por otro lado Barrena (s.f.) encontró que en suelos francos y franco-arenosos de Río Colorado en Argentina, la fertilización con ENTEC 26 vs. Urea para la misma inversión, resultó mejor el uso de Urea obteniendo mayores rendimientos de grano.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS Y MANEJO DEL CULTIVO

Los experimentos se instalaron en tres chacras comerciales en el departamento de Soriano. El Sitio 1 ubicado en el km 62,5 de la ruta 14, Sitio 2 sobre la Ruta 105, km 23,5, y el Sitio 3 a 10 km de la ruta 2 sobre el km 202. Los tipos de suelos sobre los que se llevó a cabo dicho experimento se muestran en el cuadro abajo.

Cuadro 1. Caracterización de los experimentos

Sitio	Coordenadas	Unidad de suelo	Grupo Coneat	Tipo de Suelo	Materiales Generadores
1	33°15'12,56" Sur 57°26'15,67" Oeste	Bequeló	11,6	Brunosol Éútrico Típico Fr	Sedimentos Limo arcillosos, Fray Bentos
2	33°34'0,51" Sur 58°08'49,27" Oeste	Cañada Nieto	11,7	Brunosol Éútrico Típico Fr, v	Sedimentos areno- arcillosos y limo- arcillosos, Fray Bentos y Libertad
3	33°41'10,25" Sur 57°43'57,61" Oeste	Cuchilla Corralito	10,15	Brunosol Subéútrico Lúvico Ar	Sedimentos Arcillosos y Areno Arcillosos/Areniscas Cretácicas

El cultivo antecesor para todos los casos fue Soja. Para cada chacra existió un manejo diferente, con aplicaciones de diferentes productos y distintas fechas, siendo las tres manejadas sin laboreo. Para los sitios 1 y 2 se hizo un tratamiento de herbicida dos semanas antes de la siembra mientras que para el sitio 3 la misma se hizo con 60 días de anticipación.

Abajo cuadro donde se presentan análisis de suelo a la siembra y fertilización basal para los tres sitios. En el único caso en que se fertilizo con K fue en el sitio 1, a razón de 60 kg.ha⁻¹ de KCl.

Cuadro 2. Análisis de suelo a la siembra, suministrado por los productores de las chacras a donde fueron instalados los sitios experimentales

	MOS	P-P ₂ O ₅	N-NO ₃	S-SO ₄	K _{int}	Fertilización basal	
	%	-----ppm-----			meq.100g de suelo ⁻¹	P-P ₂ O ₅	N-NO ₃
						----- kg.ha ⁻¹ ----	
Sitio 1	4,8	8	9	6	0,74	32	5,6
Sitio 2	4,2	39	-	2	0,66	53,4	20,9
Sitio 3	2,7	11	5	5	0,30	27,6	10,8

Para los tres sitios la siembra fue realizada con sembradoras de precisión con una distancia entre hileras de 0,52 cm.

Cuadro 3. Fecha y densidades de Siembra

	Híbrido	Fecha de siembra	Semillas.ha ⁻¹
Sitio 1	DK 670	24/09/2009	63462
Sitio 2	DK 699	01/10/2009	67600
Sitio 3	NK 900 TD MAX	29/09/2009	72000

3.2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento constó para los Sitios 1 y 2 de bloques completos al azar de 8 tratamientos y 3 repeticiones, los tratamientos variaron en momento y dosis de N y/o S. Mientras que para el sitio 3 el diseño también fue de bloques completos al azar compuesto de 10 tratamientos y 3 repeticiones, variando entre tratamientos la fuente de N y/o S sin poder variar el momento de aplicación ya que se llegó tarde para la fertilización en V10-11. El tamaño de las parcelas fue de 7 m lineales por 2,6 m de ancho (5 surcos).

Cuadro 4. Diseño Experimental sitio 1 y 2

Tratamiento	N a V6	N a V11	S a V6
1	0	0	0
2	50	0	0
3	50	50	0
4	100	0	0
5	0	100	0
6	150	0	0
7	200	0	0
8	200	0	20

Cuadro 5. Diseño experimental sitio 3

Tratamiento	N a V6	N a V11	S a V6
1	0	0	0
2	50	0	0
3	50	50	0
4	100	0	0
5	0	100	0
6	150	0	0
7	200	0	0
8	200	0	20
9	50	0	6,5
10	25	0	3,25

Se estudió entonces el efecto del agregado de diferentes dosis de N aplicado como Urea y el efecto del agregado de S como sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. A su vez se estudió el efecto de agregar todo el N a V6, fraccionar en un 50% a V6 y un 50% a V10-11, agregar la totalidad a V10-11 y fertilizar a V6 con ENTEC 26 como fuente de liberación lenta de N.

Se eligió medir el impacto del agregado de S con la máxima dosis de N, ya que la demanda de S por la planta está relacionada a la disponibilidad para la planta de N. Mientras que para el caso de ENTEC (Tratamientos 9 y 10 del Sitio 3) se eligieron dichas dosis para estimando que las pérdidas por lixiviación de N como Urea iban a ser importantes frente a las que pudiera tener el ENTEC 26.

3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS

3.3.1. A campo

Al momento de la instalación del ensayo en el estadio de V6 se extrajeron muestras de suelo, planta y hoja por bloque, ya que hasta el momento el ensayo había sido manejado de forma homogénea, midiéndose también la población por bloque (plantas.m⁻²). También se realizaron mediciones de Leaf Color Chart (LCC) y de Minolta SPAD 502. Luego de extraídas las muestras se procedió a hacer las fertilizaciones correspondientes por parcela.

En el estadio de V10 se realizaron todas las fertilizaciones correspondientes. A su vez se extrajeron muestras de la décima hoja, realizándose también mediciones de LCC, Minolta SPAD 502 y altura de planta.

A la cosecha se tomaron los 3 surcos centrales de cada parcela, dejando un metro lineal de cada cabecera sin cosechar, arrojando un total cosechado por parcela de 7,8 m². Se midió la población a cosecha y la prolificidad (espigas.planta⁻¹). Se recolectaron todas las espigas para calcular el rendimiento y sus componentes.

3.3.2. En laboratorio

Las muestras de suelo, planta y hoja de campo se secaron y molieron en estufa y molinillo. Luego se determinó la concentración de N-NO₃ a través de la técnica de Kjeldahl.

Las espigas cosechadas se trillaron mecánicamente, determinándose en el mismo momento la humedad del grano cosechado. Se determinó el rendimiento corrigiendo la humedad a 14%, rendimiento.espiga⁻¹, espigas.m⁻² y espigas.planta⁻¹.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Como modelo estadístico se utiliza el Diseño de Bloques Completamente al Azar, con tres repeticiones por bloque:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij}$$

i: 1,2,3,...10

j: 1,2,3

Donde:

Y_{ijk} : es la variable de respuesta.

μ : es la media general.

β_i : es el efecto del i-ésimo bloque.

γ_j : es el efecto del j-ésimo tratamiento de fertilización.

ε_{ij} : es el error experimental.

Supuestos:

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

Se utilizaron contrastes ortogonales como herramienta para hacer las comparaciones abajo detalladas

CONTRASTE	DETERMINACIÓN
C1	Cero vs resto N agregado a V6
C2	Modelo Lineal
C3	Modelo Cuadrático
C4	100 V6 vs (50 V6 - 50 V10) + (0 V6 - 100 V10)
C5	(50 V6 - 50 V10) vs (0 V6 - 100 V10)
C6	200 N V6 vs 200 N V6 + 20 S V6
C7	50 N V6 vs 50 ENTEC V6 (solo para Sitio 3)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El maíz requiere absorber entre 500 a 600 mm de agua durante su ciclo. El máximo requerimiento se da en el período crítico, que se ubica aproximadamente 15 días antes y 20 días después de la floración, que según Andrade et al. (2000b) oscila en los 300 mm.

A comienzos de la primavera de 2009, los pronósticos de la Dirección Nacional de Meteorología auguraban un verano lluvioso, acorde con un fortalecimiento del ENSO-Niño. De acuerdo con esto, la distribución más probable de precipitaciones en la región litoral noroeste del País (cuenca del Río Uruguay) sería de 40% para el tercil superior, 30% para el tercil central y 30% para el tercil inferior” (Dirección Nacional de Meteorología en colaboración con la Universidad de la República).

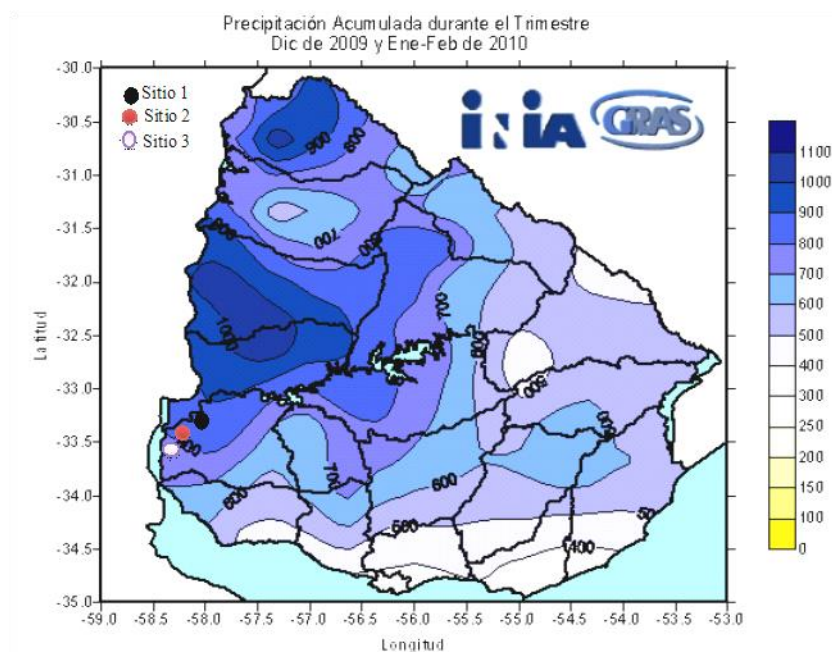


Figura 1. Ubicación de los sitios experimentales en mapas INIA. GRAS. Precipitaciones acumuladas desde diciembre 2009 a febrero 2010.

Las precipitaciones registradas durante el trimestre enero-febrero-marzo en todo el país superaron, en cambio, lo esperable para el trimestre estudiado, registrándose en los sitios donde se ubicaron los ensayos precipitaciones 500 mm por encima de la media histórica (Figura 1).

A continuación se presentan el régimen de precipitaciones en las localidades donde fueron ubicados los 3 sitios, así como la temperatura diaria de influencia para la zafra 2009-2010, de la estación meteorológica de Mercedes. Por la cercanía se decidió utilizar como referencia, las precipitaciones acumuladas (período 1961-1990) de la estación meteorológica de Mercedes ubicada en el Departamento de Soriano.

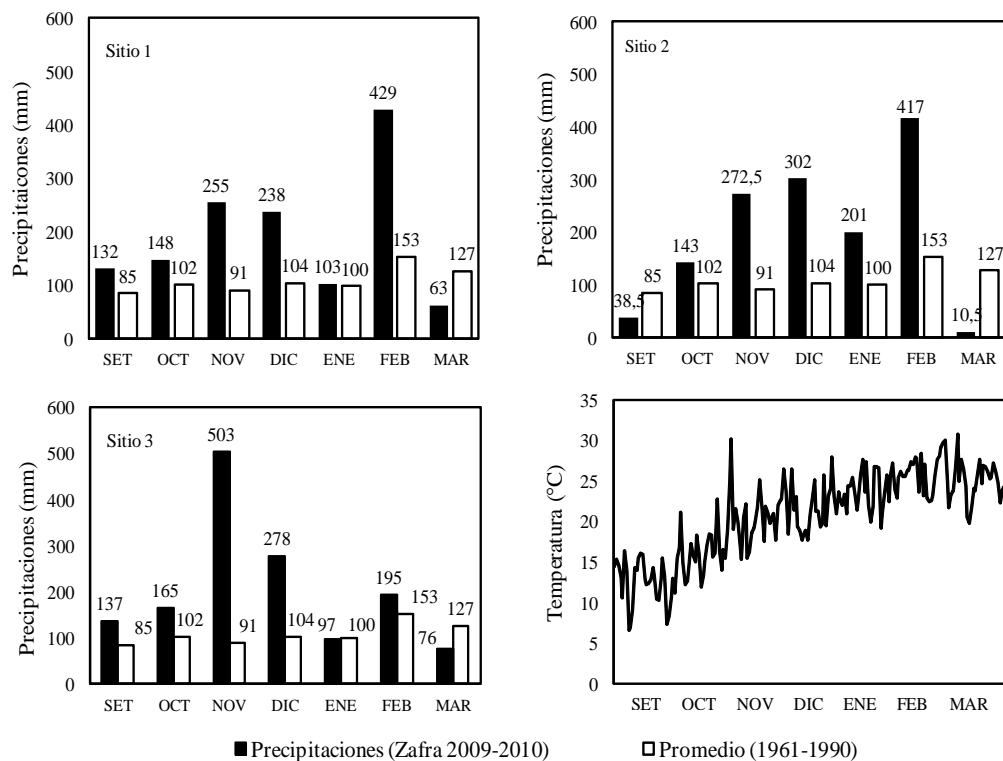


Figura 2. Precipitaciones mensuales para cada sitio en comparación con precipitaciones históricas promedio para la Estación meteorológica de Mercedes y temperatura diaria para el período en estudio en la misma estación.

Las mayores precipitaciones se dieron principalmente en los meses de primavera y verano. A grandes rasgos, el sitio 3 a no ser por el mes de noviembre y diciembre, es el sitio que se acercó más al promedio de precipitaciones históricas analizadas.

En la Figura 2, se presenta en forma detallada los eventos de lluvia y los distintos estadios de los cultivos de maíz para cada sitio experimental. En el total del ciclo (setiembre – marzo) encontramos que para el Sitio 1 (S1) la lluvia acumulada fue de 1368 mm, para el S2 fue de 1451 mm y el S3 1424 mm. Como se puede observar, la distribución de lluvias para todos los sitios no presentó diferencias importantes.

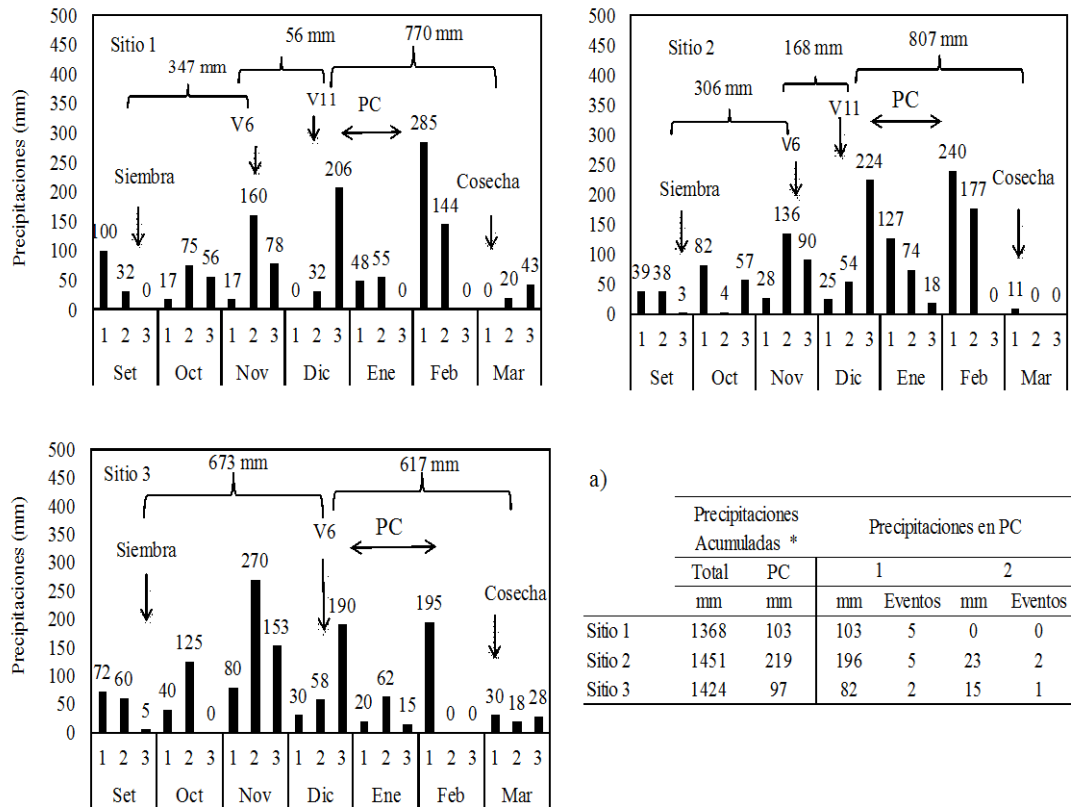


Figura 3. Precipitaciones por década mensual para los 3 sitios a partir del 1 de setiembre de 2009 y ubicación de los momentos más relevantes del ciclo del cultivo (siembra, V6, V11, período crítico (PC) y cosecha. a) Precipitaciones acumuladas (* desde 1 de setiembre al 30 de marzo), sus respectivos eventos desde setiembre a marzo y lluvias en el PC, 1 y 2 corresponden a los 15 días pre floración y post floración respectivamente.

Observando la suma total de precipitaciones para los 3 sitios, se podría concluir en base a la información presentada, que el nivel hídrico para los 3 sitios no fue limitante para el logro de elevados potenciales de rendimiento en grano de un cultivo de maíz, en base los requerimientos hídricos definidos por Andrade et al. (2000b).

No se cuentan con datos de Heliofanía Relativa que podrían ser útiles, considerando que la nubosidad pudo haber influido para la concreción de mayor potencial de Rendimiento y que durante el período de llenado de granos las precipitaciones fueron excesivas en los 3 sitios.

4.2. RENDIMIENTO EN GRANO Y COMPONENTES

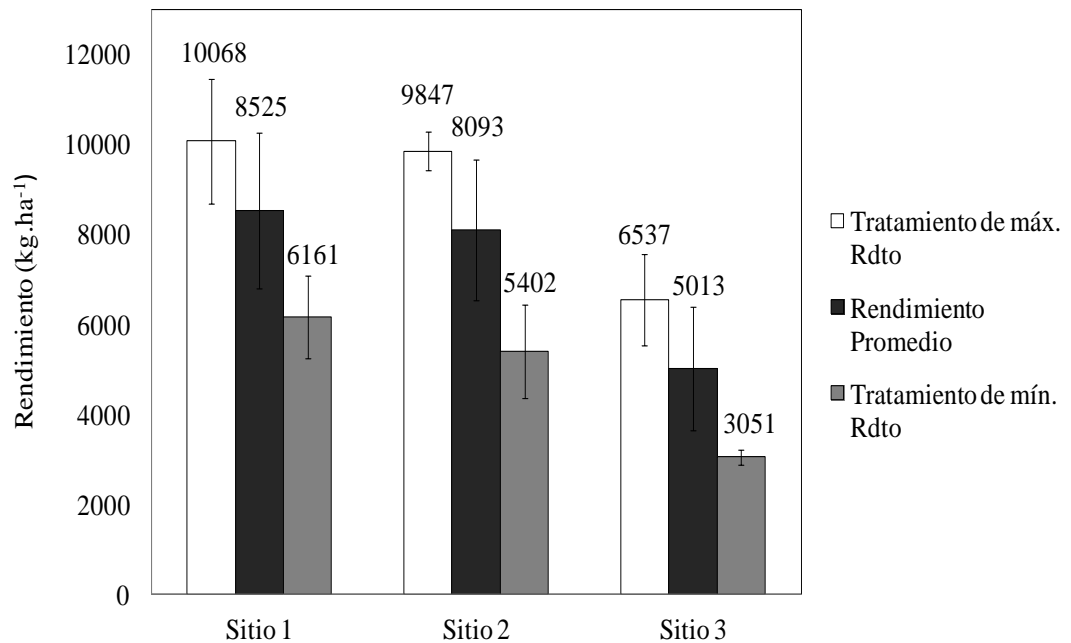


Figura 4. Comparación de tratamiento de rendimiento mínimo, máximo y promedio para los 3 sitios evaluados. Están incluidos todos los tratamientos menos los tratamientos con azufre. Líneas en las barras indican desvíos estándar.

Los rendimientos medios de grano en los distintos sitios oscilaron de medios a altos (Figura 4). Al comparar los resultados obtenidos en los tres sitios, se observó que el mayor rendimiento promedio alcanzado fue de 8525 Kg.ha⁻¹ en S1 valores similares a los alcanzados por Ceriani e Inella (2012) en condiciones bajo riego. Este sitio presentó buenas condiciones edáficas, siendo el suelo un Brunosol Éútrico Típico Franco de unidad Bequeló con valores de materia orgánica del suelo (MOS) cercanas al 5% (Cuadros 1 y 2). Para el caso de S2 ubicado sobre un suelo Brunosol Éútrico Típico Franco de unidad Cañada Nieto los rendimientos también fueron elevados, aunque inferiores al S1, alcanzándose un rendimiento promedio de 8093 Kg.ha⁻¹. Para el caso de S3, desarrollado sobre un Brunosol Subéútrico Lúvico de Unidad Cuchilla Corralito se

obtuvo un rendimiento promedio de 5013 kg.ha⁻¹, en concordancia con los resultados obtenidos por Ceriani e Inella (2012) en condiciones de secano a pesar de las buenas condiciones, los rendimientos se ubicaron por debajo de los máximos rendimientos reportados para Uruguay (15000 Kg.ha⁻¹) alcanzados por Giménez (2012) en condiciones de ensayos bajo riego.

Para los tres sitios las precipitaciones, la población, el híbrido utilizado y el agregado de N fueron similares. El rendimiento en S3 fue marcadamente inferior a los otros dos, siendo que el cultivo se desarrolló sobre un suelo con menor fertilidad natural y más arcilloso, sumado al bajo nivel de MOS. La deficiencia de K y otros factores sin identificar, pueden haber conformado un ambiente restrictivo, aun en presencia de agua y nutrientes no limitantes.

Éstas diferencias en rendimiento también podrían explicarse por la edad de la chacra, donde Perdomo y Hoffman (2011) observaron claras diferencias en rendimiento para chacras con más de 4 años de agricultura continua sin laboreo, en comparación con chacras de 4 años o menos. Éstos resultados sugieren que los factores de suelo asociados a la edad de la chacra habrían sido los responsables de limitar el rendimiento.

Cuadro 6. Componentes de rendimiento para el rendimiento promedio, máximo y mínimo de los 3 sitios experimentales. No están incluidos los tratamientos con azufre.

	Sitio 1			Sitio 2			Sitio 3		
	Prom	Máx *	Mín **	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx	Mín
Rendimiento (kg.ha ⁻¹)	8524	10068	6160	8093	9847	5402	5013	6537	3051
Rendimiento.esp. ⁻¹ (gr)	108,2	114,4	86,9	100,6	103,8	94,6	87	107,7	52,5
Espigas.planta ⁻¹	1,14	1,21	0,97	1,46	1,64	1	1,02	1,08	0,99
Espigas.m ⁻²	7,98	8,8	7,09	8,31	9,49	5,69	5,93	6,11	5,82
plantas.m ⁻²	7	7,3	7,3	5,7	5,8	5,7	5,8	5,7	5,9

*Tratamiento de rendimiento máximo - ** Tratamiento de rendimiento mínimo.

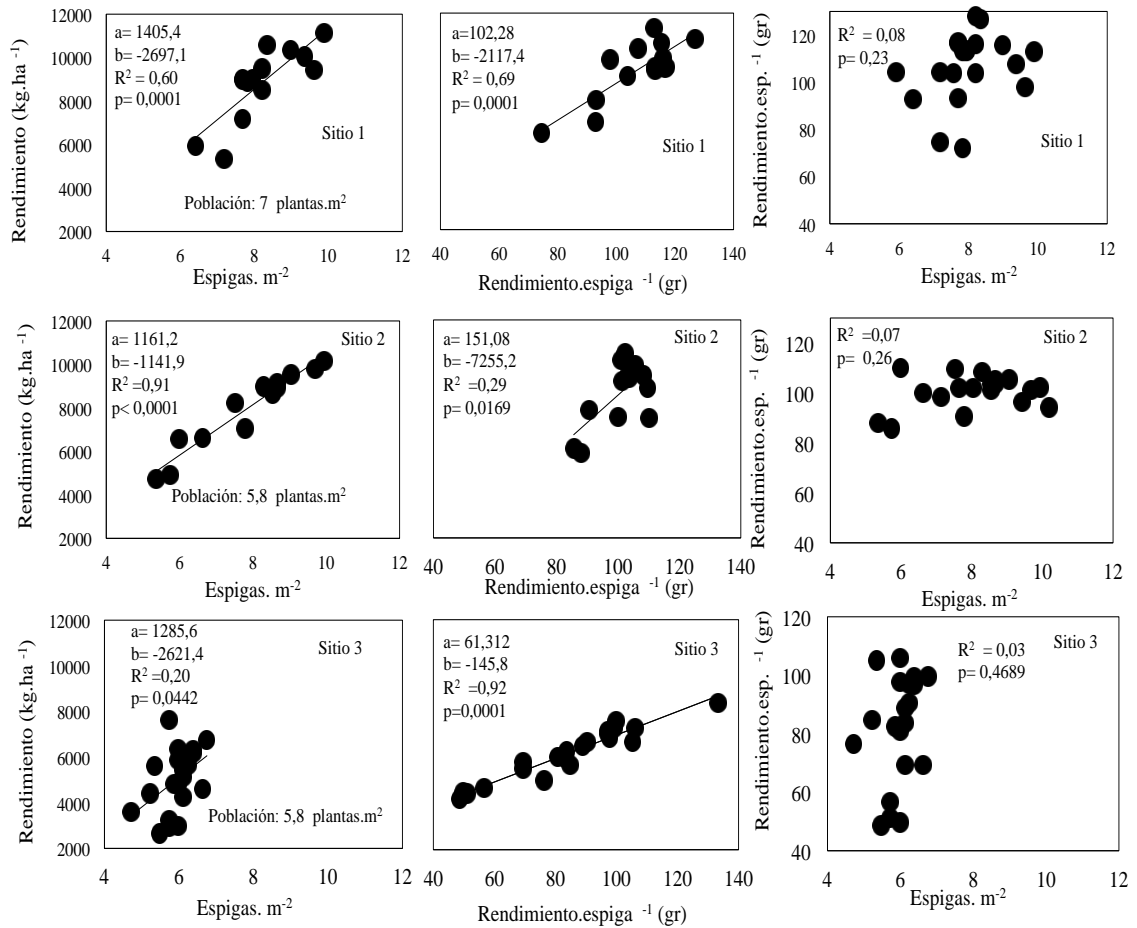


Figura 5. Relación entre el rendimiento y sus componentes para los diferentes sitios en estudio y relación entre rendimiento.esp⁻¹ y espigas.m⁻².

A partir de los datos obtenidos en el Cuadro 6 el rendimiento por espiga en S1 tuvo una variación de 31,6 % entre el tratamiento de rendimiento máximo frente al de mínimo, mientras que para las espigas por planta fue de 24,7%. En S2 estas mismas variaciones fueron de 9,7% y 64% respectivamente. Para S3 el rendimiento por espiga varió 105 % y las espigas por planta un 9%. S3 tuvo una mayor variación en rendimiento por espiga, pero para valores absolutos menores.

Analizando la Figura 5, para el caso de S1 el rendimiento estuvo determinado tanto por las espigas.m⁻² como por el rendimiento.espiga⁻¹. Para S2 el rendimiento se definió principalmente por el número de espigas.m⁻² ($R^2 = 0,91$). En S3 el rendimiento.espiga⁻¹ fue el factor de mayor importancia en determinar el rendimiento,

resultado esperable debido a la menor población a cosecha y menor prolificidad (espigas.planta⁻¹).

En resumen los rendimientos se explican principalmente, en S1 porque la población fue alta y los demás componentes no fueron limitantes, en S2 la prolificidad fue alta pero el número de plantas fue menor que en S1 y por último en S3 todos los componentes del rendimiento fueron inferiores al resto de los sitios estudiados.

En S3, a bajas poblaciones (menor competencia) era esperable una alta tasa de crecimiento por planta en el período crítico, que luego se hubiera traducido en la concreción de un alto rend.espiga⁻¹ y espiga.m⁻² lo cual no ocurrió. Dadas las condiciones edáficas y los niveles de K expuestos anteriormente para cada sitio, es probable que éstas hayan sido las limitantes de la menor tasa de crecimiento para este sitio.

4.3. RESPUESTA AL AGREGADO DE N EN V6

A partir de los rendimientos alcanzados en los diferentes sitios, se analizó la respuesta a los distintos tratamientos evaluados.

Cuadro 7. Efecto del agregado de N en V6 sobre los componentes del Rendimiento.

		*0	50	100	150	200	PROMEDIO CON N	C.V.	PROB. DE *C1
Sitio 1		6161	7674	9579	10068	9492	9203	10,71	<0.0001
Sitio 2	Kg grano.ha ⁻¹	5402	7302	9288	9847	8813	8813	7,23	0,0001
Sitio 3		3374	4929	6062	6537	5890	5855	14,48	0.0001
Sitio 1		7,31	7,56	7,05	7,26	6,84	7,18	8,54	NS
Sitio 2	pl.m ⁻²	5,69	5,56	5,77	5,80	5,14	5,57	4,1	NS
Sitio 3		5,67	5,77	6,33	5,69	5,73	5,88	8,12	NS
Sitio 1		0,97	0,94	1,18	1,21	1,31	1,16	8,23	0,01
Sitio 2	Espigas.pl ⁻¹	1,00	1,32	1,54	1,64	1,67	1,54	4,95	<0,0001
Sitio 3		0,99	1,02	0,99	1,08	1,09	1,05	3,99	0,01
Sitio 1		7,09	6,79	8,33	8,80	8,97	8,22	10,66	0,05
Sitio 2	Espigas.m ⁻²	5,69	7,30	8,87	9,49	8,58	8,56	6,34	<0,0001
Sitio 3		5,61	5,86	6,28	6,11	6,24	6,12	7,03	0,02
Sitio 1		86,9	116,8	114,9	114,4	106,2	113,1	7,24	0,0003
Sitio 2	Rdto.esp ⁻¹	94,6	100,1	104,9	103,8	102,7	102,9	6,95	NS
Sitio 3		60,5	84,8	96,4	107,7	94,3	95,8	8,12	<0,0001

* Dosis de nitrógeno aplicadas al estadio de V6

*C1 es el contraste ortogonal que compara 0N versus Resto (50, 100, 150, 200). Valores DE *P* por debajo de 0.05 indican diferencias significativas.

A través de la Anova, utilizando contrastes (Cuadro 8), se comparó el rendimiento y sus componentes para el agregado de N a V6. El Contraste 1 compara el tratamiento testigo contra el promedio de los tratamientos fertilizados con N a V6. Para todos los sitios existieron diferencias significativas al agregado de N. La respuesta al agregado fue de 3042, 3411 y de 2516 Kg.ha⁻¹ para S1, S2 y S3 respectivamente. Estos valores de respuesta se encuentran por debajo de otros estudios como el de Capurro et al., citados por Ceriani e Inella (2012) en Argentina, donde 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. Por otro lado, Pedrol et al. (2008) obtuvo incrementos de 4500 Kg.ha⁻¹ aproximadamente con dosis de 180 Kg N.ha⁻¹ para ensayos bajo condiciones de secano. Sin embargo, Ceriani e Inella (2012) obtuvieron respuestas a la fertilización inferiores a las obtenidas en los 3 sitios, siendo la

respuesta para el tratamiento en secano de 1335 Kg.ha^{-1} , mientras que bajo condiciones de riego la misma fue de 2516 Kg.ha^{-1} . La mayor respuesta encontrada al agregado de N en los 3 sitios evaluados frente al tratamiento en secano estudiado por Ceriani e Inella (2012), probablemente estuvo asociada a mejores condiciones hídricas. Cabe resaltar que la comparación en nuestro caso fue diferente ya que se comparó testigo vs el promedio de los tratamientos fertilizados y en los otros estudios la diferencia es entre el testigo y el tratamiento de máximo rendimiento.

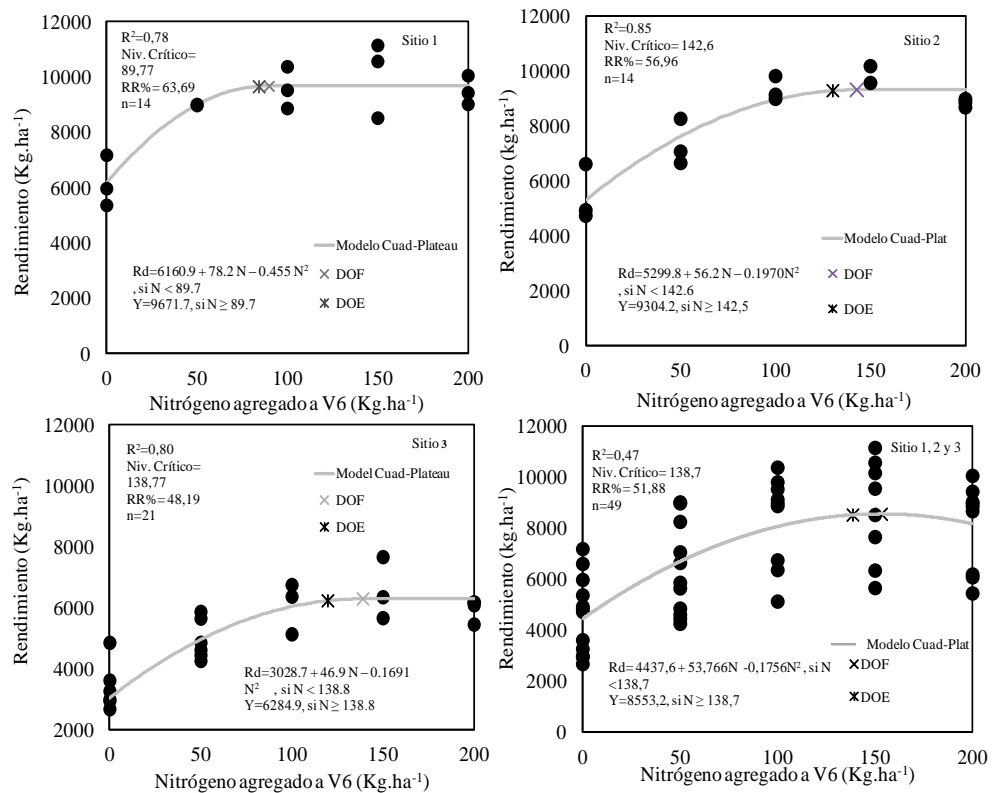


Figura 6. Respuesta al agregado total de nitrógeno como urea a V6 para los sitios 1, 2, 3 y sus respectivas Dosis Óptimas Físicas (DOF) y Dosis Óptimas Económicas (DOE).

Los resultados de los contrastes del Cuadro 8 y demuestran que efectivamente existió respuesta a la fertilización nitrogenada. Como se muestra en la Figura 7, las dosis óptimas físicas (DOF) estimadas de las ecuaciones de respuesta fueron de 90, 143 y 139 UN para S1, S2 y S3 respectivamente. La dosis óptima económica (DOE) fue de 84, 130 y 124 Kg N.ha^{-1} para S1, S2 y S3 respectivamente, calculado en base a un valor del maíz de 263 dólares la tonelada y un costo del N de 600 dólares la tonelada de urea.

Resultados similares encontraron Barraco y Díaz Zorita (2005), donde en los años 2001, 2002 y 2003 encontraron que en condiciones de oferta de N a V6 (suelo + fertilizante) inferiores a 140 kg.ha^{-1} , es conveniente la aplicación de N para maximizar los rendimientos de maíz. Al mismo tiempo los resultados para S2 y S3 estuvieron cercanos a los resultados alcanzados por Ceriani e Inella (2012) en condiciones de secano (20 Kg N.ha^{-1} por encima).

Analizando los valores de N-NO₃ en el suelo a V6, éstos fueron bajos para los tres sitios (3, 3 y 4 ppm para S1, S2 y S3 respectivamente). Los valores estuvieron muy por debajo de los niveles críticos de suficiencia reportados por la bibliografía de 18-20 ppm en secano (Perdomo et al. 1998, Borghi y Wornicov 1998, Sainz Rozas et al. 1999, Salvagiotti et al. 2002a, Perdomo et al., citados por Ceriani e Inella 2012).

Para el caso de S1 si se toma un nivel crítico medio de 19 ppm, el mismo estuvo 16 ppm por debajo. Al ser la DOF de 89.7 Kg.ha^{-1} , se calcula un equivalente fertilizante de 5.6 Kg de N. Para los otros ensayos, tomando los mismos niveles críticos, el equivalente fertilizante sería de 8.9 y 9.5 para S2 y S3 respectivamente.

Como forma de comparar éstos resultados con otros ensayos llevados a cabo en años diferentes sobre suelos similares de Uruguay, Ceriani e Inella (2012) obtuvieron rendimientos para ensayos bajo riego inferiores a los alcanzados en S1, llegando a una DOF de 188 Kg N.ha^{-1} ; 98 Kg N.ha^{-1} por encima de la encontrada en el sitio ya mencionado.

En concordancia con Salvagiotti et al. (2002a), los umbrales de respuesta fueron diferentes de acuerdo al potencial de producción de cada ambiente, definido por el potencial de rendimiento alcanzado. Por lo tanto éstos resultados pueden estar explicados por un efecto del sitio así como por un efecto del híbrido.

4.3.1. Componentes del rendimiento según agregado de nitrógeno como urea en V6

Como muestra el Contraste 1 del Cuadro 8, para el caso de S1 el efecto del agregado de N a V6 actuó principalmente sobre el rendimiento.espiga⁻¹ y espigas.m⁻². En éste sitio existió un buen número de plantas a cosecha, y probablemente la tasa de crecimiento por planta en el período de floración no fue tan elevada como para aumentar el componente Espigas.pl⁻¹, el cual ya era elevado.

En el caso de S2 al tener una menor población, el rendimiento fue compensado por un mayor número de Espigas.pl⁻¹. Según el Cuadro 8 el componente que tuvo mayor significancia para definir el rendimiento según el Contraste 1 fue Espigas.m⁻². Éste

mayor número de espigas pudo llevar a que la tasa de crecimiento del cultivo no alcanzara el nivel suficiente para concretar un mayor rendimiento.espiga⁻¹ (Otegui et al., 2003).

En S3 la población a cosecha fue similar a S2, pero a diferencia de éste no existió compensación por prolificidad. Sin embargo el rendimiento.espiga⁻¹ aumentó compensando la falta de plantas, aunque en menor medida que en S1. Como muestra el Cuadro 8 en S3 el rendimiento.espiga⁻¹ fue el factor de mayor importancia en determinar el rendimiento, resultado esperable debido a la menor población a cosecha y prolificidad asociada. Los probables problemas edáficos y la insuficiencia de K, pudieron ser la base de una limitación al crecimiento durante el periodo crítico, y por tanto la causa de una baja prolificidad.

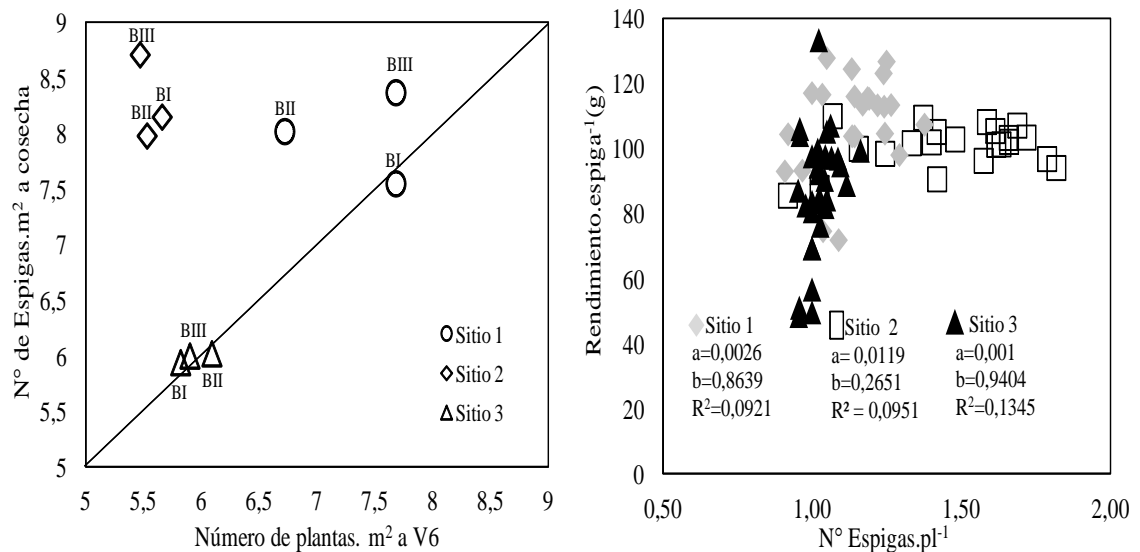


Figura 7. a) Relación entre número de plantas a V6 y número de espigas por metro cuadrado a cosecha para cada sitio b) Relación entre el rendimiento por espiga⁻¹ y número de espigas por planta.

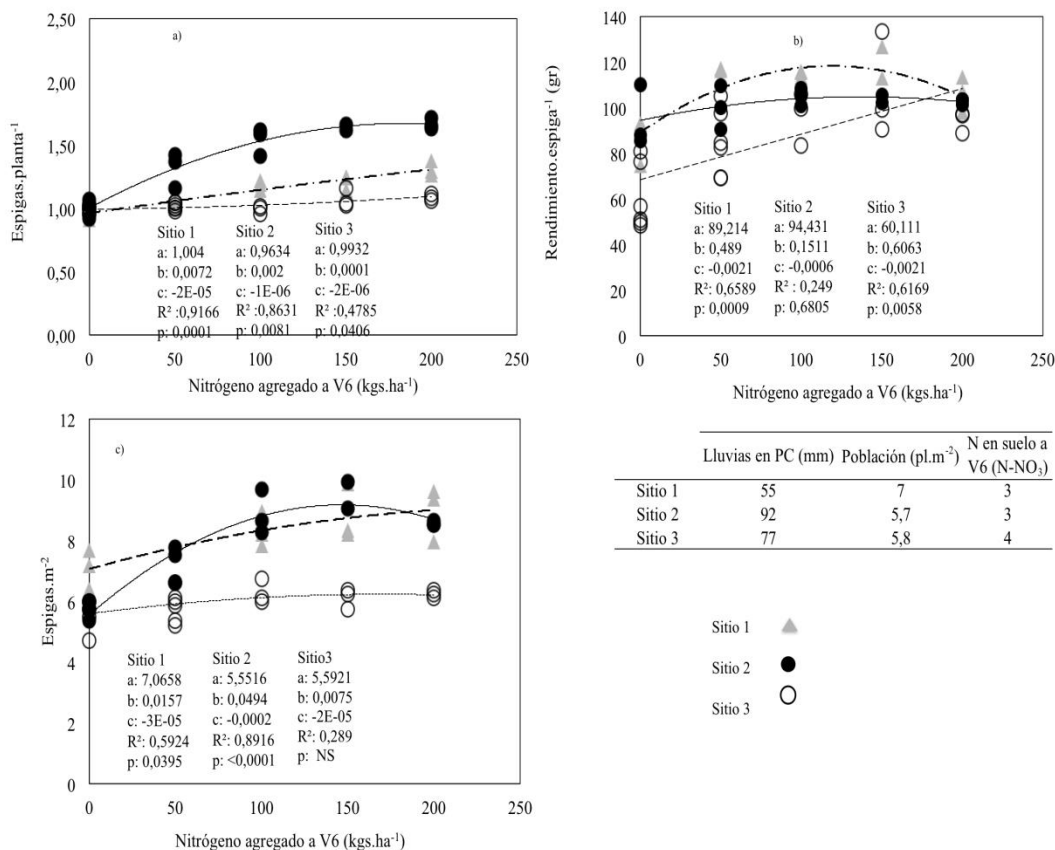


Figura 8. Variación de los componentes de rendimiento en función de la dosis de N agregado en V6 para los sitios estudiados.

Para S1 la fertilización frente al tratamiento testigo logró 0.18 espigas por planta más (16.4%), mientras que para S2 esta diferencia fue de 0.54 (35%) y un $p < 0.0001$. En S3 es probable que el componente espigas.m⁻², haya sido afectado por las limitantes ya mencionadas. El agregado de elevadas dosis de N a V6, provocó aumentos importantes en el rendimiento por espiga, que en definitiva fue el componente asociado con la variación del rendimiento en grano. Se podría pensar entonces, que en ambientes con limitantes de otros nutrientes, altas dosis de N pueden de todas formas provocar incrementos en rendimiento.

4.3.2. Eficiencia de uso del nitrógeno

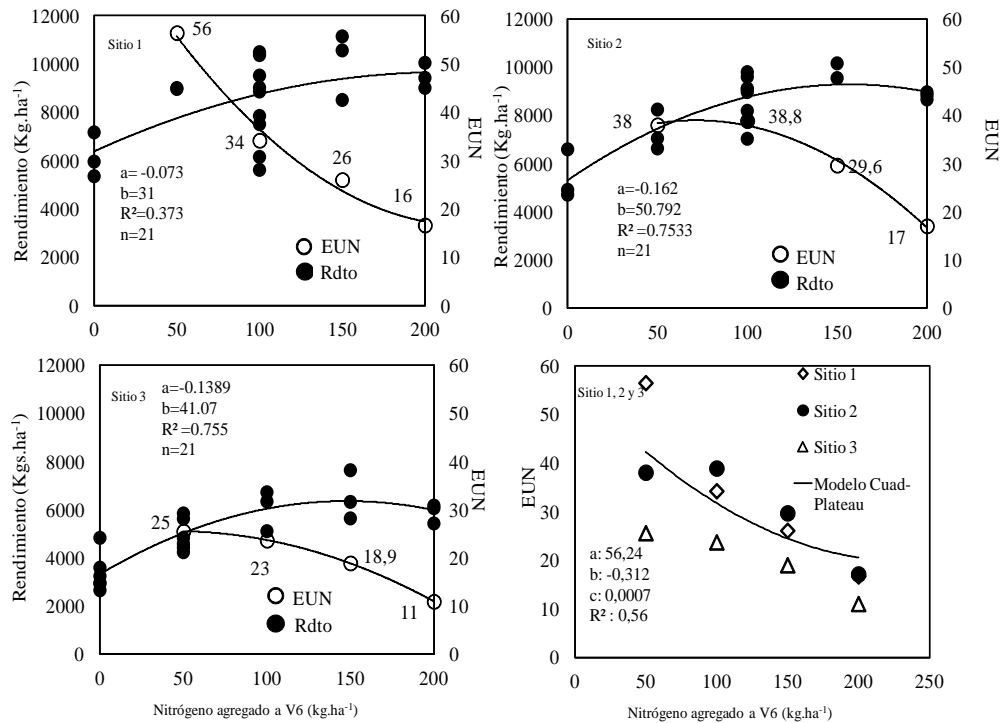


Figura 9. Eficiencia agronómica de uso del nitrógeno (EUN) según sitio y Dosis de N a V6.

En la Figura 9 se puede observar un incremento importante del rendimiento con aplicaciones de 50 y 100 kg de N en V6. Dicho incremento está asociado a una caída en la Eficiencia de Uso de Nitrógeno (EUN), definida como el incremento en producción de granos, por encima del rendimiento del testigo por unidad de nitrógeno agregado ($\text{kg grano.kg N}^{-1}$). A pesar que la EUN disminuyó en términos absolutos, siguió teniendo valores muy elevados aún con aplicaciones de 100 kg de N.ha^{-1} (promedio para los tres sitios de 32 Kg de grano. Kg^{-1} de N agregado), comparado con Below et al., citados por Gallais y Hirel (2004) que obtuvieron valores de EUN de 21,6 Kg de grano. Kg^{-1} de N para la misma dosis y Ceriani e Inella (2012) que obtuvieron 16,4 Kg de grano. Kg^{-1} de N.

Los bajos niveles de N en suelo encontrados a V6 (principalmente en S1) y los elevados potenciales de rendimiento de S1 y S2, explica los elevados valores de EUN obtenidos. Para el caso de S3, en cambio la EUN estuvo dentro de valores normales y

similares a lo reportado por autores como Fox et al. (1986), que obtuvieron respuestas entre 24 y 27 Kg de grano.Kg⁻¹ de N agregado. Si bien las respuestas para este sitio estuvieron dentro de lo esperado, lo que definió los bajos rendimientos fue el testigo. Mientras que en S1 el rendimiento del testigo se ubicó en 6161 Kgs.ha⁻¹, en S3 fue de tan sólo 3374 Kgs.ha⁻¹.

Con el fin de analizar la respuesta en términos de eficiencia, además del cálculo de EUN se determinaron Dosis Óptima Física (DOF, Kg de N agregado para alcanzar el máximo rendimiento), Dosis Óptima Económica (DOE, Kg de N agregado para alcanzar el máximo rendimiento económico por UN), y Rentabilidad marginal (U\$\$·ha⁻¹ de ganancia extra cuando se agrega N desde la DOE hasta los 150 kg N·ha⁻¹) a V6. Como la dosis óptima no se puede conocer de antemano, se maneja la posibilidad que el productor aplique una dosis fija de 150 N en V6, tomando el supuesto de que 150 UN sea la dosis más cercana a la óptima en todas las situaciones.

Cuadro 8. Efecto del agregado de N al pasar del tratamiento de 100 unidades al de 150 sobre el rendimiento, EUN y la renta marginal.

	EUN		INCR. RDTO		EUN	RENTABILIDAD	
	DOF	DOE	DOF	DOE	DOE a150	MARGINAL	
	Kg N·ha ⁻¹	Kg grano·Kg N ⁻¹	Kg grano·Kg N ⁻¹	Kg·ha ⁻¹	Kg grano·Kg N ⁻¹	U\$\$·ha ⁻¹	
S1	90	84	39	41	410	7,4	20
S2	143	130	32	34	575	28,0	125
S3	139	124	24	26	289	18,3	42

* Incremento de Rendimiento desde la Dosis óptima económica (DOE) hasta la dosis de 150 Kg de N.

Como muestra el Cuadro 9, en el caso de S1, para alcanzar dosis de 150 UN fue necesario agregar 66 kg de N adicionales a la DOE, mientras que para S2 y S3, se agregó 20 y 26 kg respectivamente. Asociado a esto, el incremento de rendimiento tuvo variación entre sitios, siendo S3 el de menor incremento. Tomando en cuenta entonces la dosis adicional y el incremento en rendimiento, se pudo determinar que para S1 la EUN de DOE a 150 UN haya sido menor y a su vez la rentabilidad marginal esté por debajo de los otros dos. Teniendo en cuenta éstos resultados es probable que la decisión haya sido no agregar más N en S1 ya que los beneficios serían relativamente escasos. Resumiendo, el productor va a perder eficiencia, pero siempre va a ganar dinero.

4.4. MOMENTO DE APLICACIÓN Y RESPUESTA AL NITRÓGENO

Gudelj et al., citados por Ferraris y Couretot (2011), observaron respuesta similar entre aplicaciones a la siembra y en V6 cuando las precipitaciones en este período fueron de poca intensidad. Por otro lado, encontraron ventajas para las aplicaciones diferidas cuando las lluvias ocurridas predispusieron a la lixiviación de nitratos del perfil.

Según García y Espinosa (2009), la dinámica en el suelo no permite que aplicaciones tempranas de fertilizantes nitrogenados garanticen la disponibilidad de éste nutriente durante el período cuando se necesita mayor absorción (principalmente en las etapas vegetativas antes y después de V10). Éste potencial déficit de N puede reducir significativamente la producción, como en el caso de S2 que a pesar de haber aplicado 20 UN a la siembra el testigo tuvo rendimientos bajos. Una tercera aplicación mecanizada de N entre V8 y V9 podría representar ventajas económicas en rendimiento.

Teniendo en cuenta éstos antecedentes y analizando las lluvias ocurridas en los diferentes sitios entre siembra y V6, vemos la importancia de la no aplicación de elevadas dosis de N a la siembra o en estadios muy tempranos de los cultivos de maíz. Las lluvias durante éste período, como se puede observar en la Figura 3 fueron de 347, 306 y 673 mm entre siembra y V6 para S1, S2 y S3 respectivamente.

Por otro lado, Perdomo y Hoffman (2011) en Uruguay 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. Al mismo tiempo trabajos de Ceriani e Inella (2012) en condiciones bajo riego, muestran también que no existieron diferencias significativas al agregar el fertilizante nitrogenado a V6, V10-11 o particionado.

Debido a problemas con las fechas en las cuáles se debieron realizar los muestreos, cuando se fueron a realizar los muestreos a V10-11 en S3 no se pudieron recabar los datos ya que el cultivo se encontraba en una etapa más avanzada. Por esta razón, para el análisis del momento de fertilización, no se cuenta con los datos del mismo. A continuación se presenta una figura que pretende esquematizar la respuesta a la fertilización N según el momento de aplicación.

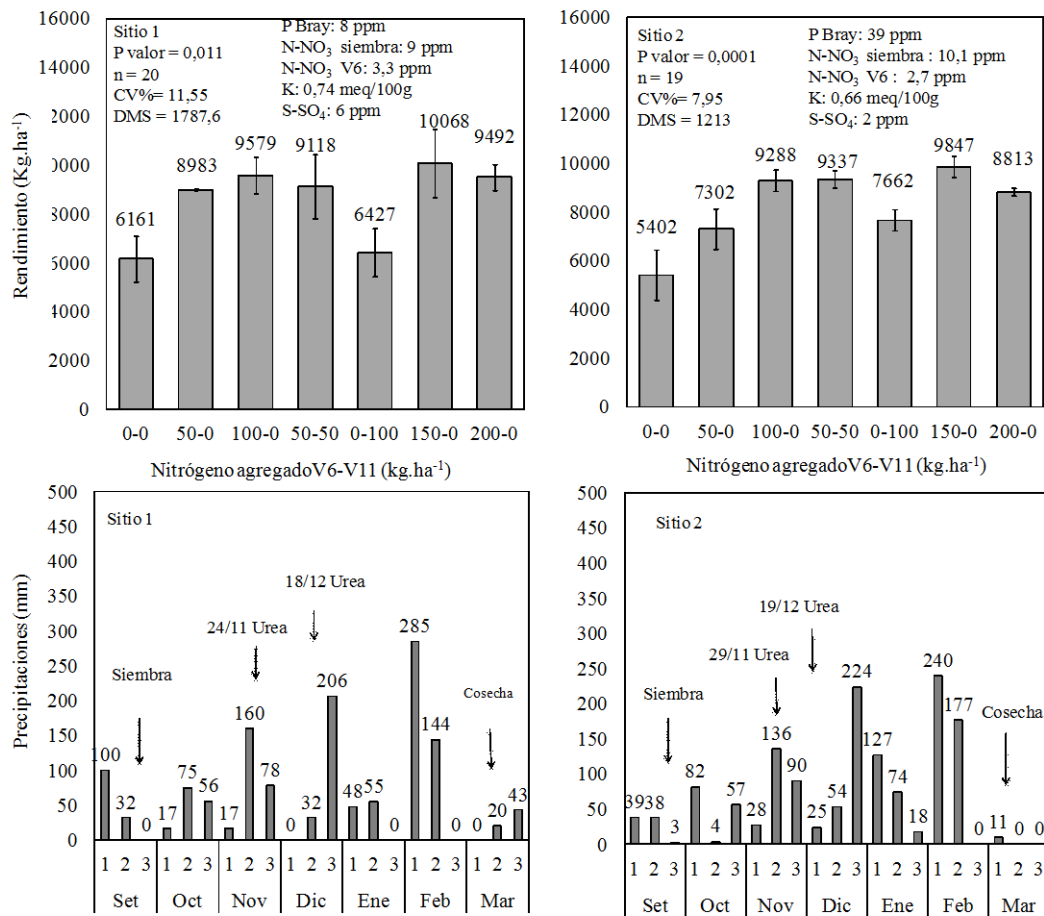


Figura 10. Efecto del momento de aplicación de N en el rendimiento. Líneas en las barras indican desvíos estándar. El primer número representa la dosis de N aplicada a V6 y el segundo número la dosis aplicada a V10-V11.

A partir de la respuesta a la fertilización nitrogenada obtenida en dos de los tres sitios en estudio, mediante análisis de contrastes, se estudió la respuesta en rendimiento en función al momento de fertilización.

Cuadro 9. Rendimiento y componentes según respuesta al momento de aplicación de N. Por razones de manejo no fue posible tomar las medidas en V10 de S3.

Tratamiento		100-0	0-100	50-50	C.V.	C4**	Dif. Medias C4	C5**	Dif Medias C5
Sitio 1	Kg	9579	6427	9118	10,71	0,004	1807	0,0006	2691
Sitio 2	grano.ha ⁻¹	9288	7662	9337	7,23	NS	789	0,0126	1675
Sitio 1	Rdto.esp ⁻¹	114,9	93,6	115	7,24	0,0078	10,61	0,0053	21,42
Sitio 2		104,9	100,7	95,2	6,95	NS	6,87	NS	5,5
Sitio 1	Espigas.m ⁻²	8,33	6,97	7,91	10,66	NS	0,89	NS	0,94
Sitio 2		8,87	7,6	9,81	6,34	NS	0,16	0,0007	2,21
Sitio 1	Espigas.pl ⁻¹	1,18	1,08	1,12	8,23	NS	0,08	NS	0,04
Sitio 2		1,54	1,33	1,7	4,95	NS	0,02	0,0001	0,37
Sitio 1	pl.m ⁻²	7,05	6,5	7,1	8,54	NS	0,28	NS	0,64
Sitio 2		5,77	5,7	5,8	4,1	0,0376	0,01	NS	0,06

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

**C4 es el contraste que compara 100-0 versus 50-50 y 0-100.

**C5 es el contraste que compara 50-50 vs 0-100.

NS= no significativo. Valores por debajo de 0.05 indican diferencias significativas.

Como muestra el Cuadro 10 la diferencia de medias para el C4 en S1 (100 V6 vs 50 V6- 50 V10-11 y 0 V6 vs 100 V10-11) fue de 1807 Kg.ha⁻¹. Por el contrario, en S2 para el mismo contraste las diferencias no fueron significativas, con un $p=0.099$, aunque con una diferencia de medias relativamente alta de 789 kg.ha⁻¹. Se observa que para el C4 el tratamiento de 0-100 fue marcadamente inferior en rendimiento a los otros dos tratamientos en cuestión. Esto seguramente esté asociado al arrastre en el promedio al tratamiento 50-50 razón por la cual resulta significativo el contraste. Por el otro lado en S2 no se observaron diferencias significativas.

Para el caso del C5 en ambos sitios existieron diferencias significativas, con diferencias de medias de 2691 Kg.ha⁻¹ para S1 y 1675 Kg.ha⁻¹ para S2. Éstos resultados muestran que hubo un efecto significativo de aplicar todo el N en V10, produciendo una caída importante en el rendimiento frente a particionar la aplicación. Observando la diferencia de medias que existieron para los 2 sitios, S1 fue el que más resintió su rendimiento con la aplicación diferida.

Como se mostró anteriormente, ambos sitios tienen potenciales de rendimiento similares (nivel de N-NO₃ a la siembra, suelos similares, mismo nivel de rendimiento

final sin limitante de N entre otros). Las diferencias podrían estar explicadas por los requerimientos de N de cada cultivo en el estadio de V6 (diferente biomasa por hectárea). El S1 a V6 absorbió 94.9 Kg.ha^{-1} de N mientras que para S2 la absorción fue de 33.5 Kg.ha^{-1} de N. El S1 al tener una mayor población, requiere inicialmente una mayor cantidad de N para que cada planta se desarrolle favorablemente hasta que se alcanza un equilibrio entre la población y la demanda del cultivo. Dicho de otra forma S1 tiene una eficiencia de absorción inicial de N mayor por su alta población.

Para ambos sitios, los resultados coinciden con los obtenidos por Binder et al. (2000), en donde la baja respuesta a las aplicaciones tardías de N se dio principalmente cuando el rendimiento del testigo sin N fue también bajo.

Ceriani e Inella (2012) en condiciones de secano también encontraron diferencias significativas a favor de la aplicación de N a V6 frente a la misma dosis a V10-V11. Sin embargo no se obtuvieron diferencias significativas en condiciones de riego.

Para el caso de los componentes, el único que tiene diferencias significativas cuando se aplica el C4 es el Rendimiento.espiga⁻¹ en S1. Esto afirma que el componente que afecta el rendimiento en grano en S1 es Rendimiento.espiga⁻¹. El C5 para S1, rendimiento.espiga⁻¹ sigue siendo el único componente afectado, mientras que para S2 existen diferencias significativas para espigas.m² y prolificidad. Por lo anterior es que se afirma que la falta de fertilización en V6 es “llegar tarde” con la aplicación de N ya que se vieron afectados componentes y rendimientos para los dos sitios.

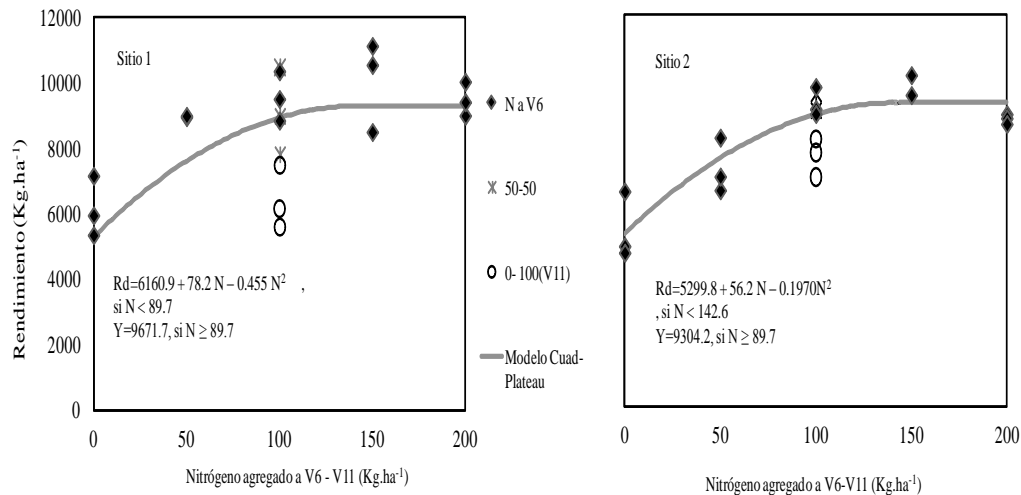


Figura 11. Respuesta al agregado total de nitrógeno como urea según momento de aplicación del fertilizante.

Se aprecia claramente en la Figura 11, como el tratamiento con 100 UN a V10-11 fue significativamente inferior en rendimiento al resto de los tratamientos. Al mismo tiempo se aprecia como el tratamiento 50-50 no tiene diferencias relevantes frente al tratamiento 100-0 para ambos sitios. Esto es coincidente con lo encontrado por Ceriani e Inella (2012), que en condiciones de riego, equivalentes a las de los sitios 1 y 2, no mostraron diferencias significativas entre aplicar todo a V6 y particionado, incluso llegando a tener una diferencia de 300 kgs.ha⁻¹ a favor de particionar la dosis.

4.5 EL AZUFRE COMO POTENCIAL LIMITANTE DE LA RESPUESTA AL AGREGADO DE N

En general, las deficiencias de S se observan en situaciones de bajo contenido original de materia orgánica (García, 2005). Según Cerveñansky (2004) las concentraciones de 3 a 5 ppm de SO₄ en el suelo tienen demostrada adecuación para el crecimiento de muchas especies vegetales. Sin embargo para Dobermann y Fairhurst (2000) los análisis de S en el suelo no son muy confiables a menos que incluyan S inorgánico y parte de la fracción mineralizable del S orgánico.

Las experiencias desarrolladas hasta la fecha no han permitido generar metodologías de diagnóstico confiables para determinar las necesidades de S para maíz

y otros cultivos. El análisis de S-sulfatos en suelo a la siembra ha sido evaluado en algunos estudios con resultados dispares. Di Napoli (2001), Blanco et al. (2004), en el Centro-Sur de Santa Fe y Sur, respectivamente, estimaron niveles críticos de Sulfatos a la siembra de 10-12 mg.Kg⁻¹ de suelo. Sin embargo, no se encontró relación alguna entre respuesta a S y S-sulfatos en suelo en otras experiencias.

Para estudiar si el S pudo haber funcionado como limitante de la respuesta al N, condicionando la EUN o el rendimiento máximo en los diferentes sitios, al tratamiento con 200 unidades de N a V6, se le adicionaron 20 unidades de azufre como sulfato de amonio.

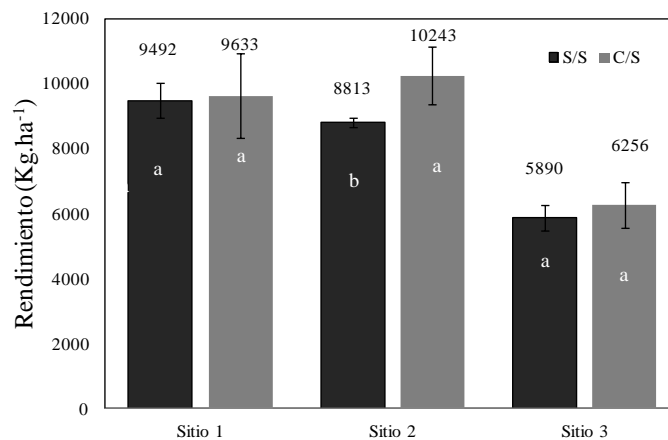


Figura 12. Respuesta al agregado de azufre para los tres sitios. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), a través del contraste entre el Tratamiento con 200 kg de N.ha⁻¹ y el tratamiento con 200 kg de N.ha⁻¹ + 20 kg de S.ha⁻¹ (C6)

El Contraste 6 (Cuadro 11) compara los tratamientos con y sin azufre. Los resultados indican que para los S1 y S3 no existieron diferencias significativas por el agregado de S. Por el contrario en el caso de S2, la respuesta al azufre fue muy alta alcanzando diferencias entre medias de rendimiento de 1430 Kg.ha⁻¹ a favor del tratamiento con azufre con un $p=0.0136$ y con una Eficiencia de Uso del Azufre (EUS) de 71.5 Kg de grano.Kg de S⁻¹).

Cuadro 10. Rendimiento y componentes según respuesta al agregado de azufre junto con 200 UN en V6.

Tratamiento		200-0	200(20S)	C6
Sitio 1		9492	9633	NS
Sitio 2	Kg grano.ha ⁻¹	8813	10243	0,01
Sitio 3		5890	6256	NS
Sitio 1		6,84	6,71	NS
Sitio 2	pl.m ⁻²	5,14	6,07	NS
Sitio 3		5,73	5,99	NS
Sitio 1		1,31	1,19	NS
Sitio 2	Espigas.pl ⁻¹	1,67	1,65	NS
Sitio 3		1,09	1,06	NS
Sitio 1		8,97	7,95	NS
Sitio 2	Espigas.m ⁻²	8,58	10,02	0,005
Sitio 3		6,24	6,33	NS
Sitio 1		106,22	120,90	0,04
Sitio 2	Rdto.esp ⁻¹	102,75	102,31	NS
Sitio 3		94,30	98,78	NS

C6: Es el contraste que compara 200 UN a V6 versus la misma dosis con el agregado de 20 unidades de S.

El análisis de suelo realizado previo a la siembra del cultivo, arrojó que los niveles de MOS de S1 y S2 eran aceptables (aproximadamente 4,5%), mientras que para S3 el mismo era más bajo (2,7%). En cuanto a los niveles de S-SO₄ a la siembra S2 tuvo los valores más bajos de 2 ppm, mientras que S1 y S3 estuvieron en torno a 6 ppm. Con éstos factores en cuenta era esperable que S2 presente respuesta, ya que las condiciones coinciden con lo observado por García et al. (2005) en Santa Fe, donde observó respuestas más importantes en cultivos que han cubierto las deficiencias de otros nutrientes (principalmente N y P).

En la Figura 13, se observa claramente la diferencia en rendimiento para el tratamiento con azufre para las mismas dosis de N en S2. Este hecho provoca que este nutriente funcione como limitante al agregado de N. Estos resultados son de gran importancia sobre todo con la situación actual en donde las chacras se enfrentan a una extracción de nutrientes muy elevada y continua, la que en el corto o largo plazo podría conducir a la existencia de deficiencias más generalizadas.

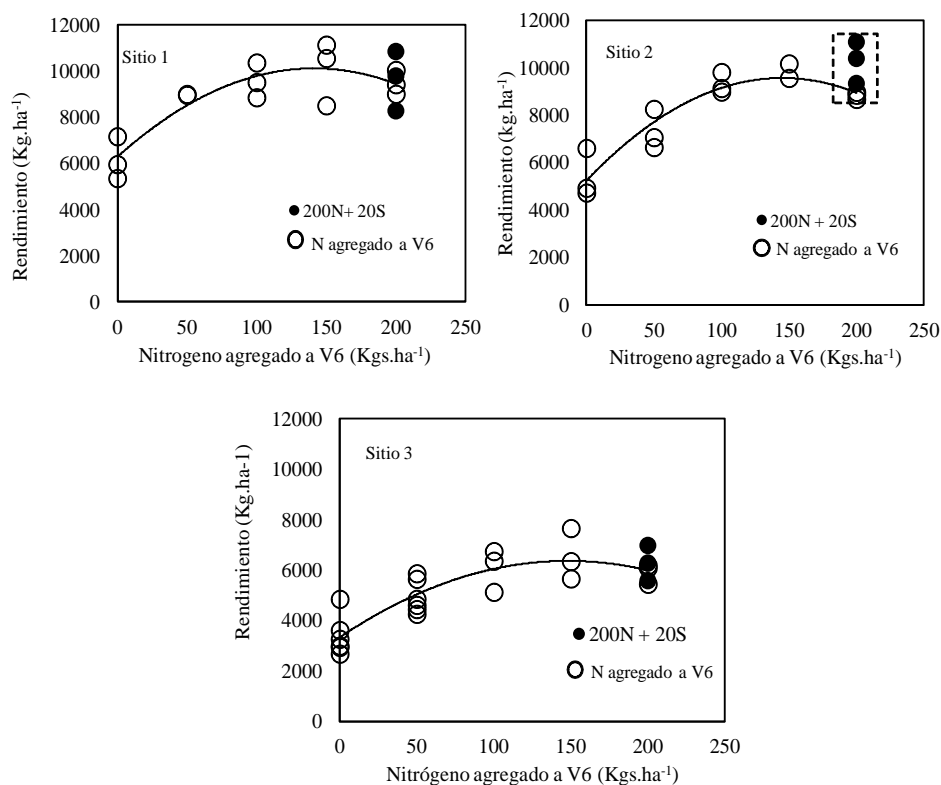


Figura 13. Respuesta en grano al agregado de N a V6 y su interacción con el agregado de S cuando se aplican 200 UN en el mismo momento.

La respuesta al agregado de azufre para S2 fue de 71.5 Kg de grano. Kg de S⁻¹. Éstos resultados se encuentran muy por encima de los encontrados por Zorita, Ventimiglia et al., citados por Uhart y Andrade (1995) en la Zona Oeste de la provincia de Buenos Aires, donde las respuestas fueron del orden de 10-12 kg de maíz por kg de S.ha⁻¹ y las dosis asociadas a los máximos rendimientos de entre 5 y 15 kg de S.ha⁻¹, valores similares a los encontrados para el S1 y S3. Sin embargo en algunos trabajos se encontraron respuestas a dosis más altas en buenas condiciones hídricas. Los mismos autores señalan que la magnitud de las respuestas dependerá de la fertilidad del lote y dosis utilizada. Se puede concluir que los niveles de respuesta que se obtuvieron para S1 y S3, son los que se pueden esperar en condiciones normales. Sin embargo en el S2 el comportamiento fue muy diferente a otras experiencias, existiendo una respuesta muy importante al S.

Capurro et al. (2007), en la provincia de Santa Fe encontraron EUN de 30.6 Kg de maíz.Kg de N⁻¹ cuando se agregaron 12 Kg de S frente a 16 Kg de maíz.Kg de N⁻¹ sin

el agregado de S. En este experimento la respuesta a S fue significativa con dosis de N superiores a 60 Kg.ha⁻¹, siendo mayor a dosis crecientes de N demostrando una clara interacción N*S. Este mismo resultado se observó en S2 (Figura 13) donde también ocurrió una interacción significativa NxS ya que la DOF con agregado de S fue superior a cuando este nutriente no se agregó (datos no mostrados).

4.6. INDICADORES DEL ESTATUS NITROGENADO EN V10-11 EN FUNCIÓN DEL N AGREGADO A V6

Las determinaciones de planta realizada en V6 y en V10-11 tienen como objetivo principal, poder profundizar en la necesidad de identificación de indicadores de diagnóstico que permitan detectar deficiencias de N tardío.

En la siguiente figura se presenta en valor medio en respuesta al agregado de N a V6, de los variables estudiadas a V10-11.

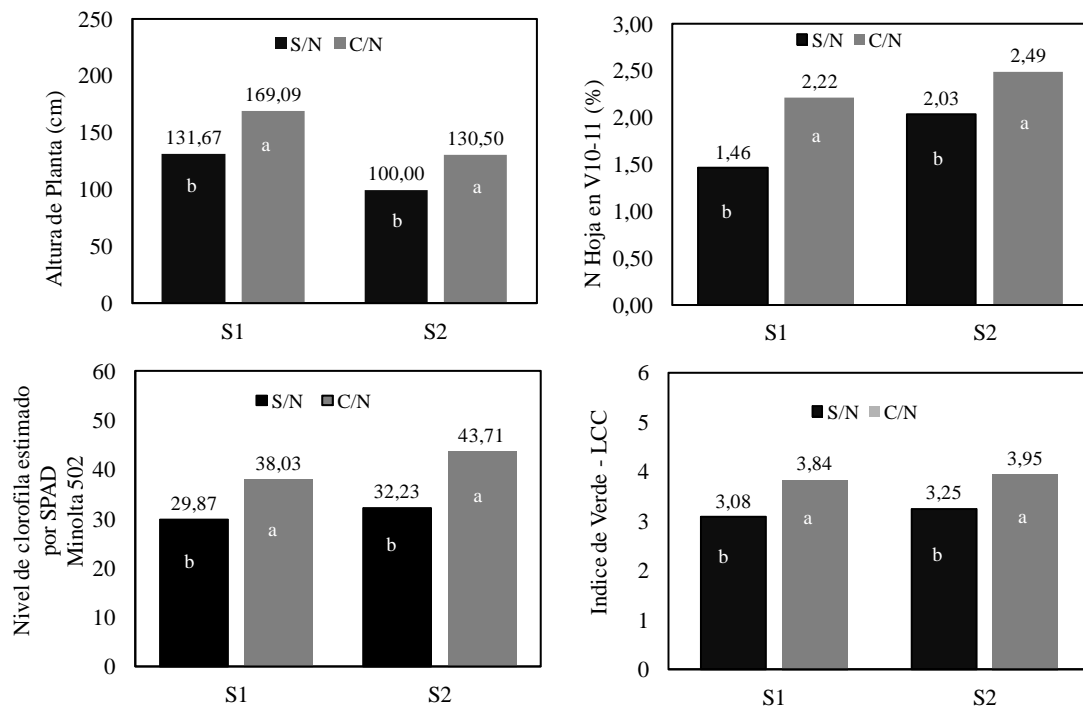


Figura 14. Efecto del agregado de N en V6 sobre los diferentes indicadores de status nitrogenado evaluados a V10-11. Valores con diferente letra indican diferencias significativas (ver cuadro de contrastes en anexos).

Observando la Figura 14 se pudo apreciar como los niveles de los indicadores evaluados, menos la altura de planta (altura de planta se toma como indicador de acumulación de biomasa), son mayores para S2 en comparación con S1. La altura de planta en S1 fue mayor que en S2. Complementando esto, S1 si bien tuvo menores valores de prolificidad que S2, las plantas.m⁻² fueron mayores y pudo concretar un mayor rendimiento por espiga lo que está asociado a una elevada tasa de crecimiento en el período crítico, que se podría vincular con un mejor aporte de nutrientes por parte del suelo. Debido a las razones antes mencionadas resulta lógico que los valores de los indicadores evaluados a V10-11 sean inferiores para S1, ya que seguramente en éste estadio el cultivo tuvo más biomasa y los niveles de clorofila presentaron una mayor dilución en el cultivo que S2. Lo mencionado anteriormente seguramente esté asociado a una menor respuesta a la fertilización en V10-11 para S1, ya que con menores dosis de fertilizante se lograron rendimientos elevados.

El agregado de N a V6, llevó a la existencia de diferencias significativas para todos los indicadores (anexos Cuadro 12). Como se puede observar se sumó la variable altura de planta para suplir la falta de la biomasa total producida a V10-11. Es importante mencionar que visualmente fue muy fácil detectar los tratamientos sin N, tanto por la altura de las plantas como por el color. Como se estudió anteriormente los niveles de N en suelo a V6 fueron muy bajos. Si se observa en la Figura 15 para igual contenido de N el S1 logró una mayor altura.

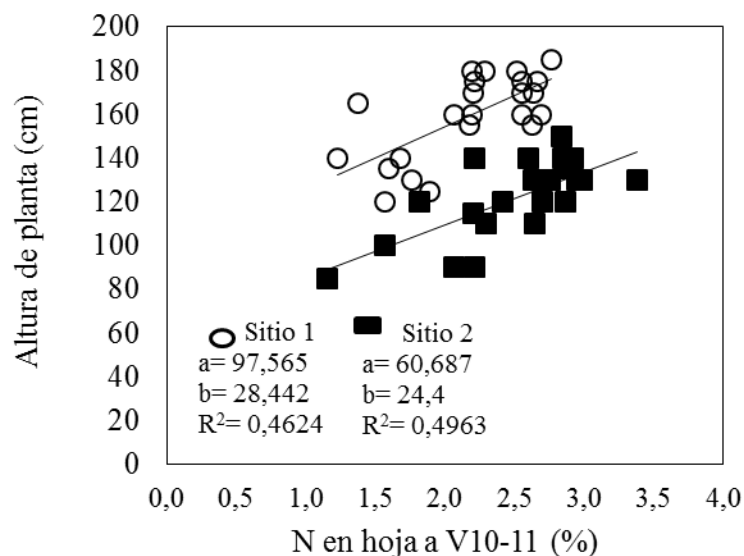


Figura 15. Relación entre el porcentaje de nitrógeno en la hoja opuesta a la espiga en el estadio de V10-11 y la altura de planta para el mismo estadio.

El rango de variación del % de N en hoja en S2 fue mayor que en S1. En S1 los bajos niveles de %N en hoja se debieron en parte a que el N estuvo más diluido en la planta. Por otro lado se puede observar que cuando aumenta el % de N en hoja la altura tiende a aumentar en la misma proporción, ya que la pendiente es similar en las dos ecuaciones, esto significa que el cambio de altura con el aumento de % de N en hoja fue similar para los dos sitios.

4.6.1 Posibilidad de predecir la respuesta al nitrógeno en V10-11

Trabajos de Perdomo y Cardellino (2007), muestran que sería posible pensar en predecir la demanda de N en estadios cercanos a V11 (aprox. 4 semanas post-V6) en base a índices de análisis foliar. Estos índices pueden ser tanto la concentración de N en hoja, el clorofila-SPAD y una escala numérica de color de la hoja relativo a una escala patrón (Leaf color chart).

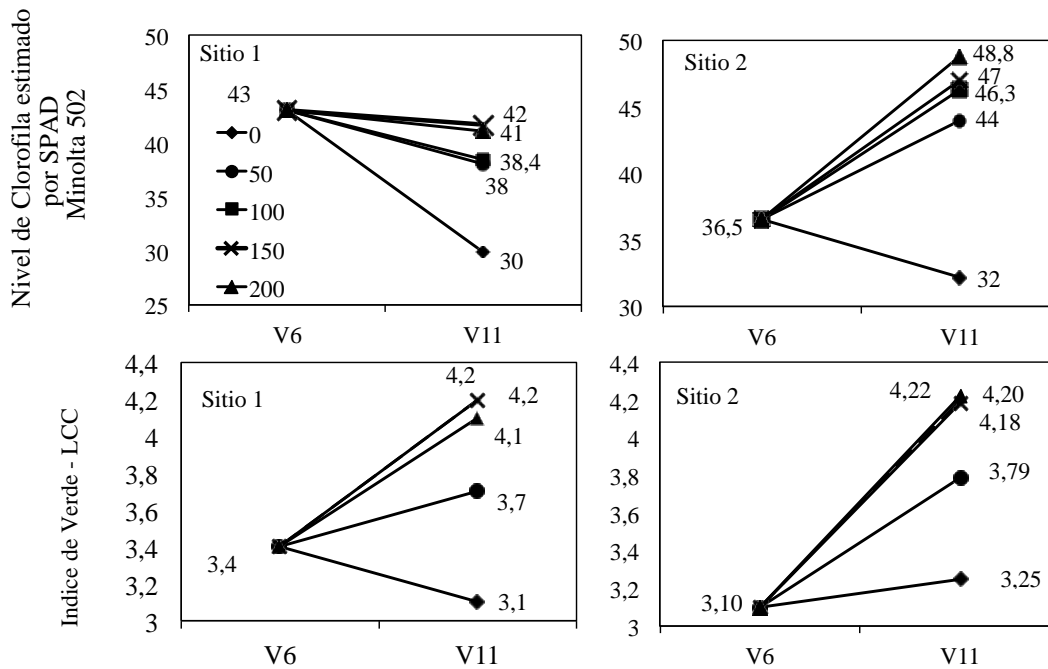


Figura 16. Evolución de las lecturas de SPAD y LCC desde V6 a V10-11 para distintas dosis de N en V6.

Los valores de SPAD 502 Y LCC aumentaron de V6 a V10-11 a medida que se incrementó la dosis de N aplicada en V6 para los dos sitios. La única excepción fue el caso del SPAD 502 para S1 en donde no existió aumento con respecto a la fertilización cuando comparamos la medida de V6 y V10-11. Una de las explicaciones a este resultado puede ser explicado debido a que a V6 el cultivo en S1 había absorbido más N que en S2. De todas formas resulta difícil explicar las diferencias en los resultados entre el LCC y el SPAD 502 para S1.

Estos resultados se contradicen con los obtenidos por Perdomo et al. (2008) en donde bajo condiciones de secano, las lecturas de clorofila descendieron desde V6 a V10-11. Por otro lado, coinciden con los trabajos realizados por Ceriani e Inella (2012) en donde las lecturas de clorofila si aumentaron a excepción del tratamiento con 50UN en secano.

A partir de esos resultados, se realizaron los contrastes (ver anexos) para determinar qué tipo de respuesta se ajustaba mejor, si lineal o cuadrática. Ambos contrastes tuvieron valores de p valor inferiores a 0.05 pero se decidió utilizar la respuesta lineal por tener ésta una mayor significancia. En el Cuadro 12 se detallan los

resultados de la regresión lineal aplicada a la respuesta de cada indicador a la fertilización con N en V6 con dosis variables.

Cuadro 1. Coeficientes de ecuaciones lineales entre dosis de N agregada en V6 y valores de índices del status nitrogenado medidos en V10-11, para los dos sitios en estudio.

Coeficiente	N en hoja a V10-11 (%)		Nivel de Clorofila estimado por SPAD 502		Índice de Verde LCC		Altura (cm)	
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 1	Sitio 2
a	1,60	2,23	32,19	36,47	3,35	3,46	139	103,76
b	0,0051	0,0038	0,054	0,072	0,005	0,0046	0,178	0,170
R ²	0,578	0,639	0,689	0,712	0,555	0,662	0,313	0,326
Prob.	0,0016	0,0006	0,0002	0,0001	0,0022	0,0004	0,0065	0,003

Para todos los indicadores el valor del intercepto “a” (indica el valor de índices sin efecto de N) fue mayor en el S2 que para el S1. Por otro lado, cuando analizamos la pendiente de la regresión (coeficiente lineal “b”) observamos que para el caso de %N en hoja y para LCC los valores son mayores en S2. Esto significa que la eficiencia (unidades de N para hacer mayores los valores) fue mayor en el caso de S1. La excepción a este resultado fue el SPAD donde el “b” es mayor para el S2. Los R² fueron relativamente altos para todos los indicadores menos para la Altura de planta. También se puede apreciar como estos se ajustaron mejor para el S2.

4.6.2. Relación entre la respuesta al N tardío y los indicadores del estatus nitrogenado a V10-11

El contenido de clorofila en la hoja de maíz se relaciona positivamente con la concentración de N en hoja y por lo tanto refleja el estado nitrogenado del cultivo (Waskom et al., 1996).

Se estudió la relación entre el porcentaje de nitrógeno en la hoja en V10-V11 y el nivel de clorofila en hoja estimado por SPAD Minolta 502 y LCC. Ceriani e Inella (2012) en el estadio V10-V11 no encontraron relaciones importantes entre estos indicadores y el %N en hoja para condiciones de secano. Sin embargo en condiciones sin deficiencias hídricas esta relación aumentó en gran medida (R² 0.70 para el SPAD y 0.53 para el LCC).

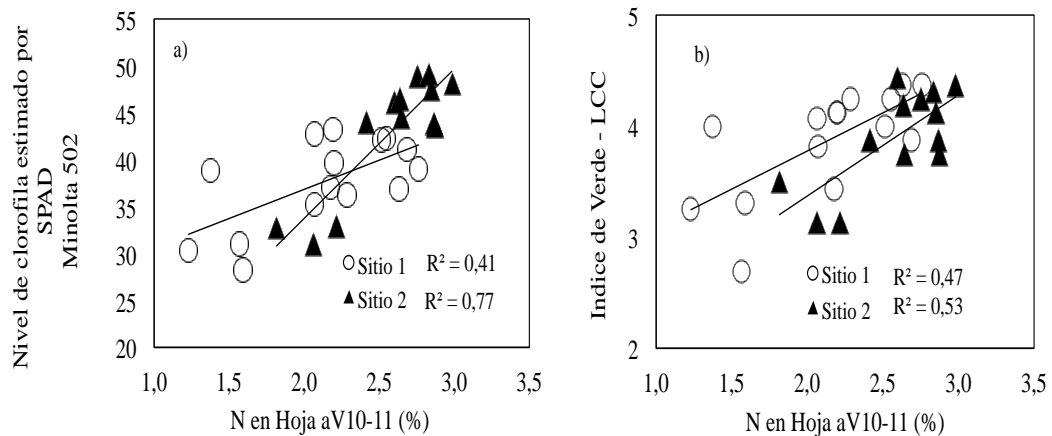


Figura 17. a) Relación entre el porcentaje de nitrógeno en la hoja opuesta a la mazorca en el estadio de V10-11 y el nivel de clorofila en hoja estimado por SPAD Minolta 502; b) Relación entre índice de color LCC y el porcentaje de nitrógeno en la hoja opuesta a la espiga.

Para este año en particular en que las precipitaciones estuvieron por encima de lo normal, se puede observar que la relación entre los indicadores fue relativamente alta. El SPAD para el sitio 1 mostró un R^2 igual a 0.77 mientras que en el sitio 2 fue de 0.40. Por otro lado para el caso del LCC los R^2 fueron similares para ambos sitios aunque con valores inferiores para el sitio 1.

Cuando se analiza (Figura 18) la relación entre el rendimiento a cosecha y el valor del indicadores en V10-V11, ésta se ajusta bien a una respuesta lineal para casi todos los indicadores y sitios.

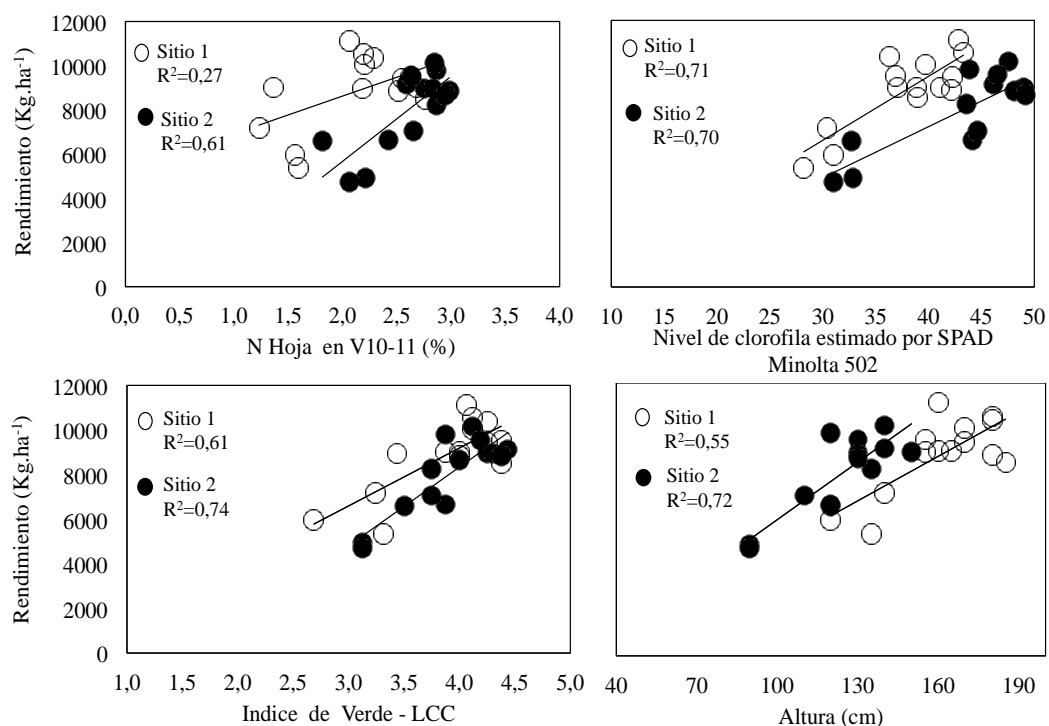


Figura 18. Relación entre los diferentes indicadores del status nitrogenado y altura en V10-V11 y el rendimiento del cultivo.

Estos resultados concuerdan con varios autores que demuestran que los niveles N en estadios avanzados de desarrollo sí mostraron una alta correlación con el rendimiento mientras que para estos niveles en estadios tempranos como V5-V6 se relacionaron poco con el rendimiento. Este hecho lleva a pensar en que cuando estamos frente a deficiencias de N en estadios tempranos utilizando estas herramientas es muy probable que se pierda potencial de producción. Al mismo tiempo, es importante destacar que para la relación entre altura y rendimiento, era dable esperar una correlación alta ya que este parámetro es en realidad una medida de biomasa. Los tratamientos con mayor altura en V10-11 tendieron a tener mayores rendimientos a cosecha.

El indicador que menos se ajustó a la respuesta en rendimiento ($R^2 = 0.27$) fue el %N en hoja para el S1. Estos resultados probablemente se deben a la mayor biomasa (ver datos de altura Figura 14) del cultivo en este sitio lo que provoca una mayor dilución del N en la planta.

Trabajos realizados por Binford et al. (1992), Sunderman et al. (1997), Argenta et al. (2001) concuerdan también que los medidores de clorofila no son considerados

muy adecuados para evaluar el nivel de N en maíz en V5-V6 en la etapa vegetativa. Diferencias en la edad fisiológica de la planta puede producir errores en la interpretación de estos medidores en etapas vegetativas iniciales. Sin embargo en el estadio de V10-V11 la relación entre el % de N y los medidores de clorofila han tenido una buena correlación en varios experimentos (Binford 1992, Blackmer y Schepers 1995, Waskom et al. 1996).

4.6.3 Estimación de niveles críticos para los distintos indicadores evaluados

Ceriani e Inella (2012) encontraron como nivel crítico para asegurar un 90% de rendimiento relativo un valor de 50 unidades de SPAD en V10-11. Por otro lado Argenta encontró para el mismo estadio un nivel crítico de 55 unidades. El LCC para el mismo ensayo llevado a cabo por Ceriani e Inella fue de 3.75 en riego y 3.60 en seco

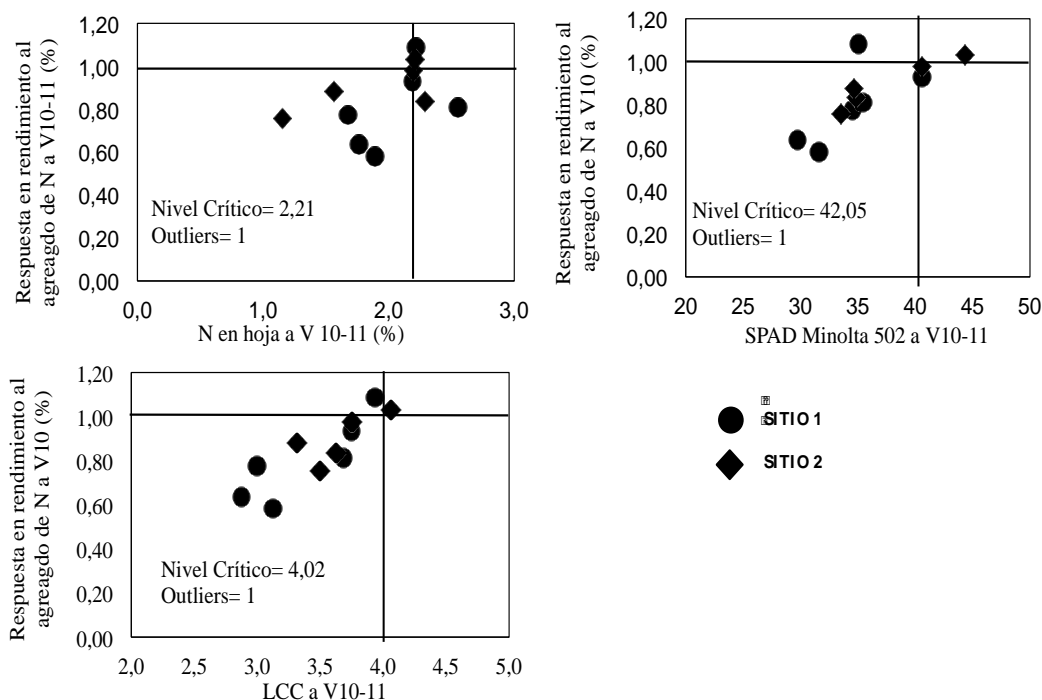


Figura 19. Relación entre valor de tres índices de respuesta a N en V10 y la respuesta en rendimiento de maíz. Los puntos corresponden a las distintas dosis (50,100) agregadas en V10-11 para los 2 sitios en estudio. El nivel crítico fue estimado en base al método gráfico Cate Nelson para valores de rendimiento relativo de 90%. Los índices fueron tomados de la hoja opuesta a la mazorca y son: índice de clorofila SPAD 502, concentración de N y carta de color de hoja LCC.

Para los ensayos en estudio, el nivel crítico del SPAD se encontró en valores inferiores a los mencionados por Argenta et al. (2001), Ceriani e Inella (2012), mientras que los valores de LCC fueron similares aunque un poco por encima. Con respecto al SPAD se podría deducir que las condiciones hídricas favorables para el desarrollo del cultivo, incrementaron la probabilidad de respuesta y por consiguiente el Nivel crítico.

Para el %N en hoja, Ambrogio et al. (2001) encontraron una concentración crítica de un 2.7 % de N en hoja de la espiga a floración, por encima de la cual los rendimientos fueron mayores a 9.000 kg.ha⁻¹. Ceriani e Inella (2012) encontraron valores críticos de 2.5 % de N en hoja para el estadio de V10-11. En este caso el Nivel crítico para el % de N hoja fue de 2.1, un poco por debajo de los encontrados por otros autores.

Finalmente se podría concluir que si bien los índices demostraron ser buenos indicadores del nivel nutricional del cultivo, cuando se decidió aplicar, al menos para el caso del sitio 1, ya era tarde debido a que ya se vieron afectados componentes fundamentales de concreción de rendimiento.

5. CONCLUSIONES

En concordancia con varios autores de la región y de otras zonas de producción, si bien existió respuesta a la fertilización nitrogenada los umbrales de respuesta para los 3 Sitios evaluados fueron diferentes de acuerdo al potencial de producción de cada ambiente. Considerando que las precipitaciones, la población, el híbrido utilizado y el agregado de N fueron similares y no fueron limitantes para ninguno de los sitios evaluados, los resultados indican que es muy importante a la hora de decidir la dosis de N a agregar, tener en cuenta aspectos relacionados con el potencial de producción de cada ambiente. De esta forma se busca evitar realizar “sobre” o “subfertilizaciones” con las consecuencias económicas y de impacto ambiental que conllevan estas decisiones.

Los niveles de nitratos a V6 fueron muy bajos para los 3 sitios, lo que explica los altos niveles de respuesta a la fertilización. Sin embargo la respuesta fue diferente para cada sitio siendo de 3331, 3411 y de 2516 Kg.ha⁻¹ con Dosis óptimas físicas de (DOF) de 89.7, 142.6 y 138.7 UN para los sitios 1 2 y 3 respectivamente. Para el caso del Sitio 3 donde se alcanzaron los menores rendimientos, es probable que la limitante esté asociada a propiedades de los suelos que en este trabajo no fueron evaluadas, tales como propiedad física del suelo, contenido de materia orgánica y años de agricultura. De todas maneras con estas limitantes es importante destacar que el agregado de N logró respuestas importantes en rendimiento compensando en parte las deficiencias de K.

Con respecto al momento y dosis de fertilización, con una sola aplicación de N a V10-11 los rendimientos se vieron muy deprimidos en comparación a otros tratamientos, resultado dable de esperar teniendo en cuenta los bajos niveles de nitratos en suelo a V6. En ambos sitios para 100 kg de N.ha⁻¹, un 50 % a V6 y 50 % a V10-11, no difirió de los 100 kg de N a V6. Ante la incertidumbre de cómo se va a desarrollar el cultivo en etapas avanzadas, estos resultados nos pueden indicar, que para estas condiciones y este año en particular, puede ser una buena decisión aplicar 50 UN a V6 y volver a monitorear el estado del cultivo a V10-11 para definir la segunda aplicación.

Los resultados indican que para los sitios 1 y 3 no existieron diferencias significativas por el agregado de S. Por el contrario en el caso del Sitio 2, la respuesta al azufre fue muy alta alcanzando diferencias entre medias de 1430 Kg de grano a favor del tratamiento con azufre con un $p=0.0136$ y con una Eficiencia de Uso del Azufre (EUS) de 71.5 Kg de grano.Kg de S). Si bien podrían estar actuando otros factores no estudiados, es probable que la mayor respuesta al N en el Sitio 2, asociado a bajos N-

NO³ en suelo a V6 y bajo crecimiento a V6 podría estar asociado al bajo nivel de S en suelo y a la interacción de este con el N.

El agregado de N a V6, llevó a incrementos de rendimiento para todos los valores de los indicadores directos (% de N en hoja) e indirectos (SPAD 502 y LCC) medidos a V10-11 en S1 y en S2. Los valores críticos encontrados fueron de 2.21, 42.05 y de 4.01 para % N en hoja, SPAD Minolta 502 y LCC respectivamente. En coincidencia con la bibliografía, no existió relación entre los valores de— estos indicadores a V6 y el Rendimiento en grano. Sin embargo, en estadios más avanzados como V10-11 si existió buena correlación (a no ser para el indicador de N en hoja (%) en el Sitio 1) con el rendimiento en grano.

Estos resultados indican que para éstas condiciones, y en años con precipitaciones no limitantes, diferir la aplicación del fertilizante nitrogenado puede ser una buena opción. Los indicadores directos e indirectos, pueden usarse como herramienta para monitorear el estatus nitrogenado del cultivo en estados avanzados y tomar la decisión de la aplicación. Aplicaciones tardías serían una opción interesante, para decidir si en condiciones no favorables en V6, es mejor diferir o fraccionar la aplicación, reduciendo el riesgo de pérdida de efectividad del N aplicado.

6. RESUMEN

En el mundo el cultivo de maíz es de gran importancia tanto como alimento para humanos y animales así como para la producción de biocombustibles, siendo el cultivo comercial con mayor productividad (kg.ha-1) y el segundo en volumen después del trigo a nivel mundial. En Uruguay en los últimos años a pesar de la expansión agrícola e implementación de nuevas tecnologías los rendimientos promedio del mismo no han evolucionado de la misma forma que para otros cultivos, de la mano de la falta de implementación de tecnologías de producción probadas para las condiciones del país. La fertilización nitrogenada es de uso común en el país, aplicándose ya sea la totalidad de la necesidad estimada a la siembra así como particionada a siembra y V6. En el presente trabajo se evaluó la respuesta de fertilizaciones tradicionales frente a diferirlas en una tercera aplicación en el estado de V 10-11. También se evaluaron diferentes herramientas para la determinación de deficiencias de N para las diferentes etapas, además se estudió el impacto de aplicar N más una dosis de S. En la zafra 2009/2010 se instalaron tres ensayos en diferentes localidades del Litoral del país, los experimentos fueron diseños de bloques al azar con tres repeticiones. Las dosis de N aplicadas en V6 fueron de 50, 100, 150 y 200, mientras que las combinaciones V6 + V10-11 fueron 50-50 y 0-100. Se dejó un testigo sin fertilizar, además a la dosis de 200 se le aplicaron 20 Kg de S. Sumado a esto se probó para el sitio 3 la aplicación de 50 y 25 N en la forma de ENTEC 26. Los indicadores de estatus nitrogenado utilizados para V6 y V10-11 fueron % de N en hoja, medidor de clorofila Minolta SPAD 502 e índice de verde a través de Leaf Color Chart (LCC). Para los tres sitios se encontró una respuesta al agregado de N importante, variando sensiblemente la EUN en función de las condiciones del cultivo. Se encontraron diferencias en las aplicaciones a particionadas, arrojando que es mejor aplicar la totalidad en V6 aunque se podría particionar en los casos la aplicación a V6 no haya sido suficiente sin pérdidas de potencial importantes. La aplicación de S tiene efectos positivos en los casos en los cuales la chacra no esté en buenas condiciones y el aporte por mineralización sea deficiente. En cuanto a los indicadores se encontró que los tres tienen relación con la deficiencia, pero es difícil predecir las deficiencias posteriores midiendo en V6 con el medidor de clorofila e índice verde.

Palabras clave: Maíz; Nitrógeno; Aplicaciones tardías; Fraccionamiento; Azufre; LCC; SPAD; ENTEC 26.

7. SUMMARY

In the world maize is of great importance as food for both humans and animals, as well as for the production of biofuels, it ranks as the first crop in terms of productivity (kg ha^{-1}) and the second total volume wise after wheat. In Uruguay in recent years despite agricultural expansion and implementation of new technologies, average yields have not evolved in the same way as for other crops, due to the lack of implementation of production technologies tested for the countries' conditions. Nitrogen fertilization is commonly used by farmers, either applying the total estimated needs at sowing or partitioned at V6. The response of traditional fertilizations versus partitioning them in a third application in the state of 10-11 V was evaluated in this paper. Different tools for determining N deficiencies for different stages were evaluated, also the impact of applying S with the highest N dose. During the 2009/2010 crop three trials were installed in different parts of the West, the experiments were random block designs with three repetitions. Different N doses at V6 were applied, 50, 100, 150 and 200 , while V6 +V10-11 combinations were 0-100 and 50-50, a control was left unfertilized, in addition to the dose of 200 N, 20 S were applied. In addition to this for Site 3 application of 25 and 50 N as ENTEC 26 was tested. Nitrogen status indicators used for V6 and V10- 11 were % N in leaf, chlorophyll meter Minolta SPAD 502 and green index through Leaf Color Chart (LCC). All sites showed significant response to N fertilization, varying widely the NUE depending on the crop conditions and environment. Differences in partitioned applications were found, resulting the best option is full fertilization in V6, but partitioning could be used to correct under-fertilizations without significant loss of potential. The application of S had positive effects in cases in which soil conditions were not optimum and mineralization wise the supply would not be enough. As for the indicators was found that all three are related to the deficiency, but it is difficult to predict subsequent shortcomings measuring in V6 with chlorophyll meter and green index.

Keywords: Maize; Nitrogen; Late application; Spilt N-application; Sulphur; LCC; SPAD; ENTEC 26.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ACHAVAL CASANOVA, M.; DUCAMP RODRÍGUEZ, 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. AMBROGIO, M.; LORENZATTI, S.; TANDUCCI, W.; GARCÍA, F. 2001. Explorando deficiencias nutricionales en la región pampeana; resultados de los ensayos de fertilización AAPRESID-INTA-INPOFOS – Maíz 2000/01. In: Actas Jornada de Actualización Técnica para Profesionales Fertilidad 2001 (3a., 2001, Rosario, AR). Actas. Acassuso, Buenos Aires, Argentina, INFOPOS Cono Sur. s.p.
3. ANDRADE, F. H.; CIRILO, A.; UHART, S.; OTEGUI, M. E. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Buenos Aires, Argentina, Dekalbpres. s.p.
4. _____.; AGUIRREZÁBAL, L. A. N.; RIZZALLI, R. H. 2000a. 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. 61-91.
5. _____.; ECHEVERRÍA, H. E.; GONZÁLEZ, N. S.; UHART, S. A. 2000b. 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. pp. 445-450.
6. ARGENTA, G.; FERREIRA, P. R.; BOTROLINI, C. G.; FORSTHOFER, E. L.; STREIDER, M. L. 2001. Relationship of reading of portable chlorophyll meter with contents of extractable chlorophyll and leaf nitrogen in maize. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*. 13(2): 158-167.
7. BARBAZÁN, M.; BAUTES, C.; BEUX, L.; BORDOLI, M.; CANO, J. D.; ERNST, O.; GARCÍA, A.; GARCÍA, F.; QUINCKE, A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay; rendimiento según análisis de suelo. *Agrociencia (Montevideo)*. 15(2): 93-99.
8. BARRACO, M.; DÍAZ ZORITA, M. 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en Hapludoles típicos. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 23(2): 197-203.

9. BARRENA, P. G. s.f. Evaluación de fertilización en maíz para grano; campaña 2010-11. (en línea). Río Colorado, Buenos Aires, CORFO. s.p. Consultado 23 ene. 2014. Disponible en <http://www.corforiocolorado.gov.ar/archivos/Evalualiconfertilizacionmaizgrano.pdf>
10. BAUER, P. J.; CARTER, P. R. 1986. Effect of seeding date, plant density, moisture availability, and soil nitrogen fertility on maize kernel breakage susceptibility. *Crop Science*. 26: 1220-1226.
11. BEEGLE, D. B.; DURST, P. T. 2003. Nitrogen fertilization of corn. Pennsylvania, Pennsylvania State Univeristy. 6 p.
12. BINDER, D. L.; SANDER, D. H.; WALTERS, D. T. 2000. Maize response to time of nitrogen application as affected by of nitrogen deficiency. *Agronomy Journal*. 92: 1228-1236.
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, A. M.; SCHEPERS, J. S. 1995. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertilization for corn. *Journal of Production Agriculture*. 8(1): 56-60.
15. BLANCO, H.; BOXLER, M.; MINTEGUIAGA, J.; HOUSSAY, R.; DEZAMARÍN, G.; BERARDO, A.; GARCÍA, F. 2004. Resultados de la campaña 2003/04; maíz. *Informaciones Agronómicas*. no. 23: 9-14.
16. 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.
17. BURMAN, R. D.; PAINTER, L. I.; PATRIDGE, J. L. 1962. Irrigation and nitrogen fertilization of field corn in Northwest Wyoming. University of Wyoming, Laramine. *Agricultural Experiment Station Bulletin*. no. 389. s.p.
18. BUNDY, L. G.; ANDRASKI, T. W. 1995. Soil yield potential effects on performance of soil nitrate tests. *Journal of Production Agriculture*. 8:561-568.

19. CAPURRO, J.; FRIORITO, C.; GONZÁLEZ, 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.
20. CERIANI, M.; INELLA, J. A. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano. Tesis Ing. Agr. Montevideo. Uruguay, Facultad de Agronomía. 66 p.
21. CERRATO, M. E.; BLACKMER, A. M. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal*. 82: 138-143.
22. CERVEÑANSKY, A. 2004. Azufre. Montevideo, Facultad de Agronomía. 26 p.
23. CIAMPIATTI, I. A.; BOXLER, M.; GARCÍA, F. 2012. Nutrición de maíz; requerimientos y absorción de nutrientes. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 48: 14-18.
24. CIRILO, A. G. 2004. Manejo de la densidad y distancia entre surcos en maíz. *IDIA XXI*. 6: 128-133.
25. DELGADO, R. 2002. Evaluación de crecimiento del maíz y absorción de nitrógeno bajo diversas condiciones de disponibilidad del elemento en un Mollisol de Venezuela. *Agronomía Tropical*. 52(1): 5-22.
26. DI FONZO, N.; MOTTO, M.; MAGGIORE, T.; SABATINO, R.; SALAMINI, F. 1982. N uptake, translocation and relationships among N related traits in maize as affected by genotype. *Agronomie*. 2: 789-796.
27. DI NAPOLI, M. 2001. Análisis comparado de deficiencias de nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en siembra directa. Monografía Especialista Programa de Post-Grado en Producción Vegetal. Balcarce, Argentina. FCA/INTA Balcarce. s.p.
28. DÍEZ-LÓPEZ, J. A.; HERNAIZ-ALGARRA, P.; ARAUZO-SÁNCHEZ, M.; CARRASCO-MARTÍN, I. 2008. Effect of nitrification inhibitor (DMPP) on nitrate leaching and maize yield during two growing seasons. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 6(2): 294-303.

29. DOBERMANN, A.; FAIRHURST, T. 2000. Rice; nutritional disorders and nutrient management. Singapur, International Rice Research Institute. 192 p.
30. ECHEVERRÍA, H. E.; SAINZ ROSAS, H. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno aplicado al estadio de 6 hojas del maíz bajo riego en siembra directa y labranza convencional. Balcarce, Unidad Integrada (INTA/Facultad de Ciencias Agrarias). pp. 57-66.
31. _____.; _____. 2005. Maíz. *In*: Echeverría, H. E.; García, F. O. eds. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Buenos Aires, INTA. pp. 255-282
33. ECK, H. V., 1984. Irrigation corn yield responses to nitrogen and water. *Agronomy Journal*. 76: 421-428.
33. FERRARI, M.; OSTOJIC, J.; VENTIMIGLIA, L.; CARTA, H.; FERRARIS, G.; RILLO, S.; DE GALLETO, M. L. R.; RIMATORI, F.; BERNASCORI, M. V. 2000. Predicción de la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada mediante indicadores de suelo y planta en el estado de seis hojas. *In*: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (17º., 2000, Mar del Plata, Buenos Aires). Actas. Buenos Aires, AACS (Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo). pp. 1-4.
34. FERRARIS, G. N.; COURETOT, L. A. 2006. Evaluación de diferentes dosis y momentos de aplicación de nitrógeno y su interacción con el azufre utilizando fuentes líquidas en el Norte de la provincia de Buenos Aires. *AAPRESID. Revista Técnica de Maíz*. sept.: 70-73.
35. _____.; _____.; TORIBIO, M. 2009. Pérdidas 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.
36. _____.; _____. 2011. Caracterización y evaluación comparativa de maíz en la localidad de Colón (Bs As). Campaña 2010/2011. Pergamino, INTA. Área de Desarrollo Rural/CERBAN. pp. 37-43.
37. FOX, R. H.; KERN, J. M.; PIEKIELEK, W. P. 1986. Nitrogen fertilizer source, and method and time of application effects on no-till corn yields and nitrogen uptakes. *Agronomy Journal*. 78:741-746.

38. _____.; PIEKKIELEK, W. P. 1992. Use of a Chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen. *Agronomy Journal*. 84(1): 59-65.
39. GALLAIS, A.; HIREL, B. 2004. An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize. *Journal of Experimental Botany*. 55: 295-306.
40. GARCÍA, F. 1996. El ciclo de nitrógeno en ecosistemas agrícolas. INTA. Boletín Técnico. no. 140. 15 p.
41. _____. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. In: *Maíz (2005, Rosario, Santa Fé)*. Capacitación agropecuaria. Acassuso, Buenos Aires, INFOPOS/PPI/PPIC Cono Sur. 18 p.
42. _____.; ESPINOSA, J. 2009. Efecto del fraccionamiento de nitrógeno en la productividad y en la eficiencia agronómica de macronutrientes en maíz. *Informaciones Agronómicas*. no. 72:1-5.
43. _____; _____. 2010. Relación del índice de verdor con la aplicación de nitrógeno en diez híbridos de maíz. (en línea). *El Cerealista*. 38(1): 29-36. Consultado 19 ene. 2014. Disponible en http://fenalce.org/arch_public/tecnolog92.pdf
44. GASSER, J. K. R.; PEACHEY, J. E. 1964. A note on the effects of some soil sterilants on the mineralization and nitrification of soil-nitrogen. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 15 (3): 142-146.
45. GIMÉNEZ, L. 2012. Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia (Montevideo)*. 16(2): 92-102.
46. GUDELJ, V.; VALLONE, P.; GALARZA, C.; GUDELJ, O.; LORENZÓN, C.; MASIERO, B. 2004. Resultados del ciclo 2003/2004; EEA Marcos Juárez. INTA EEA Marcos Juárez. *Información para Extensión*. 88 (1): 1-7.
47. HANWAY, J. J. 1962. Corn growth and composition in relation to soil fertility. II. Uptake of N, P, and K and their distribution in different plant parts during the growing season. *Agronomy Journal*. 54 (3): 217-222.
48. HOFFMAN, E.; SIRI, G.; ERNST, O. 1996. Posibles manejos para minimizar pérdidas de nitrógeno. *Cangüé*. no. 8: 13-16.

49. JEMISON, J. M.; LYTLE, D. E. 1996. Field evaluation of two nitrogen testing methods in Maine. *Journal of Production Agriculture*. 9: 108-113.
50. JOKELA, W. E.; RANDALL, G. W. 1989. Corn yield and residual soil nitrate as affected by time and rate of nitrogen application. *Agronomy Journal*. 81(5): 720-726.
51. JUNG, J. R.; PERTERSON, I. A.; SCHRADER, I. E. 1972. Response of irrigated corn to time, rate and source of applied nitrogen on sand soils. *Agronomy Journal*. 64(5): 668-670.
52. LEMCOFF, J. H.; LOOMIS, R. S. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop Science*. 26: 1017-1022.
53. MA, B. L.; SUBEDI, K. D.; COSTA, C. 2005. Comparison of crop-based indicators with soil nitrate test for corn nitrogen requirement. *Agronomy Journal*. 97: 462-471.
54. MCINNES, K. J.; FERGUSON, R. B.; KISSEL D. E.; KANEMASU E. T. 1986. Field measurements of ammonia loss from surface applications of urea solutions to bare soil. *Agronomy Journal*. 78 (1): 192-196.
55. MELCHIORI, R. J. M.; CAVIGLIA, O. P.; BIANCHINI, A. 2006. Actualización técnica de maíz; Momentos de fertilización nitrogenada en maíz en el centro oeste de Entre Ríos. INTA Entre Ríos. Extensión no. 41: 29-33.
56. MOLL, R. H.; KAMPARTH, E. J.; JACKSON W. A. 1987. Development of nitrogen efficient prolific hybrids of maize. *Crop Science*. 27 (2): 181-186.
57. MORÓN A.; BAETHGEN W. 1996. Relevamiento de la fertilidad de los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Montevideo, INIA. 15 p. (Serie Técnica no. 73).
58. MUCHOW, R. C.; DAVIS, R. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crop Research*. 18(1): 17-30.
59. OTEGUI, M.; BONHOME, R. 1998. Grain yield components for different maize genotypes. *Agronomy Journal*. 87:29-33.

60. _____.; SATORRE, E. H.; BENECH, R. L.; SLAFER G. A.; DE LA FUENTE, E. B.; MIRALLES, D. J.; SAVIN, R. 2003. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Facultad de Agronomía. pp. 135-157.
61. PEDROL H. M.; CASTELLARÍN J. M.; 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. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 40: 17-20.
62. 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: Reunião Brasileira de Fertilidade de Solo e Nutrição (13º., 1998, s.l.). Trabalhos apresentados. s.n.t. p. 337.*
63. _____.; CARDELLINO, G. 2007. Respuesta de maíz a fertilizaciones definidas con diferentes criterios de recomendación. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 33: 17-24.
64. _____.; BARBAZÁN, M.; DURÁN MONZONI, J. M. 2008. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.
65. _____.; HOFFMAN, E. M. 2011. Manejo de nitrógeno en maíz; actualidad y perspectivas. *In: Simposio Nacional de Agricultura (2º, 2011, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 61-75.*
66. POZZI, 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.
67. REEVES, D. W.; TOUCHTON, J. T. 1986. Subsoiling for nitrogen applications to corn grown in a conservation tillage system. *Agronomy Journal*. 78(5): 921-926.
68. RENGEL, M. L. 2004. Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en maíz (*zea mays* L.) en Venezuela. *Informaciones Agronómicas*. 53: 5-8.
69. ROTH, G. W.; FOX, R. H.; IVERSEN, K. V.; PIEKIELEK, W. P. 1989. Soil and tissue nitrate tests compared for predicting nitrogen availability to corn. *Agronomy Journal*. 81(6): 971-974.

70. RUIZ, R.; SATORRE, E.; MADDONI, G.; CALDERINI, D.; MIRALLES, D.; CARCOVA, J.; DI NAPOLI, M. 1997. Bases funcionales de la respuesta a la fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en el Norte de la provincia de Buenos Aires. In: Congreso Nacional de Maíz (6°. 1997, Pergamino, Buenos Aires). Actas. Buenos Aires, AINBA. cap. 2, pp. 121-128.
71. SAINZ ROSAS, H.; ECHEVERRÍA H. E. 1998. Relación entre las lecturas del medidor 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.
72. _____.; ECHEVERRÍA, H. E.; STUDDERT, G. A.; ANDRADE, F. H. 1999. No-till maize N uptake and yield; effect of urease inhibitor and application time. *Agronomy Journal*. 91: 950-955.
73. _____.; CALVIÑO P. A.; ECHEVERRÍA H. E.; BARBIERI P. A.; REDOLATTI M. 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to the reliability of planting or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agronomy Journal*. 100(4): 1020-1025.
74. SALVAGIOTTI, F.; PEDROL, H.; CASTELLARÍN, J.; CAPURRO, J.; FELIZIA, J.; GARGICEVICH, A.; GENTILE, O.; MÉNDEZ, J.; TRENTINO, N. 2002a. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz; I Relación entre la respuesta al rendimiento y la disponibilidad de N a la siembra. *INTA Oliveros. Para Mejorar la Producción*. 20: 67-70.
75. _____.; PEDROL, H.; CASTELLARÍN, J. 2002b. Diagnóstico 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. *INTA Oliveros. Para Mejorar la Producción*. 20: 71-74.
76. SÁNCHEZ, M. A.; MUÑOZ, S. J. 2008. Fertilización nitrogenada de maíz en el sudeste de Córdoba. *Informaciones Agronómicas*. no. 39: 20-22.
77. SATORRE, M.; MERCAU, J.; OTEGUI, M.; MADDONI, G.; CARCOVA, J.; RUIZ, R.; URIBELARREA, M.; MENÉNDEZ, F. 2001. Evaluación a campo del comportamiento del modelo CERES en cultivos de maíz del norte de la provincia de Buenos Aires. In: Congreso Nacional de Maíz (7°. 2001, Buenos Aires). Actas. Pergamino, Buenos Aires, AIANBA. pp. 5-8

78. SCHARF, P. C.; WIEBOLD, W. J.; LORY, J. A. 2002. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. *Agronomy Journal*. 94: 435-441.
79. SCHROEDER, J. J.; NEETSON, J. J.; OENEMA, O.; STRUIK, P. C. 2000. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. *Field Crops Research*. 66: 151-154.
80. SHIPLEY, J.; WALKER, H. J.; REIGER, C.; PIETSCH, D. 1977. Corn Hybrid performance. Etter, Texas, Texas A & M University System. Texas Agricultural Experiment Station. 14 p.
81. SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. 2008. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agronomy Journal*. 100(3): 571-579.
82. STANFORD, G. 1973. Rationale for optimum Nitrogen fertilization in corn production. *Journal of Environmental Quality*. 2 (2): 159-166.
83. STECKER, J. A.; BUCHHOLZ, D. D.; HANSON, N. C.; WOLLENHAUPT, N. C.; MCVAY, K. A. 1993. Application placement and timing of nitrogen solution for no-till corn. *Agronomy Journal*. 85(3): 645-650.
84. SUNDERMAN, H. D.; PONTIUS, J. S.; LAWLESS, J. R. 1997. Variability in leaf chlorophyll concentration among fully fertilized corn hybrids. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 28: 1793-1803.
85. TEYKER, R. H.; MOLL, R. H.; JACKSON, W. A. 1989. Divergent selection among maize seedling for nitrate uptake. *Crop Science*. 29: 879-884.
86. TORRES DUGAN, M. s.f. Fertilización nitrogenada del cultivo de maíz. (en línea). Pergamino, INTA. s.p. Consultado 15 jul. 2012. Disponible en <http://www.fertilizando.com/articulos/Fertilizacion%20Nitrogenada%20del%20Cultivo%20de%20Maiz.asp>.
87. 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.
88. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES ESTADÍSTICAS

AGROPECUARIAS. 2013. Anuario estadístico agropecuario 2013. Montevideo. pp. 84-100.

89. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). 2014. World agricultural supply and demand estimates – 11 September. Washington. 40 p.
90. VALENZUELA, O. R.; ARIÑO, P. A. 2000. Evaluación del estado nutricional del cultivo de maíz a través del diagnóstico foliar. In: Congreso Argentino de Ciencia del Suelo (17°. 2000, Mar del Plata). Actas. Mar del Plata, Buenos Aires, AACS. pp. 10-17.
91. WASKOM, R. M.; WESTFALL, D. G.; SPELLMAN, D. E.; SOLTANPOUR, D. N. 1996. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 27: 545-560.

9. ANEXOS

Cuadro Resumen de Contrastes para el Sitio 1

F de V	gl	Rendimiento		Pl.m2		esp.planta		esp.m2		Rdto.esp	
		CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor
Bloque	2	4484503,11	0,0001	2	0,1761	2,00E-03	0,7969	1,6	0,139	495,94	0,0053
Tratamiento	7	6847972,25	0,0046	7	0,5419	0,05	0,0037	2,09	0,0385	416,09	0,0016
C1	1	25083474,4	<0.0001	0,04	0,7449	0,09	0,0065	3,08	0,0547	1461,18	0,0003
C2	1	18666824,5	0,0001	0,03	0,7894	0,02	0,1249	1,58	0,1555	472,17	0,0158
C3	1	8808991,82	0,0014	0,39	0,3137	0,27	0,0001	9,99	0,002	1014,19	0,0013
C4	1	6531887,67	0,004	0,09	0,6332	4,40E-04	0,8249	3,50E-03	0,9445	225,24	0,0778
C5	1	10862557,6	0,0006	0,16	0,5153	0,01	0,2324	1,61	0,1516	688,13	0,0053
C6	1	30113,95	0,8163	0,6	0,2179	1,70E-03	0,667	1,33	0,1904	323,39	0,0391
Error	14	535830,45		0,36		0,01		0,7		61,43	
CV exp.		8,44		8,54		8,23		10,66		7,24	

Cuadro Resumen de Contrastes para el Sitio 2

F de V	gl	Rendimiento		Pl.m2		esp.planta		esp.m2		Rdto.esp	
		CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor
Bloque	2	1059217,15		0,31	0,0173	5,00E-02	0,0048	0,62	<0,0001	24,29	0,6203
Tratamiento	7	7318883,08		0,2	0,0232	0,17	<0,0001	6,05	<0,0001	38,58	0,6095
C1	1	27019752,1	<0.0001	0,04	0,4284	0,69	<0,0001	19,18	<0,0001	156,68	0,0985
C2	1	24730293,5	<0.0001	1,31	0,0004	0,00054	0,7547	3,13	0,0057	0,28	0,9406
C3	1	10866196,3	0,0002	0,25	0,0542	0,8	<0,0001	17,9	<0,0001	109,19	0,1607
C4	1	1173550,38	0,0991	0,3	0,0376	1,00E-01	0,0008	7,39E+00	0,0002	70,54	0,2527
C5	1	3151602,79	0,0126	0,01	0,7059	0,00057	0,7474	0,06	0,6585	92,35	0,1943
C6	1	3068043,72	0,0136	0	>0,9999	1,80E-01	0,0001	5,59	0,0007	41,87	0,3728
Error	12	367180,3		0,05		0,01		0,28		48,85	
CV exp.		7,23		4,1		4,95		6,34		6,95	

Cuadro Resumen de Contrastes para el Sitio 3

F de V	gl	Rendimiento		Pl.m2		esp.planta		esp.m2		Rdto.esp	
		CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor
Bloque	2	205802,75	0,0001	0,06	0,7757	3,60E-04	0,8065	0,03	0,8519	37,21	0,8235
Tratamiento	7	4785715,57	0,0002	0,21	0,4921	0,01	0,0197	0,38	0,0818	927,37	0,0024
C1	1	25687956,2	<0.0001	0,2	0,3583	0,01	0,0144	1,13	0,0192	5199,71	<0,0001
C2	1	17640184,8	<0.0001			0,03	0,0007	0,93	0,0312		
C3	1	6687388,05	0,0026			0,0017	0,3215	0,19	0,3109		
C4						1,40E-03	0,373	1,00E-02	0,8057		
C6	1	201491,5	0,5564	0,08	0,5507					30,08	0,6947
C7	1	801261,32	0,2468								
Error	20	562903,08		0,22		0,0017		0,17		189,76	
CV exp.		14,48		8,12		3,99		7,03		15,83	

Cuadro resumen de Contrastes de evolución de lecturas Sitio 1

F de V	gl	%N hoja		Minolta SPAD 502		LCC	
		CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor
Bloque	2	0,16	0,1237	0,49	0,0003	1,80E-01	0,062
Tratamiento	5	0,6	0,0013	62,45	0,8982	0,56	0,0007
C1	1	33,83	<0.0001	225,82	<0.0001	122,37	<0.0001
C4	1	0,03	0,5085	0,96	0,6559	0	>0.9999
C2	1	1,31	0,0009	217,62	<0.0001	1,78	0,0001
C3	1	0,35	0,0374	41,2	0,0131	8,80E-01	0,0018
Error	10	0,06		4,55		0,05	
CV exp.		11,19		5,57		5,70E+00	

Cuadro resumen de Contrastes de evolución de lecturas Sitio 2

F de V	gl	%N hoja		Minolta SPAD 502		LCC	
		CM	p valor	CM	p valor	CM	p valor
Bloque	2	0,01	0,8508	1,4	<0.0001	4,00E-02	0,0018
Tratamiento	5	0,35	0,0075	109,74	<0.0001	0,42	0,3953
C1	1	1,25	0,0009	476,26	<0.0001	1,67	0,0001
C4	1	0,01	0,6981	4	0,237	0,03	0,4053
C2	1	1	0,0019	165,11	<0.0001	1,55	0,0002
C3	1	0,19	0,0917	95,75	0,0002	3,90E-01	0,0134
Error	9	0,05		2,49		0,04	
CV exp.		8,62		3,58		5,20E+00	

Regresiones de tendencia de lecturas de indicadores en V10-11

SITIO 1

Análisis de regresión lineal								Análisis de regresión lineal								Análisis de regresión lineal							
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC		Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC		Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC	
SPAD S1	14	0,69	0,66	10,89	72,67	74,58		LCC S1	14	0,56	0,52	0,17	14,07	15,99		%N hoja	14	0,58	0,54	0,15	13,45	15,36	
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados								Coeficientes de regresión y estadísticos asociados								Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMall	Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	32,19	1,33	29,3	35,07	24,29	<0,0001		const	3,35	0,16	2,99	3,7	20,47	<0,0001		const	1,6	0,16	1,25	1,95	9,99	<0,0001	
Dosis	0,05	0,01	0,03	0,08	5,15	0,0002	25,57	N a V6 S	0,01	1,30E-03	2,20E-03	0,01	3,87	0,0022	14,91	N a V6 S1	0,01	1,30E-03	2,40E-03	0,01	4,06	0,0016	16,29
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)								Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)								Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)							
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor			F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor			F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor		
Modelo	211,97	1	211,97	26,53	0,0002			Modelo	1,82	1	1,82	14,98	0,0022			Modelo	1,92	1	1,92	16,48	0,002		
Dosis	211,97	1	211,97	26,53	0,0002			N a V6 S	1,82	1	1,82	14,98	0,0022			N a V6 S1	1,92	1	1,92	16,48	0,002		
Error	95,88	12	7,99					Error	1,46	12	0,12					Error	1,4	12	0,12				
Total	307,85	13						Total	3,28	13						Total	3,31	13					

SITIO 2

Análisis de regresión lineal								Análisis de regresión lineal								Análisis de regresión lineal							
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC		Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC		Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC	
SPAD S2	14	0,71	0,69	17,6	79,23	81,15		LCC S2	14	0,66	0,63	0,09	5,61	7,52		%N hoja	14	0,64	0,61	0,07	1,47	3,38	
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados								Coeficientes de regresión y estadísticos asociados								Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMall	Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	36,47	1,6	32,99	39,96	22,82	<0,0001		const	3,46	0,12	3,21	3,71	30,01	<0,0001		const	2,24	0,1	2,02	2,46	22,53	<0,0001	
N a V6 S2	0,07	0,01	0,04	0,1	5,44	0,0001	28,44	N a V6 S	4,60E-03	9,60E-04	2,60E-03	0,01	4,85	0,0004	22,77	N a V6 S2	3,80E-03	8,30E-04	2,00E-03	0,01	4,61	0,0006	20,66
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)								Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)								Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)							
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor			F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor			F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor		
Modelo	378,57	1	378,57	29,65	0,0001			Modelo	1,56	1	1,56	23,5	0,0004			Modelo	1,05	1	1,05	21,21	6E-04		
N a V6 S2	378,57	1	378,57	29,65	0,0001			N a V6 S	1,56	1	1,56	23,5	0,0004			N a V6 S2	1,05	1	1,05	21,21	6E-04		
Error	153,24	12	12,77					Error	0,8	12	0,07					Error	0,59	12	0,05				
Total	531,82	13						Total	2,36	13						Total	1,64	13					