

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**ALTERNATIVAS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ BAJO
RIEGO POR PIVOTE
CENTRAL**

por

Juan Manuel ERNST ROMERO

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias
opción Suelos y Aguas

Montevideo
URUGUAY
Noviembre 2020

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing Agr. Ph. D.Carlos Perdomo, Ing Agr. Dr.Claudio García e Ing. Agr. Dr. Luis Giménez, el 27 de noviembre de 2020.
Autor/a: Ing. Agr. Juan Manuel Ernst. Directora Dra. Lucía Puppo Collazo.

AGRADECIMIENTOS

A la Ing. Agr. Dra. Lucía Puppo por su gran dedicación, compromiso y permanente disposición durante toda la tesis.

Al Ing. Agr. Andrés Beretta y a la Ing. Agr. Ph. D. Mónica Barbazán por sus sustanciales aportes de conocimiento y experiencia de trabajo.

A todos los funcionarios del Departamento de Suelos y Aguas de Facultad de Agronomía que colaboraron con mucho entusiasmo en las diferentes etapas del desarrollo del trabajo.

A Soledad Arocena, Alejandro Brancatto y Matías Cardozo por su aporte fundamental en la implementación práctica del experimento.

Al Ing. Agr. Leonardo Cabrera de Petrobras, por el aporte de material para el experimento y su constante disposición.

Al personal de Biblioteca por el gran apoyo en la búsqueda de información y corrección del documento.

Agradezco a mi familia y amigos por estar siempre.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>.....	1
1.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL FERTIRIEGO...2	
1.1.1. <u>Conductividad eléctrica y pH</u>.....2	
1.1.2. <u>Compatibilidad y dosis máxima de fertilizante</u>.....3	
1.1.3. <u>Ventajas y desventajas del fertirriego</u>.....4	
1.2. ALTERNATIVAS DE FERTILIZACIÓN4	
1.2.1 <u>Fertilización del maíz</u>.....4	
1.2.2 <u>Fraccionamiento de la fertilización</u>.....6	
1.2.3 <u>Fertilización del maíz en Uruguay</u>.....8	
1.3. EL CULTIVO DE MAÍZ.....9	
1.3.1 <u>Desarrollo y crecimiento</u>.....9	
1.3.2 <u>Nutrición nitrogenada</u>.....12	
1.3.3 <u>Monitoreo del estado nitrogenado</u>.....14	
1.4. INDICADORES PRODUCTIVOS.....17	
1.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PARÁMETROS HÍDRICOS DEL	
SUELO.....18	
1.6 BALANCE HÍDRICO.....21	
1.7. OBJETIVO E HIPÓTESIS.....23	
1.7.1 <u>Objetivo general</u>.....23	
1.7.2 <u>Hipótesis</u>.....23	

2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	24
2.1. CARACTERÍSTICAS DEL EXPERIMENTO	24
2.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	25
2.2.1 <u>Tratamientos</u>	25
2.3. MANEJO DEL RIEGO	28
2.4. DETERMINACIONES REALIZADAS	30
2.5. ANÁLISIS DE DATOS	31
3. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	34
3.1 ANÁLISIS DE SUELO	34
3.2 ANÁLISIS DE SOLUCIÓN CONCENTRADA	36
3.3 SITUACIÓN HÍDRICA	37
3.4 PRODUCCIÓN DE MAÍZ	42
3.4.1. <u>Producción de biomasa</u>	42
3.4.2. <u>Producción de grano</u>	44
3.4.3. <u>El Nitrógeno como limitante</u>	48
3.4.4. <u>Diagnóstico por color de imagen</u>	53
4. <u>CONCLUSIONES</u>	56
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	57
6. <u>ANEXOS</u>	82
6.1 ALTERNATIVAS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ BAJO RIEGO POR PIVOT CENTRAL	82
6.2 ANEXOS DE CUADROS Y FIGURAS	100

RESUMEN

El maíz presenta alta sensibilidad a la deficiencia hídrica y nitrogenada. En Uruguay se ha incrementado el riego con pivote central, sin embargo aún existe la necesidad de generar conocimiento acerca de prácticas de fertilización que permitan expresar potenciales de rendimiento superiores con este sistema de riego de alta frecuencia. El objetivo del estudio fue estudiar estrategias de fertilización con nitrógeno (N) en maíz regado. Se instaló un experimento con 5 tratamientos: T0, sin fertilización nitrogenada; C0, fertilización en cobertura con 150 kg.ha⁻¹ N en tres hojas (V3) y siete hojas (V7) de estado de desarrollo; F1, ídem a “C0” pero con fertilizante diluido en agua; F2, 150 kg.ha⁻¹ N como fertilizante diluido en agua, fraccionado semanalmente desde V3 hasta estado reproductivo (R1); F3, ídem a “F2” pero con 225 kg.N.ha⁻¹. Se manejó el riego a partir de un balance hídrico y se midió la humedad en el suelo con sonda FDR. Se evaluó rendimiento en grano a cosecha y en los estados V3, V6, R1 y madurez fisiológica (R6) se evaluó la biomasa y el contenido de nitrógeno. En el estado R1 se tomó una foto aérea del cultivo y se analizó la correlación entre los valores de color e Índice de Color (InCol) con los siguientes parámetros: %N; biomasa; Índice de Suficiencia de Nitrógeno (ISN); y rendimiento de grano (kg.ha⁻¹). El rendimiento fue superior en el tratamiento con mayor dosis de N, sin que se detectaran diferencias significativas. No se encontraron diferencias entre las fuentes de N (urea azufrada y Fertec®) para las variables evaluadas. La estrategia de fertilizar semanalmente incrementó la producción de biomasa y el rendimiento de grano con respecto a la fertilización en dos momentos, aunque no se detectaron diferencias significativas. En V6 se constató disminución de la producción de grano cuando el déficit fue mayor a 24 kg.N.ha⁻¹ absorbido, mientras que en R1 el descenso de rendimiento comenzó con un déficit de absorción de 11 kg.N.ha⁻¹. Se obtuvo alta correlación entre los colores e InCol y las variables del cultivo analizadas. La herramienta se utilizó en un estadio tardío del cultivo como para ser de utilidad en la corrección de la fertilización.

Palabras clave: insuficiencia de nitrógeno, frecuencia de fertilización, productividad del agua.

Alternatives of nitrogen fertilization in corn under central pivot irrigation

SUMMARY

Corn shows high sensitivity to water and nitrogen (N) deficiency. In Uruguay, central pivot irrigation has increased, however there is still a need to generate knowledge about fertilization practices that allow higher yield potentials performances with this high-frequency irrigation system. The objective of the study was to study fertilization strategies with N in irrigated corn. An experiment with 5 treatments was installed: T0, without N fertilization; C0, broadcast fertilization with 150 kg.ha⁻¹ N in three leaves (V3) and seven leaves (V7) of development stage; F1, the same as "C0" but with fertilizer diluted in water; F2, 150 kg.ha⁻¹ N as fertilizer diluted in water, fractionated weekly from V3 to reproductive stage (R1); F3, idem to "F2" but with 225 kg.N ha⁻¹. Irrigation was managed from a water balance and soil moisture was measured with an FDR probe. The grain yield was evaluated at harvest and in the states V3, V6, R1 and physiological maturity (R6) the biomass and nitrogen content were evaluated. In state R1, an aerial photo of the culture was taken and the correlation between the color values and Color Index (InCol) was analyzed with: % N; biomass; Nitrogen Sufficiency Index (NSI) and grain yield (kg.ha⁻¹). The performance was superior in the treatment with the highest dose of N, without significant differences being detected. No differences were found between the sources of N (sulfur urea and Fertec®) for the variables evaluated. The strategy of fertilizing weekly increased biomass production and grain yield with respect to fertilization in two moments, although no significant differences were detected. In V6, a decrease in grain production was observed when the deficit was greater than 24 kg.N.ha⁻¹ absorbed, while in R1 the decrease in yield began with an absorption deficit of 11 kg.N.ha⁻¹. A high correlation was obtained between colors and InCol and the crop variables analyzed. The tool was used at a late stage of the crop to be useful in correcting fertilization.

Keywords: nitrogen insufficiency, fertilization frequency, water productivity.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz es el cereal con mayor producción anual en el mundo (FAO, 2018). La zona de producción está muy extendida y abarca diversos ambientes (Morceli, 2014). En Uruguay la siembra de maíz abarca aproximadamente cien mil hectáreas cada año, presentando rendimientos promedio que no superan los 6000 kg.ha⁻¹ (MGAP. DIEA, 2017). En la zafra 2015-2016, el cultivo presentó un rendimiento promedio bajo riego de 8546 kg.ha⁻¹, un 46% más que el rendimiento en secano. Sin embargo el rendimiento potencial del maíz bajo riego en Uruguay es de 15000 kg.ha⁻¹ (Giménez, 2012), por lo que la brecha tecnológica aún es amplia (MGAP. DIEA, 2016a).

En Uruguay, la principal limitante del rendimiento en cultivos de verano es la disponibilidad hídrica. Si bien las condiciones son de alta variabilidad interanual de lluvias, generalmente se presenta déficit hídrico coincidente con el período crítico de los cultivos, debido a los mayores valores de evapotranspiración del año y a la baja capacidad de almacenaje de agua de los suelos (Sawchik y Ceretta, 2005; Giménez y García-Petillo, 2011; Castaño et al., 2011). Desde hace aproximadamente 15 años se viene produciendo una expansión de cultivos extensivos regados, coincidiendo con la cantidad de pivotes centrales importados, que fueron 51 en el año 2000 y 422 en el año 2015 (MGAP. DGRN, 2016). A pesar de la mencionada expansión, excluyendo al cultivo de arroz, la superficie bajo riego representa aún el 2% del total sembrado incluyendo los cultivos de soja, maíz y sorgo (MGAP. DIEA, 2016b). En la zafra 2015-2016 la superficie regada de maíz fue de 10242 ha, un 12% del total sembrado de dicho cultivo (MGAP. DIEA, 2016a). El desarrollo del riego en cultivos extensivos ha sido impulsado recientemente por políticas de estado, no solo para aumentar la producción y competitividad del sector agrícola y ganadero, sino también para mejorar la adaptación a la variabilidad y al cambio climático y contribuir al desarrollo del sector agropecuario (MGAP, 2017).

Además de la alta sensibilidad a deficiencias hídricas, otro factor limitante del rendimiento del maíz son sus altos requerimientos nutricionales (Ciampitti y García, 2008). Si bien existen distintas estrategias de fertilización asociadas al riego, como es el fertirriego (Cadahía, 2005; Lamm y Schlegel, 2000), en Uruguay falta información para optimizar la fertilización en sistemas de riego de alta frecuencia como los pivotes centrales.

1.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL FERTIRIEGO

El fertirriego permite sincronizar la aplicación de fertilizantes con la absorción de nutrientes por los cultivos, logrando mayor eficiencia en la aplicación (Sampathkumar y Pandian, 2010). Esta técnica ha estado asociada a métodos de riego de alta frecuencia y alto coeficiente de uniformidad, por lo cual ha sido desarrollada en sistemas de riego localizado como riego por goteo, por micro aspersores o micro jet. (Burt et al., 1998).

1.1.1. Conductividad eléctrica y pH

Antes de realizar una disolución de fertilizantes se recomienda efectuar un análisis del agua de riego, para conocer su calidad y concentración de nutrientes (Urrestarazu, 2004).

Se estima que el valor crítico de CE en maíz es de $1,7 \text{ mS cm}^{-1}$ (Cramer, 1994), y puede experimentar pérdidas de 10% de rendimiento si la solución del suelo tiene un valor de CE mayor a $2,5 \text{ mS cm}^{-1}$. Esta condición ocurre con frecuencia en zonas bajo riego (Lafitte, 1996). Cicek y Cakirlar (2002) encontraron que con potenciales osmóticos de la solución nutritiva de entre $-0,8$ y $-0,5 \text{ MPa}$ a causa del aumento de salinidad disminuye la longitud de brote durante la germinación en maíz, así como la producción de materia seca.

El incremento de la CE puede causar marchitamiento a muy altos valores (Urrestarazu, 2004). El estrés osmótico que puede causar la salinidad en exceso reduce el consumo de agua y de nutrientes, aunque es más afectada la absorción de elementos minerales (González-Real, 1996). Los altos valores de CE no solo alteran el equilibrio nutricional de las plantas, sino que además resultan en reducciones de rendimiento (Stanghellini et al., 1998).

La solución de agua de riego y fertilizante debe ser de un pH de entre 5,5 y 6 (Urrestarazu, 2004). Algunos fertilizantes salinos pueden elevar el pH produciendo precipitaciones del catión Calcio y produciendo obstrucciones en riego por goteo. Si la disolución del fertilizante descende el pH se evitan obstrucciones y sirve para la limpieza de la instalación de riego (Urrestarazu, 2004; Cadahía, 2005).

1.1.2. Compatibilidad y dosis máxima de fertilizante

Los fertilizantes deben ser solubles en agua para obtener en dilución todos los elementos contenidos. Se debe tener en cuenta la compatibilidad entre fertilizantes utilizados en la disolución y con el agua de riego.

Se debe preparar una disolución concentrada (solución madre) de modo que al mezclarse con el agua de riego, se aplique en la concentración deseada al cultivo.

Es posible la preparación de la disolución con fertilizantes sólidos fácilmente solubles o con fertilizantes líquidos, que se adquieren listos para su uso. Se debe considerar que los fertilizantes sólidos a utilizar deben ser tanto solubles en agua como compatibles químicamente (Shani, 1981).

1.1.3. Ventajas y desventajas del fertirriego

Algunas de las ventajas que mencionan distintos autores acerca del fertirriego son: la posibilidad de ahorro de fertilizante, la mejor distribución en el perfil del suelo, la rapidez de respuesta, más económico y de fácil uso (Threadgill, 1985; Lamm y Schlegel, 2000; Sampathkumar y Pandian, 2010). Burt et al. (1998) enfatizan además, la importancia de la uniformidad del riego, debido a que no solo se está aplicando agua sino que también fertilizante. Por otra parte, se presentan como desventajas las posibles obturaciones y corrosión en los equipos, el aumento de salinidad del suelo, la obligación de regar para fertilizar y un mayor costo inicial de los insumos. (Cadaña, 2005; Shani, 1981).

1.2. ALTERNATIVAS DE FERTILIZACIÓN

1.2.1 Fertilización del maíz

Debido a la globalización tecnológica (Luthans et al, 2012) los principios científicos de manejo del Nitrógeno son los mismos en todo el mundo, sin embargo su variación radica en la manera en que se llevan a la práctica, atendiendo las condiciones específicas de suelo, cultivo, clima, tiempo, económicas y sociales (Correndo y García, 2012a).

Los principios científicos asociados al manejo de nutrientes se refieren a asegurar la oferta balanceada de nutrientes y la demanda del cultivo. Se debe evaluar la dinámica de absorción del cultivo y el aporte del suelo, determinando los momentos de riesgo de pérdidas y reconociendo los patrones de distribución de las raíces y de la variabilidad espacial (Bruulsema, 2009).

El análisis de suelo con fines de diagnóstico de fertilidad tiene como objetivo proveer un índice de disponibilidad de nutriente en el suelo, predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización, como herramienta para efectuar recomendaciones de

fertilización (García y Ciampitti, 2010; Gutiérrez Boem et al., 2005; Havlin et al., 2005). El análisis de suelo es el enfoque más utilizado a nivel mundial, sin embargo existen otras metodologías como por ejemplo otros indicadores de suelo, análisis de planta, requerimientos de nutrientes y modelos de simulación que son propuestas en forma alternativa o complementaria para la mejora de los diagnósticos (Janssen et al., 1990; Satorre et al., 2005; Melchiori, 2012; Shanahan et al., 2008, Correndo y García, 2012b).

De acuerdo a Fontanetto y Keller (2004), para las recomendaciones de fertilización se puede tener en cuenta el parámetro de Nitratos (N-NO_3^-) a siembra y/o a seis hojas (V6) hasta los 60 cm de profundidad del suelo, así como parámetros de planta como el rendimiento objetivo. Los mismos autores expresan que se debe considerar la forma en que se aplican los fertilizantes, porque al incorporarlos al suelo se reducen las pérdidas por volatilización con respecto a la fertilización en cobertura, así como con la fuente utilizada, ya que fertilizantes líquidos pueden presentar menores pérdidas por volatilización que los sólidos. A su vez, se debe tener en cuenta el cultivo antecesor, debido a que afecta la disponibilidad de agua y de N al momento de la siembra de maíz (Fontanetto y Keller, 2004).

En la aplicación de fertilizantes se deben minimizar las pérdidas de nutriente y de esta forma maximizar la eficiencia de uso de N (Espinosa y García, 2009). Una de las alternativas que permite lograr mayor rendimiento en grano y eficiencia en el uso del N es su fraccionamiento, ya que de esta forma se aumenta la sincronización entre aplicación y demanda de nutrientes del cultivo (García y Espinosa, 2009)

1.2.2 Fraccionamiento de la fertilización

En una investigación desarrollada en Colombia en 16 sitios de diferente potencial de rendimiento se demostró el efecto del fraccionamiento de N en rendimiento de grano y Eficiencia Agronómica (EA) de N, fósforo (P) y potasio (K) (García, 2009). Se probaron dos fraccionamientos dobles de la dosis total de Urea granulada, a siembra y a V6 y dos fraccionamientos triples fertilizando en los dos estadios mencionados y también en V10. Los mayores valores de rendimiento y EA de los fraccionamientos triples con respecto a los dobles fueron atribuidos a que las aplicaciones de N coincidieron con las etapas fisiológicas de mayor demanda.

Sampathkumar y Pandian (2010) destacan al fertirriego como una tecnología que permite ahorrar fertilizante, aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes (N, P y K) y el rendimiento de los cultivos. Los mismos investigadores en un experimento de maíz localizado en una región seca del norte de India, obtuvieron los mayores rendimientos dosificando los fertilizantes en el riego cada 6 y 12 días, comparado con la aplicación de la totalidad de la dosis al voleo en tres hojas. Estos autores observaron que las dosificaciones cada 6 y 12 días, se adecuaron mejor al patrón de extracción de nutrientes del cultivo. A su vez, Ramulu et al. (2010) en un experimento de fertirriego en maíz en una localidad seca de India, obtuvieron significativamente mayor rendimiento y productividad del agua aplicando fertirriego con N, P y K cada 8 días con respecto a la utilización de fertilizantes sólidos aplicados en cobertura a la siembra. Los resultados podrían explicarse por el aumento en la dinámica de nutrientes en la zona radicular (Mmolawa y Or, 2000; Ramah, 2010).

Gascho y Hook (1991), en Georgia (Estados Unidos) aplicando fertilizantes semanalmente mediante el riego utilizando aspersores obtuvieron mayores rendimientos que con la fertilización convencional en dos momentos: 25 % de la dosis a la siembra y 75 % en 6 hojas. Los mismos autores explican que esta situación se produce porque se reduce la pérdida potencial del N en superficie y por la mayor

absorción foliar de las plantas. Además expresan que los rendimientos podrían haber sido mayores de no ser por las aplicaciones demasiado tardías para que se produzca una absorción óptima.

Por otra parte, Iqbal et al. (2003) en Faisalabad (Pakistán) observaron que con P aplicado mediante fertirriego se obtuvo mayor rendimiento, eficiencia de uso y eficiencia agronómica que aplicado al voleo en forma sólida, en la siembra. La eficiencia agronómica fue calculada como el cociente entre la producción de grano de los tratamientos fertirrigados y la del testigo sin fertilizar.

Girardin et al. (1993), en Alsace (Francia) encontraron que fertilizaciones múltiples de N mediante fertirriego por pivote permiten evitar la lixiviación y escurrimiento de NO_3^- que generalmente ocurre en etapas tempranas del cultivo cuando se realizan dos aplicaciones granuladas convencionales a la siembra y al momento en que el cultivo presenta 8 hojas. No obstante, existe la posible contraparte de tener altas cantidades de NO_3^- residual luego de la cosecha, si las aplicaciones múltiples son sobreestimadas. En este sentido Schepers et al. (1995) abordaron diferentes estrategias de fertirriego utilizando N para minimizar las cantidades de NO_3^- residual pos cosecha. Dichos autores encontraron que mediante múltiples fertilizaciones es posible aportar lo que el cultivo necesita, ahorrando hasta $168 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y reduciendo el NO_3^- residual con respecto a la fertilización convencional bajo riego según balance hídrico.

Lamm y Schlegel (2000) en Colby (Kansas, Estados Unidos), compararon la fertilización tradicional con el fertirriego en varias dosis, aplicando de forma incremental en fertirriegos semanales siguiendo el criterio del uso del N desarrollado por Ritchie y Hanway (1997). Los resultados demuestran que de esta forma se puede producir mayor cantidad de biomasa aérea reduciendo el N potencialmente lixiviable. Por su parte, Rhoads et al. (1978) encontraron que múltiples aplicaciones de N, P y K programadas con los requerimientos de absorción del maíz presentaron un rendimiento 42 % superior que aplicando un tercio de N antes de la siembra, a los 51

y a los 64 días pos siembra. Los autores explican que este aumento en rendimiento se pudo atribuir a la mayor absorción de N, P, K, Ca (calcio) y Mg (magnesio) observada tanto a los 50 días de cultivo, como a los 100 y a la menor lixiviación de nutrientes.

1.2.3 Fertilización del maíz en Uruguay

El manejo tradicional de N se realiza generalmente en base a indicadores de suelo: Nitratos (NO_3^-), Materia Orgánica, Potencial de Mineralización de N de una muestra de suelos tomada pre siembra y una muestra de suelos tomada durante etapas más avanzadas del ciclo del cultivo. La fertilización con N se realiza a la siembra y en estado de seis hojas (García et al., 2009; Perdomo y Hoffman, 2011; Ceriani e Innella, 2012). Esta estrategia involucra el conocimiento de la curva de absorción de N del maíz, que sigue un patrón de curva sigmoide descrito por Ritchie y Hanway (1997) y de las condiciones del cultivo y del ambiente.

Por su parte, tanto Cazaban y Rubio (2014) como Abraham y Falco (2016) en trabajos realizados en suelos de la zona del litoral evidenciaron que existe respuesta al N hasta el estadio 10-12 hojas de maíz, destacando estos últimos autores la posibilidad de aumentar la eficiencia parcial del N al extender la aplicación del fertilizante en condiciones de disponibilidad hídrica no limitante.

En Uruguay el manejo de nutrientes es llevado a cabo con diferentes criterios. Uno de ellos, llamado como “subir y mantener” o “fertilización del suelo”, consiste en alcanzar un nivel óptimo de nutriente en suelo reponiendo lo que se estima extraído por el cultivo y se adapta más a nutrientes poco móviles como el Fósforo (P) y el Potasio (K) (Olson et al. 1982; Perdomo y Cardellino, 2006). Otro criterio es el de “balance”, más utilizado con N dada su dinámica, que consiste en aportar al suelo el N según la extracción del cultivo y la oferta del suelo (Standford, 1973). Existe otro criterio llamado “nivel crítico o de suficiencia”, basado en que la respuesta del cultivo decrece después de determinado nivel en el suelo (Olson et al. 1982).

Los criterios de fertilización están asociados a diversos factores, como son las variaciones de precio del producto, la incertidumbre climática, la preocupación por la contaminación ambiental y las pérdidas económicas tanto por fertilización deficitaria como por excesiva (Perdomo y Cardellino, 2006). Como expresan Abraham y Falco (2016), es cada vez más importante mejorar el ajuste de la fertilización nitrogenada como forma de balancear los precios crecientes de los fertilizantes, así como minimizar el impacto ambiental dada la concientización y nueva legislación.

1.3. EL CULTIVO DE MAÍZ

1.3.1 Desarrollo y crecimiento

El cultivo de maíz se desarrolla a través de etapas sucesivas irreversibles en las cuales se da lugar a la creación de órganos nuevos, comprende el período entre la germinación y la formación de grano (Fassio et al., 1998).

Para la realización de la presente investigación se tomó en cuenta el sistema de clasificación de etapas fenológicas desarrollado por Ritchie y Hanway (1997), utilizado por la Universidad de Iowa. El mismo subdivide las distintas fases vegetativas, designando V1, hasta V(n) siendo (n) la última hoja antes de la floración masculina (VT). Las fases reproductivas posteriores comienzan en R1 cuando emergen las primeras barbas y culminan en madurez fisiológica de grano (R6).

“El maíz es uno de los cereales más eficientes en la conversión de energía solar, anhídrido carbónico, agua y minerales del suelo en materia orgánica” (Fassio et al., 1998).

Su metabolismo “C4” le confiere ventajas fisiológicas en la fijación del carbono con respecto a las plantas de metabolismo “C3” (Magalhaes y Silva, 1987).

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) se relaciona directa y positivamente a la cantidad diaria de radiación interceptada (Fischer y Palmer, 1984). Así como también, la biomasa total acumulada hasta madurez fisiológica se relaciona a la radiación total interceptada (Andrade et al., 1991).

Puesto que la producción de biomasa es determinante para el rendimiento en grano, la anticipación de la floración es causante de la reducción en el rendimiento debido a la menor duración de los estadios vegetativos previo a la floración (Troyer y Brown, 1976).

La temperatura es uno de los factores que afecta la TCC, actuando sobre las tasas de respiración y de fotosíntesis. No obstante, el mayor efecto de la temperatura es modificar la duración de las distintas etapas ontogénicas del cultivo” (Fassio et al., 1998). La velocidad de desarrollo es aproximadamente lineal en el rango térmico comprendido entre una temperatura base que es mínima para el desarrollo y la óptima, que es la que se alcanza la máxima velocidad de desarrollo (Ellis et al., 1992).

En resumen, el desarrollo del maíz es influenciado por el genotipo (Bonhomme et al., 1984; Ellis et al., 1992), la temperatura (Brown, 1977; Allison y Daynard, 1979) y el fotoperíodo (Rood y Major, 1980).

En maíz, la partición de biomasa a granos se asocia con la cantidad de destinos reproductivos fijados y es el número de granos.m⁻² (NG) el factor más importante de este cultivo en la regulación de la partición. El NG se vincula con la TCC, la cual puede ser afectada por la disponibilidad de nitrógeno (N) entorno al momento de la floración (Uhart y Echevarría, 2000).

Entre los componentes del NG, las espigas por planta y los granos por espiga son los más perjudicados mayormente debido a fallas en la fertilización y/o aumentos de aborto de granos. El número de granos por espiga debido a fallas en la fertilización

en conjunto con los granos abortados presentó una reducción de entre 32 y 38% para los tratamientos no estresados y entre 38 y 82% para los tratamientos estresados por déficit de N (Uhart y Andrade, 1995).

Las deficiencias de N afectan el rendimiento de grano no solo en número, sino también en reducción de peso, según Uhart y Andrade (1995) en tratamientos con estrés nitrogenado el peso y el rendimiento de grano fue reducido entre 9 y 25% y entre 14 y 80% respectivamente en relación a los tratamientos en los que el N no fue deficiente. De acuerdo a trabajos de Cordi et al. (1997) las deficiencias nitrogenadas afectaron la duración del llenado de grano sin afectar la tasa de llenado.

La partición de biomasa a grano es analizada como índice de cosecha (IC), que representa la proporción de grano cosechado con respecto a la biomasa aérea total de la planta. El maíz es una especie que presenta drásticas reducciones en IC ante menores recursos disponibles por planta, como el agua y los nutrientes (Vega et al. 2001, Vega y Andrade 2002). En este sentido, Cano et al. (2001) observaron escasa variación del IC entre distintas dosis de fertilización con N y fósforo (P), registraron valores de entre 0,33 y 0,35. A su vez, constataron disminuciones en el IC en densidades mayores a 100.000 pl ha⁻¹, el mayor IC de 0,39 fue logrado con 62.500 pl ha⁻¹. Por su parte, Andrade (1995) reportó valores de IC de 0,45 para maíz en condiciones sin limitantes hídricas y nutricionales.

En mejoramiento genético se utilizan bases ecofisiológicas, entre ellas el IC para la selección de nuevos cultivares (Andrade, 2012). Robles et al. (2011) constataron que híbridos creados en 1965 (antiguos) presentaron IC de 0,41 mientras que materiales del 2010 presentaron IC de hasta 0,55, este incremento se vincula al incremento de la capacidad de los destinos reproductivos. Nagore et al. (2010) en maíz bajo riego observó que en híbridos antiguos el IC fue de entre 0,43 y 0,47, mientras que en híbridos con más años acumulados de mejoramiento genético fue de 0,51, presentando valores de hasta 0,58 de IC.

Según Andrade et al. (1996), el maíz tiene gran capacidad de respuesta biológica a un manejo de riego y aplicación de fertilizantes adecuado, debido a su alto potencial de crecimiento y su sensibilidad del rendimiento reproductivo al estrés.

1.3.2 Nutrición nitrogenada

Resulta fundamental tener en cuenta ciertos procesos acerca de la dinámica del N en suelo, como son la inmovilización y mineralización para poder contar con herramientas que permitan comprender la nutrición del cultivo.

En primer lugar, mineralización bruta se refiere al proceso por el cual los microorganismos del suelo descomponen materiales orgánicos con la consecuente transformación de N orgánico a inorgánico (Risch et al., 2019; Aber et al., 1998). En segundo lugar, el término inmovilización hace referencia a la asimilación de N en los tejidos de los microorganismos con la consecuente reducción del N disponible para los cultivos, debido a la transformación de N inorgánico a orgánico, (Jansson y Persson, 1982). Ambos procesos suceden de forma simultánea, resultando en mineralización neta cuando ésta supera a la inmovilización de N.

Aquellos factores de mayor importancia que tienen efecto en la mineralización neta del N, son la composición de los residuos (Whitmore, 1996), las condiciones ambientales de temperatura, contenido hídrico del suelo (Zak et al., 1999; Quemada y Cabrera, 1997), los eventos de secado y re-humedecimiento (Kruse et al., 2004), así como las características del suelo (Schjønning et al., 1999).

Cabrera(2007) expresa que es necesario considerar a los factores que afectan a la mineralización neta para el manejo correcto de las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados. En el mismo sentido, se debe progresar en herramientas no invasivas para el rápido diagnóstico de estado nitrogenado del cultivo que colaboren en decisiones que resulten en el mínimo uso de fertilizantes.

Lemaire y Gastal (2015), basados en relaciones empíricas y teóricas que integran la absorción de N de la planta, el potencial de crecimiento del cultivo y el suministro del suelo, desarrollaron una herramienta de diagnóstico del estado nitrogenado del cultivo que se deriva de la cuantificación de la intensidad y el momento de la deficiencia de N durante el ciclo del cultivo. Para ello tuvieron en cuenta el concepto de concentración crítica de N en planta, definida por Greenwood et al. (1990) como la mínima concentración de N correspondiente a la máxima biomasa del cultivo producida.

Este mismo concepto puede ser utilizado en términos dinámicos como la cantidad de N requerida cada día para que el cultivo mantenga su tasa de crecimiento potencial sobre un determinado período de tiempo (Lemaire y Gastal, 2015).

Puesto que, ni la concentración de N en planta ni la absorción de N del cultivo por sí solas pueden indicar el estado de nutrición del cultivo N, Lemaire y Gastal (1997) propusieron el índice de nutrición nitrogenada (NNI) para cuantificar la intensidad de la deficiencia de N y el consumo de lujo del cultivo. $NNI = [N \text{ real en planta}] / [N \text{ crítico}]$.

La concentración real de N disminuye incluso bajo un suministro favorable de N a medida que la masa del cultivo aumenta (Greenwood et al., 1986). La dilución de N debe considerarse como un proceso ontogenético y su expresión en términos de acumulación de masa de cultivo permite una representación general simple de procesos complejos (Lemaire y Gastal, 2015).

1.3.3 Monitoreo del estado nitrogenado

Según Ritchie y Hanway (1997) el número de granos por mazorca se define entre V6 y V12 y es en este estadio en que el nivel de nutrición nitrogenado es un regulador importante de este componente del rendimiento. Se observó que el contenido de clorofila de las plantas está altamente relacionado con la cantidad de N absorbido (Castillo y Ligarreto, 2010). Este índice puede ser una herramienta útil para el control de la nutrición del cultivo, el cual se determina utilizando un medidor de clorofila como el SPAD-502 y una tabla específica de comparación de colores (Witt et al., 2005).

Otra de las herramientas útiles para el monitoreo del estado nitrogenado son los drones, su uso en la agricultura es una práctica cada vez más extendida y tanto agricultores como investigadores confirman buenos resultados en términos de eficiencia (Best, 2014). Los drones, como otros vehículos aéreos no tripulados se han desarrollado como una herramienta útil y adaptable para la adquisición de imágenes remotas con amplia gama de aplicaciones tanto en cartografía, termografía, como en agricultura de precisión. (García-Cervigón y José, 2015).

Fountas et al. (2005), define a la agricultura de precisión como el manejo de la variabilidad espacial y temporal a nivel de subparcela de campo, para mejorar el retorno económico y reducir el impacto ambiental. En la agricultura de precisión mediante una mayor eficacia en las prácticas agrícolas se tiene el objetivo de obtener mayores resultados económicos, medioambientales y sociales, aumentando así la competitividad (García-Cervigón y José, 2015).

Bongiovanni et al., (2006) mencionan consideraciones a tener en cuenta para que el uso de drones pueda resolver problemas reales de la agricultura a un costo razonable, algunas de ellas son: el valor del cultivo, que la variabilidad influya en la producción del producto, se pueda caracterizar y permita la mejora del manejo del cultivo.

Según Ferreyra et al., (2019), determinadas características agronómicas y fisiológicas de los cultivos que afectan el rendimiento de grano, a su vez implican diferencias en la reflectancia de la radiación electromagnética a diferentes longitudes de onda (bandas de reflectancia). Las cuales pueden ser medidas a partir de fotografías que capturen dichos espectros, un método útil y no destructivo para analizar cultivos previo a cosecha (Ferreyra et al., 2019). La información que aportan los datos se utilizan para llevar a cabo índices de vegetación que sirvan como predictivos de factores de interés, como puede ser el área foliar total, el contenido de clorofila, el contenido de agua, biomasa o rendimiento (Thorp et al., 2015).

Uno de los índices más conocidos es el índice de vegetación por diferencia normalizada (NDVI), al cual Tucker (1979) lo describe como la relación de la diferencia entre la reflectancia en el infrarrojo cercano, de 700 a 1100 nm, y del espectro de color rojo a 670 nm con relación a la suma de ambos. Existen otras variantes como el NDVI verde (GNDVI), que es el cociente entre la reflectancia del infrarrojo cercano y el espectro de la banda del verde (Sripada et al. 2006). Este índice utiliza la relación entre las bandas del rojo y verde, excluyendo de esta forma la banda del infrarrojo cercano (Trilla et al., 2016).

Elwadie et al. (2005) estudiaron diferentes espectros e índices de colores en el cultivo de maíz y determinaron que utilizando aquellos que se basan en reflectancia verde como el llamado GNVDI, de características relativamente similares al índice de color (InCol) que se empleó en esta investigación, tienen mejor correlación que los basados en reflectancia roja para la estimación de la producción de grano. A su vez, estos autores observaron que la predicción para producción de grano mejoró progresivamente durante la etapa de crecimiento, fue óptima en R5 y disminuyó en madurez. Esta situación se explicaría porque en etapas tempranas el tamaño fotosintético del área foliar no sería representativo (Elwadie et al., 2005). Existen diversas investigaciones donde el análisis del color del cultivo se ha utilizado para diagnosticar su contenido de nutrientes (mayormente N), al ser un análisis de bajo

costo (menor que el muestreo y análisis en laboratorio) y más preciso que la apreciación visual (García Arnal Barbedo J. 2019)

Si bien se ha incrementado el uso de medidores de clorofila para estimar el contenido de N (Bagheri et al. 2013; Quemada et al. 2014), existen investigadores que recomiendan el análisis de imagen en V12, porque este es un estadio en que el cultivo suele haber absorbido menos del 50% del total y aún es alta la respuesta a N en caso de detectar deficiencias (Ritchie y Hanway, 1997).

Es fundamental tener en cuenta el estadio en que se toma la imagen, debido a que una de las dificultades para detectar deficiencias de N en maíz es la reflectancia del suelo en estadios tempranos en el que el follaje no ha logrado una cobertura relevante. En este sentido, V12 es el estadio óptimo en que se logra minimizar la reflectancia del suelo (Sripada et al. 2008; Shaver et al. 2011). Diversos autores, entre ellos García y Espinosa (2008), Kitchen et al. (2010) lograron determinar dosis de N a ser aplicada, utilizando un índice de verdor en etapas susceptibles a estrés por falta de N, de V6 a V12.

Existe una amplia variedad de índices de color, algunos autores han constatado mayor sensibilidad de los índices basados en color verde con respecto a los basados en el color rojo para evaluar deficiencias nitrogenadas en el maíz en V12 o en estadios posteriores (Bausch y Khosla, 2010; Gasparotto et al. 2015). Por otra parte, otros autores han resaltado la importancia de usar las bandas de rojo combinadas con las bandas de color verde para estimar contenido de clorofila y de N en maíz (Schlemmer et al. 2013; Li et al. 2014).

Para definir alternativas de manejo en sistemas de producción intensificados, es necesario cuantificar los resultados utilizando indicadores de productividad que relacionen el uso de los recursos y factores de producción con los beneficios de los productos a cosechar (Bruuselma et al., 2008).

1.4. INDICADORES PRODUCTIVOS

El principal indicador de productividad de los sistemas de producción es el rendimiento, entendido como la producción por unidad de superficie. Por su parte, Bruuselma et al. (2008) proponen que deberían considerarse indicadores adicionales de productividad para todos los recursos y factores de producción, ello independientemente de la relación costos beneficios de los productos a cosechar.

Gregoret et al. (2006), expresan que el aumento de la superficie bajo riego lleva a la necesidad de generar información para abordar un manejo adecuado del N, tomando en cuenta la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN) y que conduzca a que este nutriente no limite un potencial superior. La eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) es el cociente entre el N absorbido por el cultivo proveniente del fertilizante y la cantidad del N aplicado (Iqbal et al., 2003). La eficiencia agronómica del Nitrógeno se refiere al cociente entre el rendimiento en grano dado por la absorción de fertilizante y la cantidad de N aplicado (Iqbal et al., 2003).

Por otra parte, se deben considerar aquellos indicadores que permiten cuantificar el uso del agua. Al respecto, Caviglia et al. (2013) definen a la productividad del agua como el rendimiento en grano por unidad de agua disponible en un año, que a su vez surge del producto de la eficiencia de captura de agua disponible y de la eficiencia de uso del agua. La eficiencia de captura de agua disponible relaciona la suma de evapotranspiración de los cultivos (ETc) de una secuencia con el agua total disponible (lluvia y riego). Mientras que la eficiencia de uso del agua indica la relación entre la suma de los rendimientos de los cultivos que intervienen en una secuencia (grano o biomasa) y la ETc (Trenbath, 1986).

1.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PARÁMETROS HÍDRICOS DEL SUELO

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) es definida por la adición de dos procesos, la transpiración de la cubierta del cultivo y la evaporación de agua del suelo (Allen et al., 2006, Pereira et al., 2010). Ambos procesos ocurren de forma simultánea, en las primeras etapas del cultivo el agua se pierde principalmente por evaporación del suelo y a medida que el cultivo crece y cubre el suelo es la transpiración que toma mayor importancia (Allen et al., 2006). Según Doorenbos y Pruitt (1990), la ET_c representa a la demanda por evaporación de la atmósfera sobre áreas grandes de cultivos que crecen en condiciones hídricas óptimas, con condiciones ambientales y de manejo adecuados para lograr la producción potencial.

La ET_c es un parámetro de dificultosa medición, por lo que se realiza una estimación en base a la multiplicación del dato climático de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y el coeficiente único del cultivo (K_c).

La ET_o es la pérdida de agua por evapotranspiración de una superficie con un tapiz vegetal estandarizado (Allen et al., 2006; Pereira et al., 2010; Doorenbos y Pruitt, 1990). Este parámetro no es variable con el tipo de suelo, dado que los factores que tienen que ver con el tipo de suelo no tienen efecto alguno sobre la ET_o, por tal motivo es un parámetro útil para caracterizar el clima de una región y de las distintas estaciones del año (Allen et al., 2006).

Según Pereira et al., (2010), el K_c describe la pérdida de agua diferencial para la ET del cultivo en sus distintas etapas fenológicas. Es un coeficiente variable en función de las características del cultivo en todo su desarrollo y en menor proporción está influenciado por las condiciones climáticas locales (Doorenbos y Pruitt, 1990). El K_c experimenta una curva en el ciclo del cultivo la cual se divide en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, mediados de temporada y final.

La etapa inicial está comprendida por el período entre la siembra y el momento en que el cultivo alcanza el 10% de cobertura del suelo. En esta etapa el K_c (K_c ini) es muy dependiente de la evaporación directa de la superficie del suelo y su valor aumenta con el incremento en la frecuencia de humedecimiento del suelo. Para estimar el valor de este coeficiente en riegos de alta frecuencia con eventos ligeros de humedecimiento, de láminas de 10 mm o inferiores, se utiliza el método gráfico de la Guía FAO N° 56. Este gráfico relaciona el valor del K_c ini con el valor de ET_o y la frecuencia de humedecimiento del suelo (Allen et al., 2006).

En la etapa de rápido desarrollo del cultivo, el K_c se relaciona con el desarrollo de la planta y el grado de cubrimiento del suelo y comprende el período desde el 10 % hasta el 80 % de cobertura. En el cultivo de maíz, como en tantos otros cultivos este punto es alcanzado a inicios de floración.

La etapa de mediados de temporada se ubica entre el 80 % de cobertura del suelo por el cultivo hasta el comienzo de la maduración, la que se evidencia cuando se presenta coloración amarilla o senescencia de las hojas basales. El K_c en esta etapa alcanza su valor máximo (K_c med) y se mantiene constante. A su vez, presenta valores típicos para cada cultivo y es menos afectado que el K_c ini ante la frecuencia de humedecimiento del suelo.

Por último, la etapa final acompaña a la madurez del cultivo, desde el comienzo de la senescencia de las hojas basales hasta madurez de cosecha o senescencia completa. En este período se evidencia una reducción del valor de K_c , ya que la conductancia estomática tiende a ser menos eficiente dado el envejecimiento de la planta.

Por otra parte, cuando el cultivo experimenta condiciones por fuera de su óptimo y la transpiración deja de ser la máxima, el K_c se afecta por un coeficiente de estrés hídrico (K_s), que al multiplicarlo al K_c , le reduce su valor (Pereira et al., 2010). De esta forma es que se expresa el efecto del estrés hídrico y en este caso la ET_c se nombra como ajustada (ET_c aj).

El K_s se debe aplicar cada vez que el agua disponible (AD) descienda por debajo de la fracción de agotamiento máximo permisible de agua en el suelo (p), definido como el límite a partir del cual la disponibilidad de agua en el suelo afecta la transpiración de los cultivos en desmedro de su rendimiento (Pereira et al., 2010, Doorenbos y Pruitt, 1990). El valor de p es función del poder de evaporación de la atmósfera. En la guía FAO N° 56 los valores de p de tabla se presentan referidos a una ET_c de 5 mm día^{-1} , por lo que se procederá a corregir su valor cuando la ET_c sea mayor o menor a dicho valor (Pereira et al. 2010). El ajuste se realiza utilizando la ecuación $p = p(\text{tabla}) + 0.04*(5 - ET_c)$.

Al respecto, Della-Maggiara et al. (2003) en la evaluación de un modelo de balance de agua en el suelo para el cultivo de maíz consideraron como umbral óptimo para la mejor performance del cultivo 0.8 del AD presente en el suelo (20% de agotamiento de AD). En el mismo sentido, experimentos de Stegman (1983), NeSmith y Ritchie (1992), evidencian que componentes de rendimiento de grano de maíz pueden ser afectados cuando el AD desciende por debajo de 0,8. No obstante, otros autores han considerado implementar valores de umbral más bajos, entre 0,5 y 0,6 del agua disponible (Hanks 1974, Amos et al. 1989, Lamm et al. 1994).

En los métodos de riego de baja frecuencia como lo es el riego superficial, en cada riego se aplica agua para llegar a capacidad de campo (CC) y se permite un agotamiento de aproximadamente 0,6 del AD (Reinoso et al. 2015). Sin embargo en el riego por pivote, un método de alta frecuencia es posible efectuar riegos diarios (Avello, 2019), de esta forma es posible mantener 0,8 del AD, hasta incluso su totalidad (Puiatti et al. 2008).

El Agua Disponible (AD) representa el agua que retiene el suelo entre CC y punto de marchitez permanente (PMP) en una determinada profundidad radicular. El contenido de AD para los cultivos se incrementa en cuanto las raíces comienzan a profundizar el suelo (Agorio et al., 1988) y es variable según las diferentes etapas fenológicas. La CC corresponde a la cantidad de agua retenida en suelo luego de

saturado y drenado, en suelos de textura fina por lo general se da a los dos o tres días posterior a la saturación (Burgos y Corsi, 1967). Por su parte, el punto de marchitez permanente (PMP) según García et al. (2016) es definido como la cantidad de agua del suelo remanente luego de que el cultivo extrajo toda el agua utilizable y se encuentra tan fuertemente retenida que el cultivo no la puede extraer. Es en este punto en que las plantas se marchitan de forma irreversible (Burgos y Corsi, 1967).

A medida que el cultivo extrae agua del suelo y antes de alcanzar el PMP, la velocidad de extracción de agua por el cultivo empieza a ser menor a la demanda por transpiración, por lo que el cultivo comienza a experimentar estrés hídrico.

1.6. BALANCE HÍDRICO

Conocer el balance de agua del suelo resulta fundamental para la correcta gestión del riego (Pereira et al., 2010, Silva et al. 1988, Agorio et al. 1988). Para conocer la cantidad de agua de la zona radicular del cultivo en determinado período de tiempo se deben evaluar las entradas y salidas de agua (Allen et al. 2006).

Las entradas de agua a la zona radicular son el riego (R) y las precipitaciones (P), que parte de las mismas pueden transformarse en salida mediante el escurrimiento superficial (ES) o por percolación profunda (D). Otros parámetro que son mínimos y usualmente no se consideran son: el transporte de agua por capilaridad (C) hacia la superficie, el agua transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia la zona radicular (FSin) o hacia afuera de dicha zona (FSout), provocando una variación del mismo (ΔFS). Además es posible obtener el valor de ET cuando el cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) para un período de tiempo es determinado (Allen et al., 2006).

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW$$

Según Allen et al. (2006) el método de balance hídrico en el suelo por lo general puede dar estimaciones de ET para períodos de entre 7 a 10 días.

El balance hídrico es una estimación de humedad del suelo, que requiere una calibración local, por lo que necesita ser chequeada con datos de humedad reales. Para la obtención de datos de humedad reales existe el método gravimétrico, que consiste en la determinación de humedad del suelo obtenida por diferencia de peso de suelo húmedo y suelo secado a estufa (García-Petillo et al., 2016). El método gravimétrico es sencillo y confiable, no obstante es un método destructivo, por lo que no permite efectuar un seguimiento periódico a lo largo del tiempo sin destruir la parcela (Hidalgo et al., 2003). Además de este método, existen otras formas de medir la humedad del suelo como es el uso de distintos tipos de sondas, como la FDR (Frequency Domain Reflectometry).

Los métodos no destructivos, como la sonda FDR, se basan en la correlación existente entre la constante dieléctrica del medio y la humedad del suelo, en campos electromagnéticos con diferentes frecuencias (Smith-Rose, 1933). De esta manera se determina la capacitancia obteniendo la constante dieléctrica, por lo tanto la estimación del contenido de agua del suelo (Dean et al., 1987).

Para la obtención de datos precisos la sonda se debe calibrar con el método gravimétrico para cada tipo de suelo y/o cada horizonte, en un período relativamente largo de tiempo para así poder captar amplia variación de humedad de suelo (Souza et al., 2013).

1.7. OBJETIVO E HIPÓTESIS

1.7.1 Objetivo general

Evaluar alternativas de fertilización fraccionada con N en un cultivo de maíz regado.

Objetivos específicos:

- Evaluar respuesta en rendimiento según fraccionamiento, fuente y dosis del N.
- Determinar la eficiencia de uso del N y determinar la productividad del agua.
- Evaluar preliminarmente el análisis de imagen aérea como diagnóstico de deficiencia de N en cultivo de maíz

1.7.2 Hipótesis

- Al fraccionar y efectuar la fertilización con N mediante el riego, es posible aumentar la eficiencia de uso del N y el rendimiento en grano del cultivo de maíz.
- Es posible diagnosticar la deficiencia de N a través de imagen aérea tomada desde un dron.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. CARACTERÍSTICAS DEL EXPERIMENTO

El experimento se instaló luego de un barbecho de invierno en setiembre de 2018 en el predio La Horqueta, ubicado en el kilómetro 64,5 de la Ruta Nº 1 (Figura 1). El mismo ocupó una superficie total de 1440 m². El maíz se cultivó con sembradora para siembra directa de chorrillo el día 7 de octubre, a razón de 100.000 semillas ha⁻¹ para lograr una población objetivo de 95.000 pl ha⁻¹. Se sembró el cultivar DK72 – 10VT3P de ciclo intermedio (73 días a floración).



Figura 1. Mapa de Uruguay donde se muestra la ubicación del experimento.(DIDACTALIA, 2020)

El suelo corresponde a un Hapludert (Clasificación NRCS, 2010) que representa a un Vertisol Rúptico Éutrico según la Clasificación de Suelos del Uruguay (Altamirano et al. 1976a) de la Unidad de suelos Libertad de la carta de suelos escala 1:1 millón; representativo del grupo de suelos Coneat: 10.8b. Se caracteriza por ser de color negro o pardo muy oscuro, textura franco arcillo limosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenado.

2.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental fue de bloques completos al azar (DBCA), con cuatro repeticiones, asignando en cada parcela un tratamiento de fertilización (Figura 2). Las parcelas se ubicaron entre la cuarta y quinta torre del pivote. Los bloques se dispusieron en sentido de alejamiento del centro pivote y la unidad experimental fue de 72 m².

En el experimento se evaluaron un total de 5tratamientos, siendo la fertilización con N la variable experimental.

2.2.1 Tratamientos

La fertilización de base a siembra aplicada a toda la superficie fue de 160 kg.ha⁻¹ de (7-40-0 + 5 S). Para los tratamientos F1, F2 y F3 se usó Fertec® (U+TSA) compuesto de urea y tiosulfato de amonio, N: 28, azufre (S): 5,2; densidad 1,4. Y para el tratamiento C0 se utilizó urea azufrada; N + S granulado (40-0-0 + 6 S).

La dosificación del fertilizante en F1, F2 y F3 fue realizada con fertilizante líquido previamente diluido en agua, aplicado con mochila pulverizadora, previo a un evento de riego, con el objetivo de simular el fertirriego. En todos los tratamientos se midió conductividad eléctrica (CE) y pH para optimizar la nutrición mineral, considerando que la CE óptima se ubica entre 2,5 y 3,5 dS m⁻¹ y el pH entre 5,5 y 6,5. (Urrestarazu, 2004). La conductividad se midió con un medidor Orion 105 y el pH con un medidor Adwa modelo AD 1020.

Los tratamientos se dispusieron en bloques según la Figura 2 y son los siguientes:

T0: sin fertilización nitrogenada.

C0: fertilización en cobertura de $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N en tres hojas (V3) y siete hojas (V7), el 30 y 70% de las UN totales respectivamente,

F1: fertilización líquida en aguade $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N en tres hojas (V3) y siete hojas (V7), el 30 y 70% de las UN totales respectivamente.

F2: fertilización líquida en aguade $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ fraccionado semanalmente desde V3 hasta floración femenina.

F3: fertilización líquida en agua de $225 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ fraccionado semanalmente desde V3 hasta floración femenina.

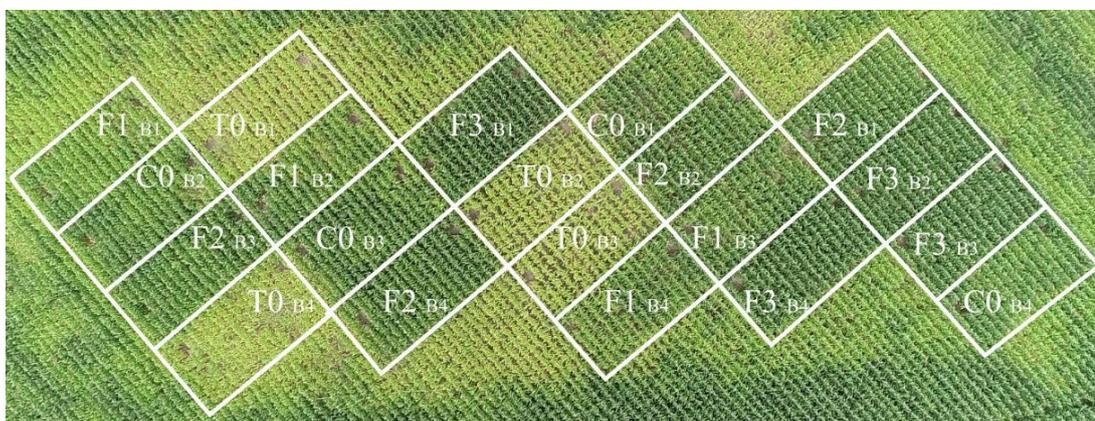


Figura 2. Disposición de tratamientos y bloques. Foto aérea de 20 Mp, tomada a 45 m de altura, en estado de desarrollo R1.

Para definir la fertilización con $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, correspondiente a los tratamientos C0, F1 y F2, se consideró el requerimiento de N del cultivo para un rendimiento de 15 toneladas en $290 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N (IPNI, 2016) y el aporte por mineralización (en

base al análisis de suelo previo a la aplicación de los tratamientos) que se estimó en $140 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N.

Para decidir el fraccionamiento del N, en los tratamientos F2 y F3 se realizaron fraccionamientos semanales de las dosis acorde a Rhoads et al. (1978) (Figura 3.)

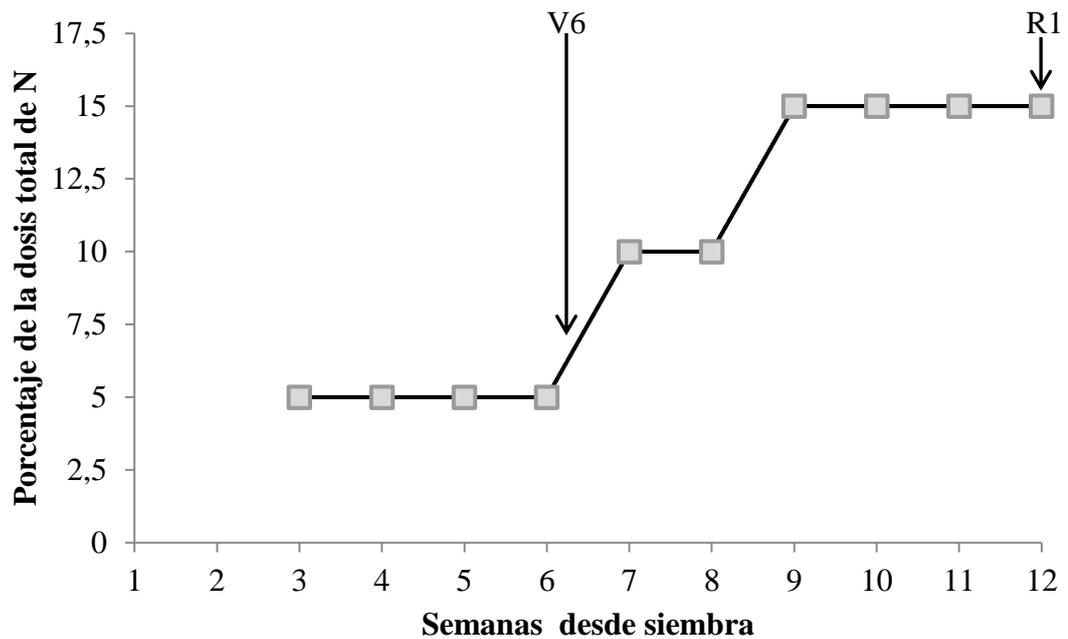


Figura 3. Dosificación del Nitrógeno de tratamientos F2 y F3, las flechas indican el momento donde el cultivo llegó a los estados fenológicos V6 y R1.

En años con precipitaciones frecuentes que determinan períodos donde no es necesario regar, el fraccionamiento de fertilización semanal no ofrece inconvenientes. Los equipos pivotes permiten realizar aplicaciones mínimas de entre 5 y 7 mm en el área de riego, equivalente a la evapotranspiración del cultivo de menos de un día en el período estival (García-Petillo y Puppo, 2015), permitiendo aplicar la dosis correspondiente sin variar significativamente la humedad del suelo.

2.3. MANEJO DEL RIEGO

El cultivo se regó en base al balance hídrico (Cuadro1 de Anexos). Para ello se midieron los principales parámetros hídricos del suelo. El contenido de humedad correspondiente a capacidad de campo (CC) y la densidad aparente fueron determinadas por horizonte mediante medidas a campo (García-Petillo et al., 2016). En el laboratorio de Suelos y Aguas de Facultad de Agronomía mediante olla de Richards, se obtuvo la curva tensión-humedad del suelo de acuerdo a Richards (1947) y Cadena et al. (2008), para los puntos de interés en un manejo con riego: 0,1, 0,33, 0,5 y 1 bar (Figura1 de Anexos).

Para estimar la ET_c, los valores de ET_o se multiplicaron por el coeficiente de cultivo (K_c) según su etapa de desarrollo (Allen et al., 2006). La evapotranspiración potencial (ET_o) se obtuvo de la estación del Instituto Nacional de Investigación Agropecuario (INIA) Las Brujas, ubicada a 35 km de distancia. El registro de precipitaciones se obtuvo con pluviómetro en el predio.

Con la finalidad de verificar el estado hídrico del cultivo durante el ciclo de evaluación, se fijó el umbral de 0,45 de agotamiento de agua disponible (valor de p) como límite por encima del cual se consideró que el cultivo estuvo en confort hídrico. Este valor se corrigió por la ET_c del maíz durante el ciclo del cultivo [1]. El punto “p” de tabla para maíz es 0,55 para un valor de ET_c de 5 mm d⁻¹ (Allen et al. 1998), por tanto el valor límite fijado en este estudio (0,45) para verificar el buen estado hídrico del cultivo, sería un valor conservador.

$$p = p \text{ tabla} + 0,04 (5 - ET_c) \text{ (Allen et al., 2006) [1]}$$

El valor de umbral (0,45 corregido por la ET_c) permitió definir el agua fácilmente disponible en la zona de las raíces. Se asumió que la profundidad efectiva de las raíces tuvo la misma tasa de variación que la del follaje del cultivo, descrita por los valores de K_c (ver Figura 4).

Para determinar el estado hídrico del cultivo se analizó en forma conjunta la humedad en el suelo estimada por balance hídrico, las medidas de humedad en el suelo de sonda FDR y el agua fácilmente disponible.

El manejo del riego fue de alta frecuencia en los períodos con ausencia de lluvias, con láminas netas que variaron entre 4 mm para la etapa inicial y 15 mm a lo largo de la estación de crecimiento del cultivo. El riego se efectuó cada vez que el déficit de agua en el suelo fue 4 mm en la etapa inicial del ciclo del cultivo y 15 mm en las etapas de rápido desarrollo y de mediados de temporada, según la siguiente ecuación condicional:

$$D_i = \text{SI } (D_{i-1} + ET_{ci} - P_{pi} - R_i) < 0, 0, (D_{i-1} + ET_{ci} - P_{pi} - R_i)[2]$$

Siendo, D_i : Déficit acumulado del día i ; D_{i-1} : Déficit acumulado del día $i-1$; ET_{ci} : evapotranspiración del cultivo del día i ; P_{pi} : precipitación del día i ; R_i : riego. La precipitación y el riego ingresado a la fórmula corresponde a la cantidad total de ambos parámetros, sin embargo la fórmula no admite que el contenido de agua en el suelo ascienda por encima de CC en la zona de las raíces. Por esta razón tanto la precipitación como el riego son los retenidos en la zona de las raíces hasta CC o déficit acumulado cero.

Para caracterizar climáticamente el año del experimento se analizaron las frecuencias acumuladas de las precipitaciones y de la ETo del período comprendido entre 1981-2019 de la estación meteorológica de Las Brujas, del INIA.

2.4. DETERMINACIONES REALIZADAS

La humedad del suelo fue monitoreada con sonda FDR (Frequency Domain Reflectometry) Delta-T Devices™, semanalmente desde la siembra del cultivo hasta la cosecha del mismo. Se colocó un tubo de acceso en cada tratamiento, en los dos bloques centrales (Figura 2.). La sonda fue calibrada en tres profundidades, de 0 a 20, 20 a 40 y de 40 a 60 cm con el método gravimétrico de medición de agua en suelo acorde a Marano et al., 2012 (Figura 2 de Anexos).

Antes de iniciar el experimento se midió la lámina recogida y el coeficiente de uniformidad del pivote mediante la metodología de Heerman y Hein (1968) detallada en Tarjuelo (2005), obteniendo resultados satisfactorios.

En V3, previo a la aplicación de los tratamientos, se tomaron muestras de suelo (20 tomas) por bloque de 0-20 y 20-40 cm de profundidad. Todas las muestras se secaron a 40 °C y se molieron para determinar textura (por el método Bouyoucos según Bouyoucos, 1962), materia orgánica (M.O.) mediante oxidación con $K_2Cr_2O_7$ en H_2SO_4 (Walkley y Black, 1934), pH en agua por potenciometría, nitratos (NO_3^-) por colorimetría (Mulvaney, 1996), P disponible por el método Bray 1 (Bray y Kurtz, 1945) y bases intercambiables (K, Ca, Mg y Na) con extracción con acetato de amonio 1N. Posteriormente a cosecha se tomaron muestras a la profundidad de 0-20 y 20-40 cm por parcela para determinar NO_3^- .

En emergencia se determinó el porcentaje de implantación de acuerdo al total de semillas sembradas. En planta a V3, V6, R1 y cosecha se determinó la producción de biomasa aérea, separando grano del resto de la planta para estimar absorción total de N. La concentración de N se determinó por el método de Kjeldahl (Bremmer y Mulvaney, 1982). Semanalmente se midió altura de planta y se registró etapa fenológica de acuerdo a Ritchie y Hanway (1997). A cosecha se determinó además: población; índice de cosecha (IC) como la proporción entre grano y biomasa aérea

total; producción de grano; humedad de grano utilizando humedímetro portátil; peso de mil granos; espigas.m⁻²; espigas.planta⁻¹ y número de granos.espiga⁻¹.

Al llegar el maíz al estado de desarrollo R1 se le tomó una foto aérea desde 45 metros de altura con una cámara de 20 megapíxeles. A cada parcela se le midió el color promedio, en las escala rojo (R), verde (G) y azul (B), con el software AP FillInkCoverage Meter. Este software promedia el color de los píxeles del área seleccionada en una imagen; en este caso se utilizó la Figura 2 y se midió el color promedio al seleccionar cada parcela.

2.5. ANÁLISIS DE DATOS

Para la comparación de medias de las variables producción total de materia seca, rendimiento en grano, componentes de rendimiento de grano, eficiencia del uso del agua (EUA) y productividad del agua (PA) en cada estado de desarrollo del cultivo, se utilizó el test de LSD – Fisher con corrección Bonferroni para el valor de p (Di Rienzo et al., 2016). Para esta comparación se consideró a los efectos tratamiento y bloque y se asumió que los tratamientos tendrían varianzas independientes [1]. Se consideró efecto significativo cuando el valor de p fue menor a 0,05 y tendencia del efecto cuando p estuvo entre 0,05 y 0,10.

$$Y = \mu + \text{tratamiento} + \text{bloque} + \varepsilon (0, \sigma) \quad [1]$$

Donde Y representa la variable de respuesta y “tratamiento” corresponde a los diferentes tratamientos de fertilización.

Para cada tratamiento, en los estados fenológicos V6, R1 y MF, se estimó la cantidad de N que faltó para alcanzar el nivel de suficiencia sugerido por Lemaire y Gastal (2015) [2] y [3] y un Índice de Suficiencia de N (ISN) [4]. La concentración y cantidad absorbida de N en cada tratamiento se analizó con el mismo modelo [1]

$$\% \text{Óptimo} = 3,4 * \text{biomasa}^{-0,37} \quad [2]$$

$$\text{kgN faltante} = (\% \text{Óptimo} - \% \text{Medido}) / 100 * \text{biomasa} \quad [3]$$

$$\text{ISN} = \% \text{Óptimo} / \% \text{Medido} \quad [4]$$

Donde % Óptimo es la concentración de nitrógeno (%) óptimo para la cantidad de biomasa aérea desarrollada por el cultivo. Los kg de N faltantes es la cantidad de N que le faltó al cultivo para alcanzar el nivel óptimo.

Los indicadores relativos a N que propone Iqbal et al. (2003) y que fueron tenidos en cuenta en este estudio son la Eficiencia de Uso del Nitrógeno (EUN) [5] y la Eficiencia Agronómica del N (EA) [6].

$$\text{EUN} = ((\text{N absorbido en cada tratamiento} - \text{N Parcela testigo sin fertilizar}) / \text{Cantidad de N aplicado}) * 100 \quad [5]$$

$$\text{EA} = (\text{Rendimiento en grano de cada tratamiento} - \text{Rendimiento en grano de parcela testigo}) / \text{Cantidad de N aplicado} \quad [6].$$

Luego de culminado el ensayo, se recalcularon los valores de Kc por tratamiento y por fase, así como la duración de cada etapa del ciclo del cultivo (inicial, rápido crecimiento, mediados de temporada y final) (Allen et al., 2006). Para esto se utilizaron los valores de humedad del suelo medidos a profundidad radicular con la sonda FDR y los valores estimados por el balance teórico. El ajuste para recalculer los valores se realizó minimizando la suma de cuadrados del error entre ambos valores. Con esta metodología se corrigió además la ET de cada tratamiento, se determinó la efectividad de cada riego (riego neto), la lluvia efectiva y se obtuvieron los indicadores de uso de agua. Para el Kc de la etapa inicial se consideraron dos

valores distintos: $Kc1$ para los días anteriores al inicio del riego y $Kc2$ para los días posteriores al inicio del riego.

Para 7 días pre siembra (DC0) a 10 día pos siembra; $Kc1 = 0,3$ [7]

Para 10 días pos siembra a día de cambio (DC1); $Kc2 = 0,9$ [8]

Para DC1 a día en el que se llega al máximo Kc (DC2); $Kc3 = 0,9 + b \cdot \text{día}$ [9]

Para DC2 hasta día en el que comienza a descender Kc (DC3); $Kc = 0,9 + b \cdot DC2$ [10]

Para DC3 hasta fin de evaluación (DC4); $Kc = 0,9 + b \cdot DC2 + b2 \cdot (\text{días desde DC0} - DC3)$ [11]

Además, se procedió a calcular los indicadores referidos al uso del agua propuestos por Caviglia et al., 2013 y descritos por Trenbath (1986). La Productividad del agua (PA) [12], Eficiencia de Captura (ECA) [13] y Eficiencia de Uso del Agua (EUA) [14].

$PA = \text{Eficiencia de Captura del agua disponible (ECA)} * \text{Eficiencia de Uso del Agua (EUA)}$ [12]

$ECA = \text{Suma evapotranspiración del cultivo (ETc)} / \text{agua total disponible (lluvia y riego)}$. [13]

$EUA = \text{Rendimiento en grano} / \text{Uso de agua en la estación de crecimiento (ETc)}$. Schlegel y Lamm (2000). [14]

Con los valores obtenidos de color (R, G y B) promedio de cada parcela, se estimó un índice de color [15] (InCol). Se analizó la correlación entre los valores de color e

InCol con las variables: %N en planta, biomasa aérea, ISN [4] y rendimiento de grano ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

$$\text{InCol} = (\text{G}-\text{R}) / (\text{G}+\text{R}) \quad [15]$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ANÁLISIS DE SUELO

Se presentan los resultados de las mediciones del análisis textural del suelo (Cuadro 1), con el que se reafirma la clasificación correspondiente realizada a partir de Altamirano et al. (1976b). El horizonte A tiene un valor de Densidad Aparente (Dap) alta en relación a su granulometría franco arcillo limosa, que podría estar indicando un efecto de compactación, la cual también pudo ocurrir en los horizontes B y C (USDA, 1999).

Cuadro 1. Análisis textural del suelo previo a siembra.

Horizonte	Espesor cm	Dap g/cm^3	Arena ————— % —————	Limo	Arcilla	Clasificación
						Franco arcillo
A	24	1,53	16	49	36	limoso
B1	16	1,47	12	42	46	Arcillo limoso
B2	25	1,47	9	40	51	Arcilloso
C	35	1,50	11	39	50	Arcilloso

En el Cuadro 2 se presenta el análisis químico del suelo, donde se observa un valor de pH que para maíz es bajo, siendo que el valor en el que se da la máxima producción de grano es próximo a pH 6,0, con variaciones según tipo de suelo y contenido de aluminio (Piedrahíta, 2009). A su vez, los valores de bases son bajos, como también el de MO con respecto al suelo modal descrito por Altamirano et al.

(1976b). Cabe destacar que el K no presenta valores que puedan ser limitantes para el cultivo (Barbazán et al., 2013).

Cuadro 2. Análisis químico del suelo previo a siembra.

Horizonte	pH	CE mS cm ⁻¹	C %	Ca	Mg	K	Na
				————— meq/100g suelo —————			
A	4,98	0,14	1,76	7,21	1,72	0,62	0,44
B1	5,37	0,24	1,14	12,11	3,83	0,75	0,57
B2	5,92	0,19	0,63	13,77	5,01	0,87	0,70
C	6,12	0,29	0,67	15,25	5,61	0,91	0,72

Los resultados de análisis de P Bray 1 fueron de 29 mg kg⁻¹ en los primeros 20 cm de suelo y de 7 mg kg⁻¹ en el tramo de 20 a 40 cm, por lo cual el P no fue limitante para el cultivo (Perdomo, s/f; Quincke et al. 2008). Los valores de NO₃⁻ previo a siembra fueron de 4 y 3 mg kg⁻¹ para los tramos de 0 a 20 y 20 a 40 cm respectivamente. La cantidad de NO₃⁻ en el perfil del suelo fue superior a cosecha y fue más del doble en el estrato de 0 a 20 cm (12 mg kg⁻¹) con respecto a 20 a 40 cm (5 mg kg⁻¹). Estos resultados no implicarían un excedente de fertilización dada la variabilidad anual esperable en los valores de N-NO₃⁻ en suelo, el cual pudo aumentar luego del período estival.

3.2 ANÁLISIS DE SOLUCIÓN CONCENTRADA

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de los análisis de CE y pH de las soluciones concentradas utilizadas en el riego.

Cuadro 3. Análisis de CE y pH de cada solución concentrada utilizada

% U+TSA	CE (mS cm ⁻¹)	pH	T (°C)
2,40	1,65	7,10	15,00
3,70	2,27	7,08	15,10
4,90	2,42	7,10	15,20
7,30	3,97	7,12	15,10
9,70	4,97	7,12	14,70
14,60	6,79	7,16	13,90
19,50	8,09	7,22	13,20
21,90	8,69	7,24	12,90
29,20	9,77	7,31	12,00
68,18	10,26	7,46	12,00

El valor óptimo de la CE de la solución nutritiva es de 2,5 mS cm⁻¹ (Urrestarazu, 2004). Según Pizarro (1990) la CE podría incrementarse hasta 6,3 mS cm⁻¹ cuando la dosificación de fertilizantes en el riego se realiza una vez cada 7 días. Cabe destacar que los parámetros analizados (Cuadro 3) son los correspondientes a las soluciones concentradas, inmediato a su aplicación se realizó el riego correspondiente, por lo que el cultivo efectivamente recibió una solución más diluida, con valores de CE inferiores a los mostrados. El agua de riego utilizada presentó 0,374 mS cm⁻¹, valor inferior al promedio de cuatro muestreos de agua superficial de la zona rural de Canelones y Montevideo (0,601 mS cm⁻¹) (Teixeira de Mello, 2007).

3.3 SITUACIÓN HÍDRICA

En la caracterización del año según las lluvias solo el 28% de los años de la serie superaron los 621 mm, correspondientes al registro de lluvia acumulada entre octubre y febrero para el año del estudio. En los meses de diciembre y enero, el año se ubicó como el más lluvioso de la serie analizada, registrando 569 mm. En cuanto a la ETo, con 608 mm entre octubre y febrero, el año se clasificó como un año de baja demanda atmosférica, solo el 5,1 % de los años registraron valores por debajo del año de estudio.

A modo de referencia, en la Figura 4 se presenta la evolución del Kc estimado en la temporada del cultivo utilizado para el manejo del riego. El valor de Kc1 o inicial corresponde al valor de tabla de FAO (Allen et al., 2006). El Kc2, corresponde al valor de gráfico de Kc inicial para la frecuencia de humedecimiento del suelo de FAO (Allen et al. 2006). El cambio de valor entre Kc1 y Kc2 corresponde al momento en que se comenzó a regar. Los coeficientes de cultivo de desarrollo del cultivo, mediados de temporada y final de temporada se representan como Kc 3, 4 y 5 respectivamente. Con respecto a la escala de Ritchie y Hanway (1997), el comienzo de Kc3 en este estudio se puede vincular a V10 (valor de Kc > 0.9), cuando la planta da inicio a una rápida acumulación de materia seca hasta estados reproductivos avanzados (Fassio et al. 1998). Según Allen et al. (2006), la fase de mediados de temporada o Kc4 comienza cuando el 100% del suelo es sombreado por el cultivo, coincidiendo en este caso con R1. El inicio de la fase de finales de temporada (Kc 5) se asocia a grano dentado (R5), en esta etapa los granos se secan hasta R6 cuando todos los granos alcanzan su peso seco máximo (Fassio et al. 1998)

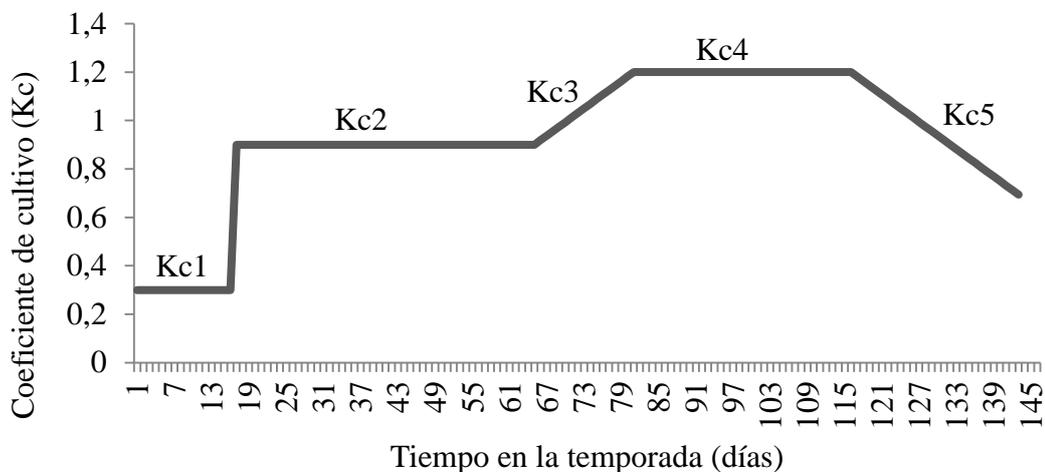


Figura 4. Valores de Kc de la estación de crecimiento del cultivo.

La evolución del Kc durante el ciclo del cultivo (Figura 4) utilizada en el balance hídrico para manejar el riego fue verificada posteriormente con las medidas de humedad realizadas con la sonda FDR. En el Cuadro 4 se pueden apreciar los valores de Kc ajustados mediante las medidas con FDR, así como la duración en días para las fases en cada tratamiento.

Cuadro 4. Valores de Kc ajustados y su duración en días para cada tratamiento.

Trat ⁽¹⁾	— Kc1 —		— Kc2 —		— Kc3 —		— Kc4 —		— Kc5 —		Kcaj	Kc FAO
	valor	día ⁽²⁾	valor	día	valor	día	valor	día	valor	día		
T0	0,3	17	0,9	65	0,001*día	75	0,910	110	-0,001 * día	146	290	725
C0	0,3	17	0,9	65	0,024*día	81	1,284	116	-0,007 * día	146	196	321
F1	0,3	17	0,9	65	0,024*día	81	1,284	116	-0,007 * día	146	220	280
F2	0,3	17	0,9	62	0,025*día	78	1,300	116	-0,003 * día	146	370	691
F3	0,3	17	0,9	61	0,025*día	77	1,300	122	-0,003 * día	146	376	725

⁽¹⁾T0: tratamiento testigo sin fertilización; C0: tratamiento fertilizado con 150 UN con urea azufrada; F1: tratamiento fertilizado con 150 UN con U+TSA en los estadios de desarrollo V3 y V6; F2: tratamiento fertilizado con 150 UN con U+TSA semanalmente desde el estadio V3; F3: tratamiento fertilizado con 225 UN con U+TSA semanalmente desde el estadio V3. ⁽²⁾días desde el 6 de octubre (10 días pre siembra) hasta el cual se mantiene el valor de Kc.

Con base a los valores de Kc 4 y las diferentes duraciones de esta fase, la fertilización con N atrasó la senescencia de las hojas, manteniendo durante más tiempo la actividad fotosintética del cultivo. Resultados similares fueron obtenidos por Lafitte (2001) y Rodríguez et al. (2014) donde determinaron que el N aplicado a maíz promovió a que la fase vegetativa y llenado de grano fueran más largas, permitiendo mayor intercepción de radiación, una tasa fotosintética más alta favoreciendo mayor producción de fotoasimilados, por tanto mayores rendimientos. A su vez, Soto et al. (2004), Ruiz (1993) observaron que el incremento de la dosis fertilización nitrogenada tuvo como consecuencia la disminución de hojas secas.

Se puede apreciar también que el tratamiento sin fertilización fue el primero en llegar a R1 (Kc 4) y el primero en comenzar el período de descenso de Kc. Los resultados son coincidentes con lo observado por Barrios y Baso (2018), que al estudiar diferentes híbridos y su comportamiento en relación a distintas dosis de N, concluyeron que en la mayoría de los híbridos el testigo sin N alcanzó en menor cantidad de días el estado R1 y R6, que el resto de los tratamientos fertilizados.

Por otra parte los tratamientos de fertilización semanal (F2 y F3) alcanzaron antes el Kc 4 (R1) que los fertilizados en dos momentos (C0 y F1), y el valor máximo de Kc fue mayor al fertilizar semanalmente, probablemente debido a la mayor producción de biomasa. El tratamiento F3 fue el que mantuvo por más tiempo el Kc máximo, lo cual se debería a que mantuvo su follaje verde por un período mayor de tiempo. Según lo anterior esto debería haberse reflejado en el rendimiento final ya que diversos autores han determinado que el rendimiento responde positivamente a la aplicación de nitrógeno, aumentando la persistencia del follaje con la posibilidad de acumular más biomasa (Tanaka y Yamaguchi 1981, Bravo y Chan 1987, Lemcoff y Loomis 1986 y Blumenthal et al. 2003).

A continuación se presentan los balances hídricos en los primeros 40 cm de profundidad de los tratamientos más contrastantes del experimento en cuanto a demanda hídrica, que son el T0 de menor y el F3 de mayor demanda (Figura 5 y 6

respectivamente). El balance de los demás tratamientos se encuentra en Figura 3 de anexos. En el eje de las abscisas se encuentran las fechas del ciclo del cultivo. En el eje de las ordenadas principal (izquierda) se encuentran los $\text{mm } 10 \text{ cm}^{-1}$, correspondientes a los parámetros hídricos del suelo, el agua total estimada según balance teórico y las medidas de Sonda FDR. Mientras que en el eje secundario se presentaron los mm correspondientes a los registros de lluvia y riegos aplicados, representados con columnas de color azul y rojo respectivamente.

El tratamiento F3 tuvo mayor consumo de agua, dada una mayor producción de biomasa respecto a T0. La tendencia de mayor consumo se acentuó con más énfasis a partir de mediados de diciembre, época de mayor demanda atmosférica. El mayor consumo de agua en F3 se evidenció principalmente a partir de la última semana de enero y durante el mes de febrero, período en el que se registraron menos lluvias, constatándose una mayor frecuencia en el descenso del agua disponible por debajo del umbral, Sin embargo, desde mediados de noviembre a principios de diciembre el suelo estuvo en saturación, condición que fue reflejada por el balance teórico y confirmada por las medidas de sonda.

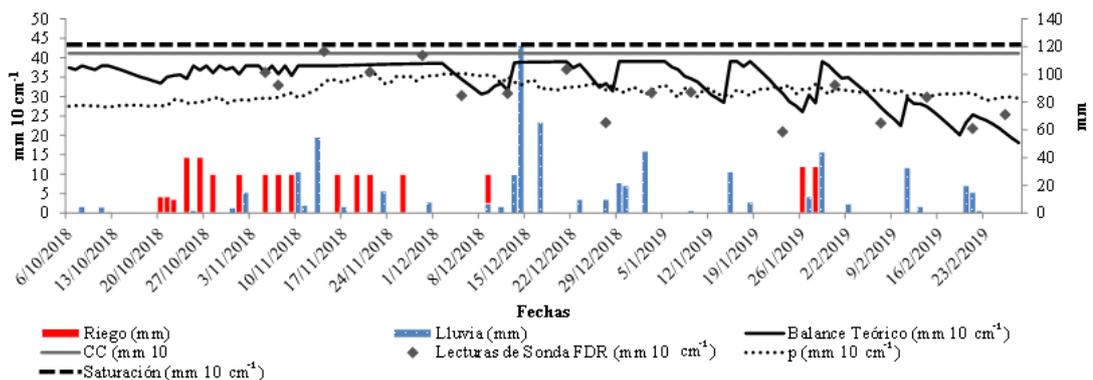


Figura 5. Balance hídrico del tratamiento F3

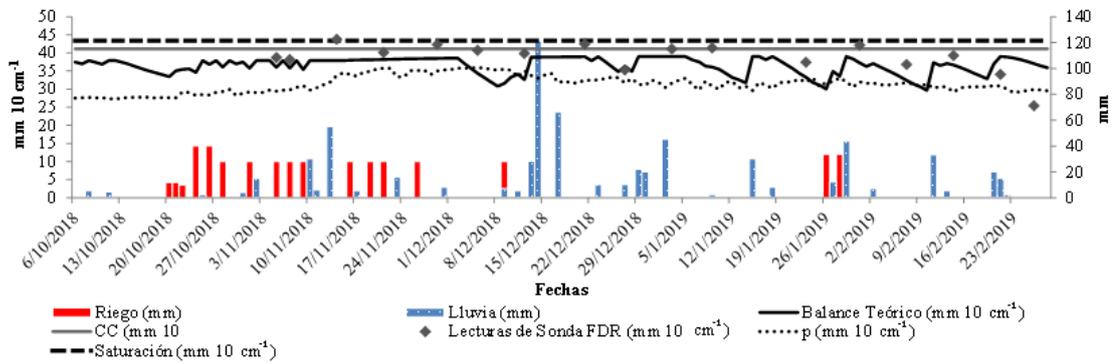


Figura 6. Balance hídrico del tratamiento T0.

Se presenta el Cuadro 5 con los resultados de los indicadores hídricos, ECA, EUA y PA. No es posible realizar una comparación estadística acerca de los valores ECA por la cantidad de datos disponibles, ya que de los valores de ETC se dispone de un único valor por tratamiento. Sin embargo, se puede apreciar que todos los tratamientos fertilizados superaron al valor de T0. Este resultado podría deberse fundamentalmente a los mayores valores de ETC de los tratamientos fertilizados con N. Además se puede apreciar que la fertilización con nitrógeno aumentó la EUA y PA. En el mismo sentido, Pietrobón et al. (2016) reportaron que el aumento en la disponibilidad de N disminuyó la EUN e incrementó la EUA. Por otra parte, la fertilización fraccionada semanalmente podría haber aumentado la PA. En cambio, no hubo efecto de las diferentes fuentes de N sobre EUA y PA. Pedrol et al. (2008) en ensayos de maíz bajo riego observaron que con distintas dosis de N 120, 180 y 240 UN, la EUA fue de entre 15,9 y 17,9 kg.mm⁻¹. Estos resultados se presentan similares a los tratamientos F1 y F2, sin embargo la EUA en F3 es levemente superior incluso a la dosis mayor del mencionado experimento.

Cuadro 5. Valores de Eficiencia de captura del agua (ECA), eficiencia del uso del agua (EUA) y Productividad del agua (PA), de cada tratamiento; y valor de p de los contrastes planteados entre tratamientos.

Tratamiento ⁽¹⁾	ECA	EUA	PA
		kg.mm ⁻¹	kg.mm ⁻¹
C0	0,75	16,5 B	12,4 B
F1	0,75	16,6 B	12,4 B
F2	0,77	18,5 AB	14 AB
F3	0,78	21,6 A	16,6 A
T0	0,59	7,8 C	4,6 C
Contrastes		-----p-valor-----	
T0 vs. resto		<0,0001	<0,0001
C0 vs. F1		>0,9999	>0,9999
F1 vs. F2		0,4873	0,0945
F2 vs. F3		0,0646	0,0111

⁽¹⁾T0: tratamiento testigo (con la fertilización basal); C0: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con urea azufrada; F1: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA en los estadios de desarrollo V3 y V6; F2: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA semanalmente desde el estadio V3; F3: tratamiento fertilizado con 225 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA semanalmente desde el estadio V3.

3.4 PRODUCCIÓN DE MAÍZ

3.4.1. Producción de biomasa

Resulta importante considerar la evolución del crecimiento del cultivo, no solo para evaluar su comportamiento, sino también para analizar y poder discutir nuevas prácticas de manejo de fertilización. Al respecto, en el Cuadro 6 se presentan las producciones de biomasa aérea sin considerar el grano, en cuatro estados fenológicos del cultivo.

Cuadro 6. Producción promedio de biomasa en cuatro estados fenológicos del cultivo: V3, V6, R1 y R6, en los diferentes tratamientos y valor de p de los contrastes planteados entre tratamientos. Entre paréntesis se indica el Error Estándar.

Tratamiento ⁽¹⁾	Estado fenológico			
	V3	V6	R1	R6
	kg.ha ⁻¹ biomasa aérea total			
C0	643 A (0)	1751 A (330)	8929 AB (1369)	23182 AB (2047)
F1	571 A (137)	2580 A (395)	9841 AB (2550)	22705 AB (1409)
F2	643 A (165)	2200 A (51)	10686 A (973)	26405 A (0)
F3	714 A (72)	2552 A (91)	10310 A (316)	29815 A (1831)
T0	857 A (137)	1616 A (276)	3760 B (39)	14078 B (2735)
Contrastes	p - valor			
T0 vs resto	0,6935	0,2141	<0,0001	0,0067
C0 vs F1	>0,9999	0,5345	>0,9999	>0,9999
F1 vs F2	>0,9999	>0,9999	>0,9999	0,0887
F2 vs F3	>0,9999	0,0220	>0,9999	0,3490

⁽¹⁾ T0: tratamiento testigo (con la fertilización basal); C0: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con urea azufrada; F1: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA en los estadios de desarrollo V3 y V6; F2: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA semanalmente desde el estadio V3; F3: tratamiento fertilizado con 225 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA semanalmente desde el estadio V3.

Como se puede observar, al estado V3 no hubo diferencia entre los tratamientos, por lo cual el ensayo comenzó en una condición de biomasa similar al iniciarse los tratamientos correspondientes. La producción de biomasa de los tratamientos fertilizados comenzó a diferenciarse del testigo al llegar al estado de R1 y la diferencia aumentó hasta llegar al estado madurez fisiológica (R6). Al comparar la biomasa producida hasta R6 sin considerar el grano, observamos que el tratamiento T0 tuvo menor biomasa que el resto (14078kg.ha⁻¹ del tratamiento testigo vs. 25527 kg.ha⁻¹ promedio del resto de los tratamientos). La falta de diferencia estadística entre los tratamientos fertilizados pudo deberse a la alta variabilidad espacial del experimento, que permitió un suministro de N adecuado aún en algunas parcelas de los tratamientos con menor fertilización.

Al contrastar las dos diferentes fuentes de N (urea azufrada y U+TSA) no hubo efecto en ninguna de las variables evaluadas. Sin embargo, Fontanetto et al. (2008) en investigaciones desarrolladas en la región pampeana norte de Argentina observaron mayores producciones de maíz utilizando U+TSA con respecto a la urea, ambos aplicados al voleo a una dosis de $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$, en fase vegetativa. Los autores atribuyen esta mayor eficiencia en la fuente nitrogenada U+TSA a menores pérdidas de N por volatilización con respecto a las pérdidas que tuvo la urea.

3.4.2. Producción de grano

Los resultados de la producción de grano de los diferentes tratamientos se presentan en el Cuadro 7, en el que se puede apreciar una tendencia de mayor rendimiento en aquellos cultivos que el fertilizante fue fraccionado semanalmente. El tratamiento F2 presentó un rendimiento de más de 1300 kg.ha^{-1} grano con respecto a C0 y F1. Sin embargo, la alta variabilidad entre las parcelas no permitió manifestar diferencias estadísticamente significativas ni en rendimiento de grano ni en biomasa acumulada al estado R6, con el diseño experimental utilizado (Cuadro 5 y 6). Los resultados obtenidos no fueron los esperados respecto a Roqué et al. (2017), quienes sostienen que es posible obtener mayores rendimientos debido a menor exposición a pérdidas de N por lixiviación, en un esquema de seis aplicaciones con respecto a dos. Al respecto Esteve (1986), demostró en varias especies y en distintos sistemas de riego que es más eficiente el fraccionamiento del fertilizante en cinco o seis aplicaciones con respecto a dos.

La producción de granos aumentó en promedio 40 kg.ha^{-1} grano por cada kg.ha^{-1} de N aportado. El aumento de la fertilización aumentó la biomasa alcanzada en V6, pero el efecto desapareció posteriormente y tampoco incidió en el rendimiento en grano. Al respecto, Wong et al. (2006), en un experimento de dos años de evaluación observaron diferencias significativas ante el aumento de dosis de 125 a 375 kg.ha^{-1} de N en el rendimiento de materia seca. Sin embargo, estos autores no encontraron

diferencias ni en Índice de cosecha (IC), ni en rendimiento de grano (Muchow, 1988). En el presente experimento, el IC (Cuadro 7) no presentó diferencias entre los tratamientos fertilizados con N, los resultados coinciden con lo observado por Cano et al. 2001, en que la variación del IC fue escasa ante cambios entre distintas fertilizaciones.

Cuadro 7. Producción promedio de grano e índice de cosecha (IC), en los diferentes tratamientos y valor de p de los contrastes planteados entre tratamientos. Entre paréntesis se indica el Error Estándar.

Tratamiento ⁽¹⁾	Rendimiento de grano	IC
	kg.ha ⁻¹	Proporción
C0	10271 B (1105)	0,43 A
F1	10330 B (0)	0,44 A
F2	11717 B (855)	0,42 A
F3	13718 B (231)	0,44 A
T0	3821 A (584)	0,27 B
Contrastes	———— p - valor ————	
T0 vs resto	<0,0001	0,0001
C0 vs F1	>0,9999	>0,9999
F1 vs F2	0,7200	>0,9999
F2 vs F3	0,2834	>0,9999

⁽¹⁾T0: tratamiento testigo (con la fertilización basal); C0: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con urea azufrada; F1: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA en los estadios de desarrollo V3 y V6; F2: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA semanalmente desde el estadio V3; F3: tratamiento fertilizado con 225 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA semanalmente desde el estadio V3.

Los valores de IC de los tratamientos fertilizados coinciden con lo reportado por Andrade (1995), además se observó que hubo una reducción significativa del IC en el tratamiento T0 que no recibió fertilización nitrogenada. Este resultado puede deberse a que el tratamiento pudo ser afectado por la menor cantidad de N disponible (Vega et al. 2001, Vega y Andrade 2002). De acuerdo a lo registrado por Nagore et

al. (2010) el cultivo presentó valores de IC similares a los de un maíz antiguo, esta situación puede explicarse por la baja demanda atmosférica de la temporada que pudo disminuir la TCC y afectar el llenado de grano (Hay y Gilbert, 2001; Costa et al., 2002).

Dada la lenta descomposición del rastrojo de avena, los niveles de nitratos y materia orgánica de suelo, previo a los tratamientos, se predecía una alta respuesta a la fertilización nitrogenada, y no se estimaba altos valores de mineralización de N (Álvarez et al 2003; Cabrera, 2007; Perdomo et al. 2008; Murungu et al. 2011). Sin embargo, luego de llegar el cultivo al estado de V6 el aporte de N del suelo en algunas parcelas fue suficiente para compensar las diferencias de aporte de N por parte de las fertilizaciones, y no se evidenció diferencias entre tratamientos. Esto puede suponerse ya que el rendimiento en grano aumentó con la concentración de N en planta y la cantidad de N absorbida por el cultivo (Figura 7), por lo cual hubo efecto del N, pero los tratamientos no fueron los factores que aseguraron las diferencias en su disponibilidad para el cultivo. Sin embargo, el bajo rendimiento del T0 (tratamiento sin fertilización) respecto a los fertilizados, evidencia que el aporte de N del suelo no fue suficiente para aumentar su producción de grano.

De acuerdo a Fassio et al. (1998), el área foliar es determinante de la disponibilidad de carbohidratos para el crecimiento de la planta y el llenado de grano. La Duración del Área Foliar (DAF) es definida como la integral del Índice de Área Foliar (IAF), que es el área de hoja que cubre el suelo. El rendimiento en grano tiende a estar correlacionado positivamente con la DAF durante el período de llenado de grano (Eik y Hanway, 1966). Entre los componentes de rendimiento, el número y peso de granos son los más afectados ante menores follajes (Egharevba et al., 1976). Por lo que es razonable el menor rendimiento del T0 con respecto a los tratamientos fertilizados.

Los componentes de rendimiento de grano en los diferentes tratamientos se presentan en el Cuadro 8, se constató que se produjo mayor cantidad de granos por espiga

debido a la fertilización con N y que el tratamiento C0 tendió ($p=0,07$) a producir menor cantidad de granos por metro cuadrado con respecto a F1.

Cuadro 8. Media de componentes de rendimiento de grano en cada tratamiento y valor de p de los contrastes planteados entre tratamientos. Entre paréntesis se indica el Error Estándar. Plantas por metro cuadrado ($Pl.m^{-2}$), granos por espiga ($Gr.Esp^{-1}$), espigas por metro cuadrado ($Esp.m^2$), granos por metro cuadrado ($Gr.m^2$), humedad a cosecha (Hum.) y peso de de grano corregido a 14% de humedad (Peso 14%)

Tratamiento	$Pl.m^{-2}$	$Gr.Esp^{-1}$	$Esp.m^2$	$Granos.m^2$	Hum.	Peso
	N°	N°	N°	N°	(%)	14%
T0	9 (0,14) A	329 (26,8) B	9 (0,14) A	3021 (234) B	22	216
C0	9 (0,21) A	512 (22,6) A	9 (0,21) A	4559 (246) AB	23	241
F1	9 (0,16) A	563 (34,0) A	9 (0,16) A	5355 (347) A	23	235
F2	9 (0,22) A	528 (55,9) A	9 (0,22) A	4891 (578) AB	23	235
F3	9 (0,25) A	565 (51,9) A	9 (0,25) A	5154 (487) A	23	255
Contrastes	p - valor					
T0 vs resto	0,8142	<0,0001	0,8142	<0,0001	-	-
C0 vs F1	0,2166	0,2145	0,2166	0,0705	-	-
F1 vs F2	0,5469	0,5897	0,5469	0,4956	-	-
F2 vs F3	0,6173	0,6310	0,6173	0,7293	-	-

T0: tratamiento testigo (con la fertilización basal); C0: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha^{-1} de N con urea azufrada; F1: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha^{-1} de N con U+TSA en los estadios de desarrollo V3 y V6; F2: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha^{-1} de N con U+TSA semanalmente desde el estadio V3; F3: tratamiento fertilizado con 225 kg.ha^{-1} de N con U+TSA semanalmente desde el estadio V3.

El número y peso de grano por espiga de T0 con respecto a los tratamientos fertilizados presentó una reducción entorno al 39% y 12% respectivamente, valores que se ubican incluso dentro del rango de decrementos de tratamientos sin deficiencias nitrogenadas de Uhart y Echeverría (2000). Como es posible observar, las variables de componentes de rendimiento grano por espiga y peso de grano, no permiten explicar la falta de diferencias entre los tratamientos.

3.4.3. El Nitrógeno como limitante

La Figura 7 presenta la producción de grano en función de la concentración de N y del déficit de N absorbido. En cada gráfica se presentan los valores de cada tratamiento.

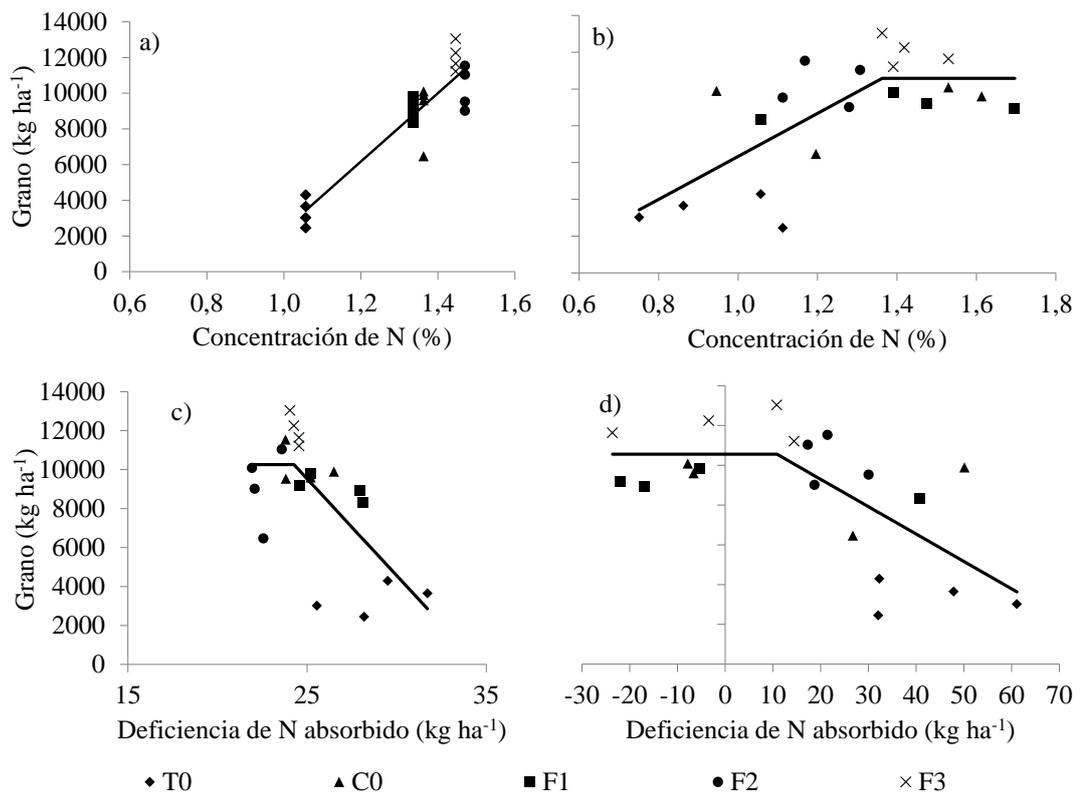


Figura 7. Producción de grano en función del porcentaje de N en grano, y en función del déficit de N absorbidos a) y c) en estado de desarrollo V6; b) y d) en estado de desarrollo R1.

El rendimiento se incrementó a medida que la concentración de N aumentó hasta 1,47 %N en V6 y hasta 1,36 %N en R1. Acorde al modelo propuesto por Lemaire y Gastal (2015), los niveles críticos para la producción estimada serían de 1,42 y 1,40 %N, en los estados V6 y R1, respectivamente, similares a los aquí observados.

Se puede observar también como al estado de V6 la producción de grano disminuyó cuando el déficit de absorción de N superó los 24 kg.ha⁻¹, mientras que en el estado de R1 el descenso de rendimiento comenzó con un déficit de absorción de 11 kg.ha⁻¹. En V6 los tratamientos F2 y F3 fueron los únicos que lograron (en todas las repeticiones) un déficit de N inferior a 24,5 kg.ha⁻¹, en este estado los tratamientos F2 habían recibido 15 kg.N.ha⁻¹ menos que aquellos fertilizados en dos momentos (C0 y F1) indicando que la fertilización semanal permite el ahorro de fertilizante.

Al momento en que el maíz se encontraba en V3, todos los tratamientos presentaban igual estado de nutrición nitrogenada. Sin embargo, se puede observar cómo en los estadios V6, R1 o MF aumenta el ISN y disminuye el rendimiento de grano del cultivo (Figura 8). Si bien la concentración de N disminuye a medida que la masa del cultivo aumenta incluso ante un suministro adecuado de N (Greenwood et al., 1986), se observa que la absorción de N a lo largo del desarrollo del cultivo fue insuficiente y afectó negativamente la expresión del rendimiento de grano. Excepto el tratamiento F3 que aseguró que el cultivo absorbiese suficiente cantidad de N y determinadas parcelas de F2. La fertilización con N aseguró mayor absorción de N y aumento de rendimiento, la falta de diferencias entre tratamientos podría deberse al suministro no limitante del suelo Vidal et al. (2015).

A su vez, se puede observar que solo se llegó al valor de ISN de 1 en el estado de R1, es decir que la cantidad de N de la planta alcanzó el óptimo para su nivel de biomasa producida en dicho estadio. De esta forma se evidencia que todos los tratamientos habrían tenido deficiencia de N de no haberse fertilizado en V6. Una de las ventajas de la propuesta de monitoreo del ISN entre V6 y R1 en conjunto con la fertilización semanal es que una vez constatado el nivel de suficiencia no es necesario aplicar las siguientes dosis en tanto se mantenga esta condición.

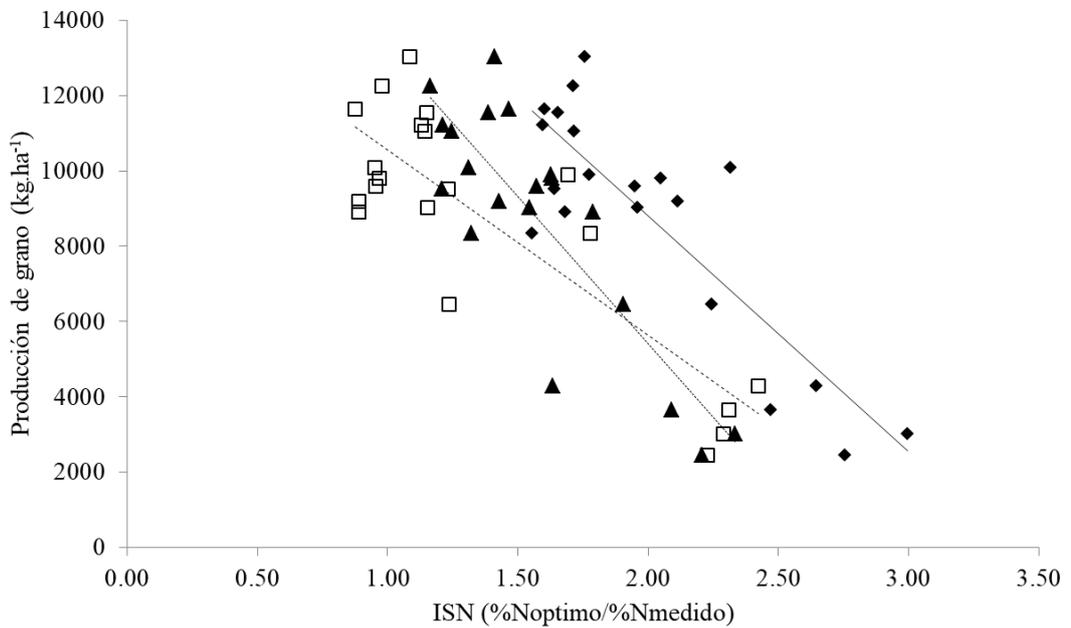


Figura 8. Relación entre rendimiento de grano y el Índice de Suficiencia de Nitrógeno (ISN). Los rombos representan datos al momento de V6 y la línea entera el modelo rendimiento= $-6254 \cdot \text{ISN} + 21320$, $R^2=0,74$; los cuadrados al momento de R1 y la línea segmentada el modelo rendimiento= $-4906 \cdot \text{ISN} + 15457$, $R^2=0,71$; y los triángulos al momento de madurez fisiológica, la línea punteada el modelo rendimiento= $-7816 \cdot \text{ISN} + 21051$, $R^2=0,71$.

Al momento de R1 todos los tratamientos excepto T0, tuvieron el mismo valor de ISN ($p < 0,05$), no obstante la mayor dosis de F3 disminuyó el ISN ($-0,15$; $p = 0,0212$) respecto al tratamiento F2 que tuvo mayor déficit. En F2 debería darse una absorción aún mayor para alcanzar la concentración óptima de N (Figura 7 b). El incremento de concentración de N en planta y la deficiencia de N absorbido, alcanzaron un plateau (Figura 7) y si bien se observa una tendencia lineal en el indicador ISN (Figura 8), no sería posible que hubiese aumentado el rendimiento máximo de haber incrementado la absorción de N del cultivo.

Ceriani e Inella (2012) observaron que en ambientes de riego se generan las condiciones para una mayor absorción de N con respecto a secano. Al respecto, determinaron que la respuesta de maíz bajo riego fue hasta 188 kg.ha^{-1} de N y hasta

el estado de desarrollo V10, con una EUN de 20,7 kg grano kg.N⁻¹, mientras que en seco la respuesta fue hasta 123 kg.ha⁻¹ de N y hasta un estado de desarrollo V6, con una EUN de 10,7 kg grano kg.N⁻¹. El rendimiento de grano fue de 6132 y 10727 kg.ha⁻¹ en seco y riego, respectivamente. Como se puede observar, la EUN, además de la EAN, fueron ampliamente superiores a los reportados en la bibliografía (Cuadro 9). Esta situación podría explicarse por la mayor diferencia entre los tratamientos de fertilización y el testigo, y a la mayor disponibilidad hídrica durante el crecimiento (827 vs. 482 mm).

En este sentido, Abraham y Falco (2016) en maíz bajo riego en un experimento ubicado en el litoral oeste de Uruguay, no encontraron diferencias entre aplicar 180 kg.ha⁻¹ de N en V6 o distribuidas entre V6, V10 y V12, presentando un rendimiento promedio de 14394 kg.ha⁻¹ de grano, superior al seco. Los autores observaron que el riego puede generar un ambiente propicio para una mayor mineralización de N del suelo y una mayor absorción que puede darse en etapas más avanzadas, con respecto al maíz en seco. A través de la utilización del riego, se permitiría aportar una mayor dosis de fertilizante, corregir déficit de N en etapas más tardías y lograr mayores rendimientos. Los tratamientos F2 y F3, que presentan dosificaciones de fertilizante en etapas avanzadas del maíz, sin riego hubiesen presentado menor mineralización, absorción de N y, por tanto, un menor rendimiento. No obstante, si bien las deficiencias de N en seco pueden ser menores, el potencial de rendimiento también.

Cuadro 9. Valores de eficiencia agronómica del nitrógeno (EAN) y eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), de cada tratamiento; y valor de p de los contrastes planteados entre tratamientos.

Tratamiento ⁽¹⁾	EAN	EUN
C0	42,9 A	38,6 A
F1	43,4 A	41,0 A
F2	52,6 A	58,2 A
F3	44,1 A	44,7 A
Contrastes	-----p-valor-----	
C0 vs. F1	>0,9999	>0,9999
F1 vs. F2	0,177	0,0822
F2 vs. F3	0,1048	0,1134

⁽¹⁾ C0: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con urea azufrada; F1: tratamiento fertilizado con 150 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA en los estadios de desarrollo V3 y V6; F2: tratamiento fertilizado con 150 UN con U+TSA semanalmente desde el estadio V3; F3: tratamiento fertilizado con 225 kg.ha⁻¹ de N con U+TSA semanalmente desde el estadio V3.

A nivel nacional, Ceriani e Inella (2012) encontraron que el maíz presentó mayor rendimiento en grano por kg de N agregado en riego que en secano. Además, la EAN tuvo su punto más alto con dosis de 150 kg.ha⁻¹ de N, descendiendo con dosis superiores de entorno a 200 kg.ha⁻¹ de N. En el presente trabajo no se observaron diferencias significativas entre tratamientos.

3.4.4. Diagnóstico por color de imagen

Los colores (R, G y B) y el InCol se relacionaron con la biomasa, concentración de N en estado V6, índice de suficiencia de N (ISN), al estado de R1 y la producción final de grano. Se observó que el valor del color rojo (R) y el InCol se comportaron en forma similar. Sin embargo el InCol tuvo mayor relación con las cuatro variables estudiadas, por lo que podría ser de mayor utilidad (Cuadro 10).

Cuadro 10. Coeficiente de correlación entre los valores de color rojo (R), verde (G) y azul (B), índice de color con biomasa producida, concentración de N en planta (% N), nivel de suficiencia de N (ISN) y producción de grano.

Variable estudiada	Color			Índice de color
	R	G	B	(G-R)/(G+R)
Biomasa(kg.ha ⁻¹ MS)	-0,70**	-0,58**	-0,50**	0,74**
Concentración de N (%)	-0,51**	-0,35 NS	-0,27 NS	0,65**
ISN	0,78**	0,62**	0,52**	-0,87**
Producción grano (kg.ha ⁻¹)	-0,93**	-0,82**	-0,69**	0,93**

** Diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre correlaciones; NS indica diferencias no significativas.

Con el análisis del color de la imagen se podría haber ajustado la fertilización con N (Figura 9a) y predecir el rendimiento de este ensayo (Figura 9b). Es necesario considerar que la lectura de reflectancia desde un dron está sujeta a errores por variación de luminosidad, tipo de suelo, estrés hídrico, condiciones atmosféricas y presencia de malezas (Feng et al., 2020); además de estas fuentes de incertidumbre deben sumarse las generadas por el sensor utilizado para relevar la información (García Arnal Barbedo, 2019). Por estas razones, y por las limitaciones propias del experimento (falta de set de datos de validación), los resultados obtenidos en este experimento no son suficientes para concluir acerca de la utilidad en otras condiciones.

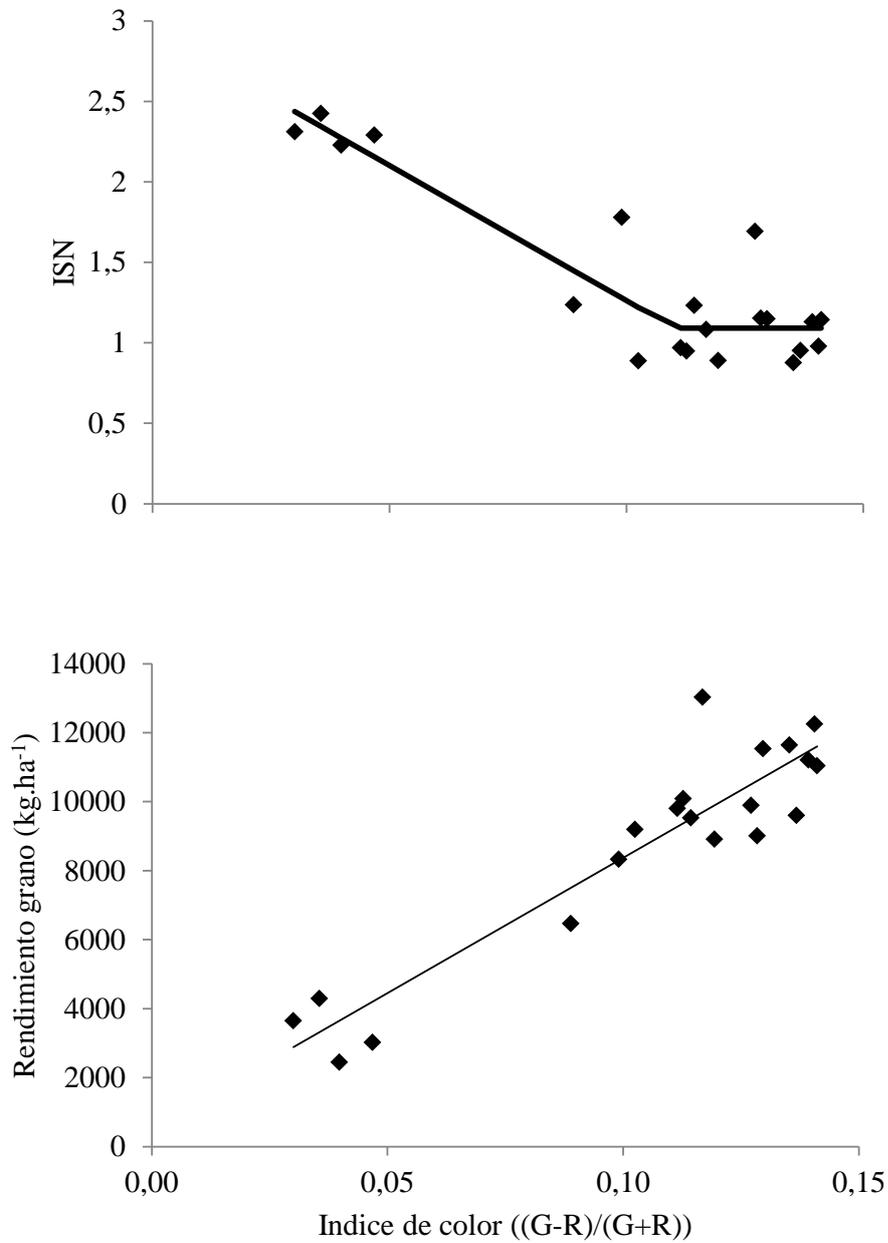


Figura 9. Valores de: a) índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) y b) rendimiento de grano; en función del índice de color. a) la línea representa la relación: para $y < 0,11$ $y = 2,93 - 16,8 \cdot x$, para $y \geq 0,11$ $y = 1,09$; $R^2 = 0,82$. b) la línea representa la relación: $y = 78447x + 527,4$; $R^2 = 0,86$.

Entre colores individuales, el verde (G) y el rojo (R) tuvieron las mayores correlación con el ISN. Al respecto, Blackmer et al. (1996) en Nebraska (USA), analizando imágenes según diferentes ondas de reflectancia para la utilización en diagnóstico del estado nutricional del maíz, encontraron que alrededor de 550 (G) y 710(R) nm se obtiene la mejor detección de deficiencia de N.A su vez, expresaron que el uso de relaciones como el InCol puede tener la ventaja de compensar defectos en condiciones de luz fluctuante. En este sentido, se puede apreciar el mayor valor absoluto de la correlación de Incol con respecto a los colores individuales (Cuadro 9). Farrell et al. (2018), observaron que un índice similar a Incol utilizado en floración presentó las mejores discriminaciones entre maíces con diferentes fertilizaciones con respecto a cuatro índices de vegetación evaluados. Sin embargo, el indicador no tuvo correlación con la producción de biomasa ni con la de grano. Al respecto, Maresma et al. (2016) constató altos valores de correlación entre diferentes índices en V12 y la producción de grano, similares a los encontrados en el presente experimento. A su vez, propuso utilizar diferentes indicadores para las distintas variables del cultivo, para evitar la incertidumbre asociada al uso de un indicador solo.

En el presente experimento, si bien la información evaluada no es suficiente para concluir acerca de los valores presentados, parece viable explorar la lectura de color de imágenes digitales aéreas para interpretar el estado nutricional y potencial productivo del maíz. Esta tecnología está en etapa de desarrollo (Feng et al., 2020) y es posible que su abordaje se desarrolle con nuevas formas de analizar las información como ser el análisis con base a redes neuronales (García Arnal Barbedo, 2019).

4. CONCLUSIONES

Como era de esperarse, debido a los bajos valores de nitrato a siembra, el cultivo respondió a la fertilización con N, independientemente al fertilizante utilizado. La mayor absorción de N en los tratamientos de fertilización semanal permitió que alcanzaran antes la cobertura total del suelo y mantuvieran el follaje verde por más tiempo. Esto determinó una mayor evapotranspiración durante el ciclo del cultivo y mayores valores de productividad del agua en estos tratamientos.

El fraccionamiento semanal de la fertilización con N, en conjunto con el monitoreo del status de N en planta, entre los estados de desarrollo de V6 a R1, es una estrategia que permite ajustar la dosis de fertilización durante la estación de crecimiento del cultivo sin afectar el rendimiento.

Para el monitoreo del estatus de N del cultivo es un herramienta potencial el análisis de color de imágenes del cultivo, ya que tiene alta correlación con variables que permitirían corregir la fertilización del cultivo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, Magill A, Berntson G, Kamakea M, Fernandez I. 1998. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: hypotheses revisited. *BioScience*. 48 (11): 921-934.
- Abraham I, Falco N. 2016. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-12) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y seco. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 57 p.
- Agorio C, Cardellino G, Corsi W, Franco J. 1988. Estimaciones de las necesidades de riego en Uruguay : I. Magnitud y Frecuencia de la Lámina Neta Total. MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca), DGRNR (Dirección General de Recursos Naturales Renovables), DUMA (División Uso y Manejo del Agua). Montevideo, Uruguay. 110 p.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo; guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. 298 p. (Estudio FAO. Riego y Drenaje no. 56).
- Allison J, Daynard T. 1979. Effect of Change in Time of Flowering, Induced by Altering Photoperiod or Temperature, on Attributes Related to Yield in Maize. *Crop Science*. 19(1): 1-4.
- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. 1976a. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay; clasificación de suelos. Montevideo, MAP. DSF. t.1. 96 p.
- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. 1976b. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay: Tomo III Apéndice parte 2:

Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes. Montevideo: Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes. 272 p.

Alvarez R, Steinbach HS, Alvarez C, Grigera S. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas*. 18: 14-19.

Amos B, Stone LR, Bark LD. 1989. Fraction of thermal units as the base for an evapotranspiration crop coefficient curve for corn. *Agronomy Journal*. 81(5): 713-717.

Andrade F. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*. 41(1): 1-12.

Andrade F, Cirilo S, Uhart SA, Otegui, M. 1996. *Ecofisiología del Cultivo Maíz*. Editorial La Barrosa. (No. 633.15 584.92041). Dekalb Press and INTA, FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.

Andrade F, Uhart S, Arguissain G. 1991. Rendimiento potencial de maíz en Balcarce; análisis de los factores que lo determinan. *Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, Argentina*. INTA. 11p. (Boletín Técnico no. 101).

Andrade F. 2012. Contribuciones de la ecofisiología de cultivos a la producción agrícola. *Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria*. Buenos Aires. 66: 345-377 p.

Avello FL. 2019. Sistema de supervisión y control remoto para máquinas de riego de pivote central empleando tecnología inalámbrica. Tesis Doctoral. Santa Clara, Cuba. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica. 1-105.

- Bagheri N, Ahmadi H, Alavipanah Sk, Omid M. 2013. Multispectral remote sensing for site-specific nitrogen fertilizer management. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 48 (10): 1394-1401. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013001000011>
- Barbazán MM, Bordoli JM, Coitiño J, del Pino A, Hoffman E, Mazzilli S. 2013. Avances en estudios de potasio en Uruguay. *Nutrición de los cultivos para la intensificación productiva sustentable*. 151-155.
- Barrios M, Basso C. 2018. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre componentes del rendimiento y calidad nutricional del grano de seis híbridos de maíz. *Bioagro*.30 (1).
- Bausch WC, Khosla R. 2010. QuickBird satellite versus ground-based multi-spectral data for estimating nitrogen status of irrigated maize. *Precision Agriculture*. 11(3): 274-290.
- Best S, 2014. Sistemas de guía por satélite, automatización agrícola y controladores electrónicos. En: Mantovani, E. C., Magdalena, C. (Eds.). *Manual de agricultura de precisión*. Montevideo. Procisur/IICA.36-46.
- Binder DL, Sander DH, Walters DT. 2000. Maize response to time of nitrogen application as affected by level of nitrogen deficiency. *Agronomy Journal*. 92 (6):1228-1236.
- Blackmer AM, Schepers JS, Varvel GE, Walter-Shea EA. 1996. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agronomy Journal*. 88(1): 1-5.

- Blumenthal J, Lyon D, Stroup W. 2003. Optimal plant population and nitrogen fertility for dryland corn in western Nebraska. *Agronomy Journal*. 95 (4): 878-883.
- Bongiovanni R, Mantovani E, Best S, Roel Á. (Eds.). 2006. *Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo: Procisur/IICA. 1-244.
- Bonhomme R, Derieux M, Duburcq JB, Ruget F. 1984. Variation in leaf number induced by soil temperature in various maize genotypes. *Photosynthetica*. 18(2): 255-258.
- Bouyoucos GJ. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. J*. 54:464-465.
- Bravo A, Chan J. 1987. Relaciones agua-suelo-planta atmósfera del maíz de riego en zonas semiáridas. *Terra*. 5(2): 132-139.
- Bray RH, Kurtz, LT. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*. 59: 39-45.
- Bremner JM, Mulvaney CS. 1982. Nitrogen total. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR. (Editores). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA. Madison. pp. 595–624
- Brown D. 1977. Response of maize to environmental temperatures: a review. *World Meteorological Organization Conference on Agrometeorology of the Maize Crop*. World Meteorological Organization. 481: 15–26.
- Bruuselman T, Witt C, Garcia FO, Li S, Rao TN, Chen F, Ivanova S. 2008. A global framework for fertilizer BMPs. *Better Crops*. 92 (2):13-15.

- Bruulsema T. 2009. Recommendation development under 4R nutrient stewardship.[En línea]. 10 enero 2021.
[http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/849509D17481DDDB85257A8C00574254/\\$FILE/Recommendation%20Development%20under%204R%20Nutrient%20Stewardship.pdf](http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/849509D17481DDDB85257A8C00574254/$FILE/Recommendation%20Development%20under%204R%20Nutrient%20Stewardship.pdf)
- Burgos J, Corsi W. 1967. Constantes hidrológicas de dos suelos de pradera de Colonia. La Estanzuela, Uruguay: MGAP/CIAAB (Ministerio de Ganadería y Agricultura. Centro de Investigaciones Agrícolas “Alberto Boerger”).24 p. (Boletín Técnico N° 6).
- Burt C, O’connor K, Ruehr T. 1998. (Eds.). Fertigation Irrigation Training and Research Center, California Polytechnic State University.295 p.
- Cabrera ML. 2007. Mineralización y nitrificación: procesos claves en el ciclo del nitrógeno. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 34: 1-9.
- Cadahía LC. 2005. (Ed.) Fertirrigación: Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Mundi-Prensa Libros. 681p.
- Cadena ZM, Campos MS, Cantú SM, Zermeño GA. 2008. Evaluación de funciones de edafotransferencia para estimar la curva de retención de humedad para uso en planeación de labranza. Terra Latinoamericana, 26(2): 93-102.
- Castaño JP, Gimenez A, Ceroni M, Forest J, Aunchayna R. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980–2009. Montevideo, INIA. 40 p. (Serie Técnica no. 193).

- Castillo ÁR, Ligarreto GA. 2010. Relación entre nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el Piedemonte Llanero colombiano. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*. 11 (2):122-128.
- Caviglia O, Sadras V, Andrade F. 2013. Modelling long-term effects of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the south-eastern Pampas. *Field Crops Research*. 149: 300-311.
- Cazaban M, Rubio DN. 2014. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 83 p.
- Ceriani M, Innella JA. 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.
- Ciampitti I, García F. 2008. Balance y eficiencia de uso de los nutrientes en sistemas agrícolas. *Revista Horizonte A*. 4 (18): 22-28.
- Cicek N, Cakirlar H. 2002. The effect of salinity on some physiological parameters in two maize cultivars. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*. 28(1-2): 66-74.
- Cooper P. (1979). The association between altitude, environmental variables, maize growth and yields in Kenya. *The Journal of Agricultural Science*. 93(3): 635-649. doi:10.1017/S0021859600039058
- Cordi M., Uhart S., Echeverría H., Sainz H. 1997. Efecto de la disponibilidad de nitrógeno sobre la tasa y duración del llenado de granos en maíz. En: XI Congreso Nacional de Maíz y III Reunión Suramericana de Maiceros (11°, 1997, Balcarce). Estación Experimental Agropecuaria. Argentina. INTA. 1 – 7.

- Correndo A, García F. 2012a. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. Archivo Agronómico No. 14. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica No. 5. IPNI Cono Sur. Buenos Aires. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1155>
- Correndo A, García F. 2012b. Alternativas de diagnóstico para el manejo nutricional en cultivos extensivos. En: VI Congreso Boliviano de la Ciencia del suelo. 8 al 10 de noviembre de 2012. 412 p.
- Costa C, Dwyer LM, Stewart DW, Smith DL. 2002. Nitrogen effects on grain yield and yield components of leafy and nonleafy maize genotypes. Crop Science. 42: 1556–1563.
- Cramer GR. 1994. Response of maize (*Zea mays* L.) to salinity. En: Pessaraki M (Ed.). Handbook of plant and soil stresses, New York: Dekker. 449-459.
- Dean TJ, Bell JP, Baty AJB. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. Journal of Hydrology. 93(1-2): 67-78.
- Della-Maggiore AI, Irigoyen A, Gardiol JM, Caviglia O, Echarte L. 2003. Evaluación de un modelo de balance de agua en el suelo para el cultivo de maíz. Revista Argentina de Agrometeorología. 2(2): 2002.
- DIDACTALIA. 2020. Mapa de Uruguay. [en línea]. 17 de Octubre 2020. <https://mapasinteractivos.didactalia.net/>
- Di Rienzo J, Casanoves F, Balzarini M, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat. FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. Recuperado de: <http://www.infostat.com.ar>.

- Doorenbos J, Pruitt W. 1990. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma: FAO. Estudio de riego y Drenaje N° 24. 193 p.
- Egharevba PN, Harrocks RD, Zuber MS. 1976. Dry matter accumulation in maize reponse to defoliation. *Agronomy Journal* 68 (1):40-43.
- Eik K, Hanway J. 1966. Leaf área in relation to yield of corn grain. *Agronomy Journal* 58 (1):16-18.
- Ellis RH, Summerfield RJ, Edmeades GO, Roberts EH. 1992. Photoperiod, Temperature, and the Interval from Sowing to Tassel Initiation in Diverse Cultivars of Maize. *Crop Science*. 32(5):1225-1232.
- Elwadie ME, Pierce FJ, Qi J. 2005. Remote sensing of canopy dynamics and biophysical variables estimation of corn in Michigan. *Agronomy Journal*. 97(1): 99-105.
- Espinosa J, García J. 2009. Herramientas para mejorar la eficiencia de uso de nutrientes en maíz. En: Espinosa J, García J. (eds.). *Memorias del Simposio “Uso eficiente de Nutrientes”* presentado por el IPNI en el XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. International Plant Nutrition Institute (IPNI). Costa Rica. pp. 49-56.
- Esteve GJ. 1986. Apuntes sobre riego localizado. Servicio de Extensión Agraria. (2): 29-37.
- FAO. 2018. Base de datos FAOSTAT. Productos más producidos, mundo. [en línea]. 3 diciembre 2020. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>

- Farrell M, Gili A, Noellemeyer E. 2018. Spectral indices from aerial images and their relationship with properties of a corn crop. *Precision Agriculture*. 19 (6): 1127-1137.
- Fassio A, Carriquiry AI, Tojo C, Romero R. 1998. Maíz; aspectos sobre fenología. Montevideo, INIA. 51 p. (Serie Técnica no. 101).
- Feng D, Xu W, He Z, Yang M. 2020. Advances in plant nutrition diagnosis based on remote sensing and computer application. *Neural Computing and Applications*. 32: 16833–16842. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3932-0>
- Ferreira PY, Gasser AA, Moyano M, Ramos CI, Romero CA. 2019. Predicción del rendimiento a través de imágenes hiperespectrales del cultivo de maíz. Tesis de Licenciatura. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. 1-20.
- Fischer K, Palmer F. 1984. Tropical maize. En: *The physiology of tropical field crops*. Goldsworthy PR, Fischer NM (Eds.). Chichester, Wiley. 213-248.
- Fontanetto H, Keller O. 2006. Manejo de la fertilización en Maíz. Experiencias en la Región Pampeana Argentina. *Información Técnica de Cultivos de Verano. Campaña*. pp. 85-113.
- Fontanetto H, Keller O, Giailevra D, Belotti L, Negro C. 2008. Aspectos del manejo del cultivo de maíz de segunda y de la fertilización nitrogenada en la región pampeana norte de Argentina. *Información Técnica Cultivos de Verano*. (112): 37-45.
- Fountas S, Pedersen S, Blackmore S. 2005. ICT in Precision Agriculture—diffusion of technology innovation. En: Gelb E, Offer A (Eds.). *ICT in agriculture: perspective of technological*. 1-15.

- García A, Morón A, Quincke A. 2009. El indicador del potencial de mineralización (PMN): Posible uso para recomendación de fertilización en trigo por el método de balance. En: Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. Simposio de Fertilidad. IPNI Cono SurFertilizar AC. Mayo del 2009. Rosario-Argentina. pp. 218-220.
- García Arnal Barbedo J. 2019. Detection of nutrition deficiencies in plants using proximal images and machine learning: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 162: 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.035>.
- García-Cervigón D, José J. 2015. Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión. Tesis de máster en tecnologías de la información geográfica. Madrid, España. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Geografía e Historia. 1-77.
- García FO., Ciampitti IA. 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque “tradicional”. www.ipni.net. p 17.
- García JP, Espinosa J. 2008. Relación del índice de verdor con la aplicación de nitrógeno en diez híbridos de maíz. *Informaciones Agronómicas*. (71): 9-14.
- García JP, Espinosa J. 2009. Efecto del fraccionamiento de nitrógeno en la productividad y en la eficiencia agronómica de macronutrientes en maíz. *Informaciones agronómicas*. 72: 1-5.
- García, JP. 2009. Manejo eficiente de nutrientes en el cultivo de maíz en Colombia. FENALCE (eds). Bogotá. Colombia. pp. 126.
- García-Petillo M, Puppo L. 2015. Determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) para el diseño de equipos de riego en el Uruguay

Determination of the Reference Crop Evapotranspiration (ET_o) for Designing Irrigation Equipment in Uruguay. *Agrociencia*. 19 (1): 122–130.

García-Petillo M, Puppo L, Hashashi R, Morales P. 2016. Metodología para determinar los parámetros de un suelo a campo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 1-10.

Gascho GJ, Hook JE. 1991. Development of a Fertigation Program for Sprinkler-Irrigated Corn. *Journal of Production Agriculture*. 4 (3): 306-312.

Gasparotto AC, Nanni MR, da Silva Junior CA, Cesar E, Romagnoli F, da Silva AA, Guirado GC. 2015. Using GNIR and RNIR extracted by digital images to detect different levels of nitrogen in corn. *Journal of Agronomy*. 14(2): 62.

Giménez L, García-Petillo M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. 15 (2): 100-108.

Giménez L. 2012. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? ; capítulo 3. In: Seminario Internacional, 2., 2012, Salto, UY. Riego en cultivos y pasturas. Montevideo: INIA, 2012. p. 35-41.

Girardin PH, Trendel R, Meyer JL, Birgaentzle M, Freyss P. 1993. Effects of conventional and multiple N application by fertigation on maize grain yields and NO₃-N residues. En: Fragoso MAC, Van Beusichem ML, Houwers A. (Eds.). *Optimization of Plant Nutrition.(Developments in Plant and Soil Sciences)*. 411-415.

González-Real, MM. 1996. Evolución de los cultivos fuera de suelo en Francia. Análisis de la situación actual. Curso Internacional de Hidroponía. UNA. Perú.

- Greenwood DJ, Neeteson JJ, Draycott A. 1986. Quantitative relationships for the dependence of growth rate of arable crops on their nitrogen content, dry weight and aerial environment. In: Lambers H., Neeteson J.J., Stulen I. (eds) *Fundamental, Ecological and Agricultural Aspects of Nitrogen Metabolism in Higher Plants*. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 19. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4356-8_55
- Greenwood DJ, Lemaire G, Gosse G, Cruz P, Draycott A, Neeteson JJ. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of botany*. 66 (4), 425-436.
- Gregoret MC, Dardanelli J, Bongiovanni R, Díaz-Zorita M. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplustol. *Ciencia de Suelo*. 24: 147-159.
- Hanks RJ. 1974. Model for Predicting Plant Yield as Influenced by Water Use 1. *Agronomy journal*. 66 (5): 660-665.
- Hay RKM, Gilbert RA. 2001. Variation in the harvest index of tropical maize: evaluation of recent evidence from Mexico to Malawi. *Annals of Applied Biology*. 138: 103-109
- Heermann DF, Hein PR. 1968. Performance characteristics of self-propped center pivot sprinkler irrigation system. *Transactions of the ASAE*. 11(1): 11-15.
- Hidalgo J, Pastor M, Hidalgo JC, Caja SD. 2003. Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en olivar. En: Álvarez-Benedí J, Marinero P. (Eds.). *Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León*. (Vol. 4) *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo VI*. 171-176.

- Hou P, Liu Y, Xie R, Ming B, Ma D, Li S, Mei X. 2014. Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize. *Field Crops Research*. 158: 55-64.
- INIA; INASE (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, UY; Instituto Nacional de Semillas, UY). 2015. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de maíz para grano y maíz para silo. Montevideo. 42 p.
- IPNI (International Plant Nutritional Institute, AR). 2016. Planilla de cálculo para estimar requerimientos nutricionales de cultivos de cereales, oleaginosos, forrajeras e industriales. (en línea). Buenos Aires. s.p. Consultado 26dic. 2020. Disponible en <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>
- Iqbal Z, Latif A, Ali S, Iqbal MM. 2003. Effect of fertigated phosphorus on P use efficiency and yield of wheat and maize. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 25(6): 697-702.
- Janssen BH, Guiking FCT, Van der Eijk D, Smaling EMA, Wolf J, Van Reuler H. 1990. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*. 46(4): 299-318.
- Jansson SL, Persson P. 1982. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. En: Stevenson FJ (Ed.). *Nitrogen in agricultural soils*. Madison, Wisconsin, USA. American Society of Agronomy (Monography N° 22). 29 - 252.
- Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST, Scharf PC, Palm HL, Roberts DF, Vories ED. 2010. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. *Agronomy Journal*. 102 (1): 71-84.

- Kruse JS, Kissel DE, Cabrera ML. 2004. Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 69 (3): 247-256.
- Lafitte H. 2001. Fisiología del maíz tropical. En: Paliwal, Granados, Lafitte y Violic (Eds.). *El Maíz en los Trópicos. Mejoramiento y Producción*. Roma: CIMMYT-FAO. 8 p.
- Lafitte HR, Edmeades GO. 1996. Temperature effects on radiation use and biomass partitioning in diverse tropical maize cultivars. *Field Crops Research*. 49(2-3): 231-247.
- Lamm FR, Schlegel AJ. 2000. Nitrogen fertilization for corn production when using lepa center pivot sprinklers. En: *National Irrigation Symposium proceeding of the 4th Decennial Symposium*. (4°, 2000, Tribune, Kansas) Proceedings. Phoenix, Arizona. American Society of Agricultural Engineers. 14-16.
- Lamm FR, Rogers DH, Manges HL. 1994. Irrigation scheduling with planned soil water depletion. *Transactions of the ASAE*. 37(5): 1491-1497.
- Lemaire G, Gastal F. 2015. Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. En: Lemaire G, Gastal F, Durand JL, Louarn G. Lusignan: Academic Press (Crop physiology). 161-206.
- Lemaire G, Gastal F. 1997. N uptake and distribution in plant canopies. En: Lemaire G (Ed.) *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Heidelberg. Springer-Verlag. 3 – 43 .
- Lemcoff J, Loomis R. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize 1. *Crop Science*. 26 (5): 1017-1022.

- Li F, Miao Y, Feng G, Yuan F, Yue S, Gao X, Chen X. 2014. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research*. 157: 111-123.
- Luthans F, Hodgetts RM, Jonathan P. 2012. *Doh International Management: Culture, Strategy, and Behavior*. 8th Edition. McGraw Hill. 646 p.
- Magalhaes A, Silva WJ. 1987. Determinantes genético-fisiológicos da produtividade do milho: melhoramiento y produgáo do milho. Sao Paulo Fundação. Cargill. p. 425.
- Marano RP, Ledesma F, Camussi G, Carnevale I. 2012. Uso de sondas FDR para balance de agua en suelo: calibración y aplicación. In *Actas XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo/1ª edición*. Ed. MNEMOSYNE, Mar del Plata. 10 p.
- Maresma Á, Ariza M, Martínez E, Lloveras J, Martínez-Casasnovas JA. 2016. Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*Zea mays* L.) from a standard UAV service. *Remote Sensing*. 8 (12): 973.
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, UY). 2017. Uruguay agointeligente. Los desafíos para un desarrollo sostenible. (en línea). Montevideo. 161 p. Consultado 27 may. 2020. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2019-12/libro%20completo%20con%20hipervinculos.pdf>
- MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2017. Anuario estadístico agropecuario 2017. (en línea). Montevideo. 214 p. Consultado 4 dic. 2017.

Disponible en: http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/diea-anuario2017_0.pdf

MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2016a. Encuesta agrícola “invierno 2016”. Serie Encuestas N° 337. Montevideo. 19 p. Consultado 6 dic. 2017. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/estadisticas/produccion-vegetal/agricultura-de-secano/encuesta-agr%C3%ADcola-invierno-2016>

MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2016b. Riego en Uruguay: estrategias para su desarrollo. In: Anuario estadístico agropecuario 2017. (en línea). Montevideo. 214 p. Consultado 6 dic. 2017. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/estadisticas-y-documentos/31-01-4>

MGAP. DGRN (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - Dirección General de Recursos Naturales, UY). 2016. Registros de permisos de importación de Equipos de Riego. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 6 dic 2017. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy>

Mmolawa KB, Or D. 2000. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. *Plant and soil*, 222 (1-2): 163-190.

Morceli P. 2014. El mercado mundial del maíz. En: Red de Políticas Agropecuarias. El mercado del maíz en los países del CAS. Montevideo, Uruguay. Consejo Agropecuario del Sur. 9 – 16.

Muchow RC. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment III. Grain yield and

nitrogen accumulation. *Field Crops Research*. 18 (1): 31-43.
doi.org/10.1016/0378-4290(88)90057-3.

Mulvaney RL. 1996. Nitrogen-inorganic forms. In Sparks et al. (eds.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. p. 1123-1184.

Murungu FS, Chiduzo C, Muchaonyerwa P, Mkeni PNS. 2011. Decomposition, nitrogen and phosphorus mineralization from winter-grown cover crop residues and suitability for a smallholder farming system in South Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 89 (1): 115-123.

Nagore ML, Echarte L, Della Maggiora A, Andrade F. 2010. Rendimiento, consumo y eficiencia de uso del agua del cultivo de maíz bajo estrés hídrico. En: IX Congreso Nacional de Maíz, Simposio Nacional de Sorgo. 17 al 19 de Noviembre de 2010, Rosario, Buenos Aires, Argentina. pp. 107-109.

NeSmith DS, Ritchie JT. 1992. Short-and long-term responses of corn to a pre-anthesis soil water deficit. *Agronomy Journal*. 84(1): 107-113.

NRCS (Natural Resources Conservation Service). 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. Soil Survey Staff. USDA–NRCS (Eds.). Washington DC, USA. (8): 338

Olson RA, Frank KD, Grabouski PH, Rhem GW. 1982. Economic and agronomic impacts of varied philosophies of soil testing. *Agronomy Journal*. 74 (3): 492-499.

Pedrol HM, Castellarín JM, 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.

- Perdomo CH, Cardellino G. 2006. Respuesta del maíz a fertilizaciones definidas con diferentes criterios de recomendación. *Agrociencia* (Montevideo). 10 (1): 63-79.
- Perdomo CH, Barbazán M, Durán Monzoni JM. 2008. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.
- Perdomo CH, Hoffman EM. 2011. Manejo de nitrógeno en maíz; actualidad y perspectivas. En: Simposio Nacional de Agricultura (2°, 2011, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 61-75.
- Perdomo, s/f. Recomendación de Dosis de Fertilización [en línea]. 26 de junio de 2020. http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/curso/docs/RecDosis_impr.pdf
- Pereira L, Juan Valero J, Picornel M, Tarjuelo J. 2010. El riego y sus tecnologías. Lisboa: Europa América. 296 p.
- Piedrahíta O. 2009. Acidez del suelo. *Magnesio Heliconia SA* (14): 30.
- Pietrobon MH, Invinkelried O, Dellaferrera IM, Montenegro AJ. 2016. Eficiencia De Uso De Los Recursos, Productividad Producción En Maíz Según Diferentes Cultivos Antecesoros. *Revista AVE*. 15 (1): 74-84. doi:10.14409/fa.v15i1.5874.
- Pizarro, F. 1990. Riego localizado de alta frecuencia. Ediciones mundi-prensa. Segunda edición. Madrid. España. 471 p.
- Puiatti JMP, Rivetti AR, Schmalz JH. 2008. Riego complementario en maíz (*zea mays* L.) en la región de Río Cuarto empleando el pronóstico climático extendido de 72 horas. Facultad de Agronomía–Universidad Nacional de Río Cuarto. 1-8.

- Quemada M, Cabrera ML. 1997. Temperature and water effects on nitrogen mineralization from surface-applied cover crop residues. *Plant and Soil*. 89:127-137.
- Quemada M, Gabriel JL, Zarco-Tejada P. 2014. Airborne hyperspectral images and ground-level optical sensors as assessment tools for maize nitrogen fertilization. *Remote sensing*. 6(4): 2940-2962.
- Quincke A, García Lamothe L, Morón A. 2008. Manejo de la fertilización en cultivos de verano. Jornada INIA La Estanzuela. Cultivos de verano. INIA La Estanzuela. Montevideo: INIA. 1-4.
- Rabuffetti A. 2017. La Fertilidad del Suelo y su Manejo Tomo 1. Montevideo, Uruguay: Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur. 416 p.
- Ramah K, Santhi P, Ponnuswamy K. 2010. Economic Viability of Drip Fertigation in Maize (*Zea mays L.*) Based Cropping System. *Madras Agricultural Journal*. 97 (1-3): 12-16.
- Ramulu V, Reddy MD, Rao AM. 2010. Response of rabi maize to irrigation schedules and fertigation levels. *Agricultural Science Digest*. 30(2): 104-106.
- Reinoso L, Muzi E, Torretta J, Martinez RS. 2015. Dinámica de extracción de agua del suelo del cultivo de maíz frente a distintas frecuencias de riego gravitacional. En: Congreso Nacional del Agua (25, 2015, Paraná, Entre Ríos) Jornada riego y fertirriego. Mendoza. INTA.1-8.
- Rhoads FM, Mansell RS, Hammond LS. 1978. Influence of Water and Fertilizer Management on Yield and Water-input Efficiency of Corn. *Agronomy Journal*. 70 (2): 305-308.

- Richards L. 1947. Pressure - membrane apparatus, construction and use. *Agricultural Engineering*. 28 (10): 451 - 454.
- Risch AC, Zimmermann S, Ochoa-Hueso R, Schütz M, Frey B, Firn JL, Harpole W S. 2019. Soil net nitrogen mineralisation across global grasslands. *Nature communications*. 10(1): 1-10
- Ritchie W, Hanway J. 1997. How a corn plant develops. State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames. Iowa Special Reports.no.48. 21 p.
- Robles M, Cerrudo A, Di Matteo J, Barbieri P, Rizzalli R, Andrade F. 2011. Nitrogen use efficiency of maize hybrids released in different decades. ASA Congress. USA. 2011.
- Rodríguez LA, Sombrero S, Cedrán M. 2014. Efectos de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz. *Tierras de Castilla y León: Agricultura*. (223): 44-51.
- Rood S, Major D. 1980. Responses of Early Corn Inbreds to Photoperiod. *Crop Science*. 20(6): 679-682.
- Roqué C, Heredia S, Del Franco ME, Benedetto N, Mastromauro M, Boveda M 2017. Experiencias prácticas sobre manejo de riego por pulsos con enfoque en fertirriego. [En línea]. 4 abril 2020. <https://pyrargentina.com.ar/wp-content/uploads/roque-publicacion-en-la-web-2017.doc-1.pdf>
- Ruiz I. 1993. Características nutritivas de hojas verdes y secas de maíz destinado a ensilaje. *Agricultura Técnica (Chile)* 53:356-358.

- Sadras V, Calderini DF. 2009. (Eds.) *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. San Diego. California Academic Press.171-211
- Sampathkumar T, Pandian BJ. 2010. Effect of Fertigation Frequencies and Levels on Growth and Yield of Maize. *Madras Agricultural Journal*. 97 (7-9): 245-248.
- Sawchik J, Ceretta S. 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción (CALMER-AUSID-INIA). En: *Jornada Técnica de Cultivos de Verano. Serie de Actividades de Difusión N° 417.28-33*.
- Schepers JS, Varvel GE, Watts DG. 1995. Nitrogen and water management strategies to reduce nitrate leaching under irrigated maize. *Journal of Contaminant Hydrology*. 20: 227-239.
- Schjønning P, Thomsen IK, Møberg JP, de Jonge, H, Kristensen K, Christensen BT. 1999. Turnover of organic matter in differently textured soils: I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma*. 89 (3-4): 177-198.
- Schlemmer M, Gitelson A, Schepers J, Ferguson R, Peng Y, Shanahan J, Rundquist D. 2013. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 25: 47-54.
- Shanahan JF, Kitchen NR, Raun WR, Schepers JS. 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and electronics in agriculture*. 61(1): 51-62.
- Shani M. 1981. (Ed.). *La fertilización combinada con el riego*. Servicio de Extensión, Ministerio de Agricultura, Estado de Israel. 36 p.

- Shaver TM, Khosla R, Westfall DG. 2011. Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. *Precision Agriculture*. 12 (6): 892-904.
- Silva A, Ponce de León J, García F, Duran A. 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay. *Boletín de Investigación* N° 10. 20 p.
- Smith-Rose RL. 1933. The electrical properties of soil for alternating currents at radio frequencies. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 140 (841): 359-377.
- Soto O, Jahn B, Arredondo S. 2004. Mejoramiento del porcentaje de proteína en maíz para ensilaje con el aumento y parcialización de la fertilización nitrogenada. *Agricultura Técnica*. 64 (2): 156-162.
- Souza CF, Pires RCM, de Miranda DB, Varallo ACT. 2013. Calibração de sonda FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. *Irriga*. 18(4): 597-606.
- Sripada RP, Heiniger RW, White JG, Meijer AD. 2006. Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*. 98(4): 968-977.
- Sripada RP, Schmidt JP, Dellinger AE, Beegle DB. 2008. Evaluating multiple indices from a canopy reflectance sensor to estimate corn N requirements. *Agronomy Journal*. 100 (6): 1553-1561.

- Standford G. 1973. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. *Journal of Environmental Quality*. 2 (2): 159-166.
- Stanghellini C, Van Meurs WT, Corver F, Van Dullemen E, Simonse L. 1998. Combined effect of climate and concentration of the nutrient solution on a greenhouse tomato crop. II: yield quantity and quality. *Acta Horticulture*. 458: 231-238.
- Stegman EC. 1983. Irrigation scheduling: applied timing criteria. En: Hillel D. (Ed.) *Advances in Irrigation*. Nueva York: Academic Press. (2): 1-30.
- Tanaka A, Yamaguchi J. 1981. Producción de materia seca, componentes de rendimiento y rendimiento de grano en maíz. *Chapingo: Rama de botánica*. (4): 124.
- Tarjuelo JM. 2005. *El riego por aspersion y su tecnología*. 3 ed. Editora Mundi-Prensa, Madrid, España. 569 p.
- Teixeira de Mello, F. 2007. Efecto del uso del suelo sobre la calidad del agua y las comunidades de peces en sistemas lóticos de la cuenca baja del Río Santa Lucía (Uruguay). Tesis de Magíster en Ciencias Ambientales. Montevideo, Uruguay. Facultad de Ciencias. 58 p.
- Thorp KM, Gore P, Andrade-Sanchez A, Carmo-Silva S, Welch J, White A, French A. 2015. Proximal hyperspectral sensing and data analysis approaches for field-based plant phenomics. *Computers and Electronics in Agriculture*. 118: 225-236.
- Threadgill ED. 1985. Chemigation Via Sprinkler Irrigation: Current Status and Future Development. *Applied Engineering in Agriculture*. 1 (1): 16-23.

- Trenbath BR. 1986. Resource use by intercrops. In: Francis, C. A. ed. Multiple cropping systems. New York, United States, MPC. pp. 57–81.
- Trilla GG, Pratolongo P, Kandus P, Beget ME, Di Bella C, Marcovecchio J. 2016. Relationship between biophysical parameters and synthetic indices derived from hyperspectral field data in a salt marsh from Buenos Aires Province, Argentina. *Wetlands*. 36(1): 185-194.
- Troyer A, Brown W. 1976. Selection for early flowering in corn: seven late synthetics. *Crop Science*. 16 (6):767-773.
- Tucker CJ. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8 (2): 127–150.
- Uhart SA, Andrade FH. 1995. Nitrogen deficiency in maize: II. Carbon-nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. *Crop Science*. 35 (5): 1384-1389.
- Uhart SA, Echeverría H. 2000. El rol del nitrógeno y del fósforo en la producción de maíz. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada y fosforada. Buenos Aires, Argentina, Morgan Mycogen. 42 p.
- Urrestarazu M. 2004. (Ed.). Tratado de cultivo sin suelo. España: Ediciones Mundi-Prensa. (3ª edición) 914.
- USDA. 1999. Guide Soil Quality Test Kit Guide. USDA Agricultural Research Service. United States of America. 88 p.
- Vega C, Andrade F. 2002. Densidad de plantas. Capítulo 4 En: Andrade F, Sadras V (Eds). Bases para el Manejo del Maíz, el Girasol y la Soja, INTA Balcarce, Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Buenos Aires, Argentina. pp. 97-133.

- Vega C, Andrade F, Sadras V. 2001. Reproductive partitioning and seed set efficiency in soybean, sunflower and maize. *Field Crops Research*. 72: 163 - 175.
- Vidal M, Ruiz R, Antúnez A, Araya C. 2015. Antecedentes nutricionales del cultivo de maíz en Chile. En: Antúnez A, Vidal M, Felmer S, González M. eds. *Riego por pulsos en maíz grano*. Rengo, Chile, INIA Chile. pp. 81-95.
- Walkley A, Black TA. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.
- Whitmore AP. 1996. Modeling the release and loss of nitrogen after vegetable crops. *Netherlands Journal of Agriculture Science*. 44(1):73-86.
- Witt C, Pasuquin JM, Mutters R, Buresh RJ. 2005. New leaf color chart for effective nitrogen management in rice. *Better Crops With Plant Food* 89 (1):36-39.
- Wong JAC, Sánchez DGR, Ríos JLB, Cervantes GG, Sosa ES. 2006. Rendimiento de maíz forrajero en respuesta a fertilización nitrogenada y densidad de población. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 29 (2): 97-101.
- Zak DR, Holmes WE, MacDonald NW, Pregitzer KS. 1999. Soil temperature, matric potential, and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization. *Soil Science Society of America Journal*. 63 (3): 575-584.

6. ANEXOS

6.1 ALTERNATIVAS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ BAJO RIEGO POR PIVOT CENTRAL

Alternatives of nitrogen fertilization in corn under central pivot irrigation

Editor

Name Surname,
Organization, city,
country.
ORCID

<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Alternativas de fertilización nitrogenada en maíz bajo riego por pivot central

Correspondence

Name Surname,
e-mail

Alternativas de fertilização com nitrogênio no milho sob irrigação por pivô central

Received *dd month yyyy*

Accepted *dd month yyyy*

Published *dd month yyyy*

Citation

Author1, Author2, Author3.
Article title. *Agrociencia*
Uruguay [Internet]. *yyyy* [cited
dd mmm yyyy]; v(i):artículo.
Available from:
<http://agrocienciauruguay.uy/ojs/index.php/agrociencia/articulo/view/xx>

Ernst, JM¹; Beretta, A¹; Barbazán MM¹; Puppo, L¹

¹ *Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Av. Gral. Eugenio Garzón 809, Montevideo, Uruguay.*

Abstract

In the last 15 years, there has been an expansion of central pivot usage for crop irrigation in Uruguay, with the possibility of applying fertilizers diluted in water, traditional fertilization practices are still used. The objective of the study was to generate information on fertilization strategies with nitrogen (N) in irrigated corn crop. A study was performed where 5 treatments were evaluated, T0, without nitrogen fertilization; C0, cover fertilization with 150 Kg.ha⁻¹ N in three (V3) and seven leaves (V7); F1, idem "C0" but with liquid fertilizer in water, F2, 150 Kg.ha⁻¹ N as liquid fertilizer in water dose fractioned weekly from V3 to reproductive stage (R1); F3, idem "F2" but with 225 Kg.N ha⁻¹. It was irrigated according to the water balance. Grain production, biomass and plant N content were evaluated in V3, V6, R1 and at harvest. Efficiency (EUA) and productivity of water (PA), efficiency of use (EUN) and agronomic of N (EAN) were determined. In R1, using aerial photography and software, red



(R), green (G) and blue (B) were measured and a color index (InCol) was estimated. The correlation between the color and InCol values was analyzed with: N concentration; biomass; N sufficiency index and grain yield. Fertilization with N increased the WUE, PA and average production by 40 kg of grain for each kg.ha⁻¹ of N supplied. There was no difference in EUN, EAN, grain production according to type of fertilizer, dose, or fertilization frequency.

Keywords: Corn, Fertilization, Nitrogen, Irrigation, Dosage.

Resumen

En los últimos 15 años la utilización anual de pivotes para riego se multiplicó por 8 en Uruguay, con la posibilidad de aplicar fertilizantes diluidos en agua se siguen utilizando prácticas de fertilización tradicionales. El objetivo del estudio fue generar información sobre estrategias de fertilización con nitrógeno (N) en maíz regado. Se instaló un experimento con 5 tratamientos: T0, sin fertilización nitrogenada; C0, fertilización en cobertura con 150 kg.ha⁻¹N en tres (V3) y siete hojas (V7) de estado de desarrollo; F1, ídem a "C0" pero con fertilizante diluido en agua; F2, 150 kg.ha⁻¹ N como fertilizante diluido en agua, fraccionado semanalmente desde V3 hasta estado reproductivo (R1); F3, ídem a "F2" pero con 225 kg.N ha⁻¹. Se regó según balance hídrico. Se evaluó producción de grano, biomasa y concentración de N en planta en V3, V6, R1 y a cosecha. Se determinó eficiencia (EUA) y productividad del agua (PA), eficiencia de uso (EUN) y agronómica del N (EAN). En R1 se tomó imagen aérea y midió color rojo (R), verde (G) y azul (B) y se estimó un índice color (InCol). Se analizó la correlación entre valores de color e InCol con: concentración de N; biomasa; índice de suficiencia de N y rendimiento de grano. La fertilización con N aumentó la EUA, PA y producción promedio en 40 kg de grano por kg.ha⁻¹ de N aportado. No hubo diferencia en EUN, EAN, producción de grano según tipo de fertilizante, dosis, ni frecuencia de fertilización.

Palabras clave: Maíz, Fertilización, Nitrógeno, Riego, Dosificación.

Resumo

Nos últimos 15 anos o uso anual de pivôs para irrigação se multiplicou por 8 no Uruguai, com a possibilidade de aplicação de fertilizantes diluídos em água, práticas tradicionais de fertilização ainda são utilizadas. O objetivo do estudo foi gerar informações sobre estratégias de fertilização com nitrogênio (N) no milho irrigado. Foi instalado um experimento com 5 tratamentos: T0, sem fertilização com nitrogênio; C0, adubação em cobertura com 150 kg.ha⁻¹ de N em três (V3) e sete (V7) folhas do estágio de desenvolvimento; F1, igual a "C0" mas com fertilizante diluído em água; F2, 150 kg.ha⁻¹ de N como fertilizante diluído em água, fracionado semanalmente de V3 até a fase reprodutiva (R1); F3, ídem para "F2" mas com 225 kg.N ha⁻¹. Foi regado de acordo com o balanço hídrico. A produção de grãos, a biomassa e a concentração de N da planta foram avaliadas em V3, V6, R1 e na colheita. Eficiência (EUA) e produtividade da água (PA), eficiência de uso (EUN) e agronomica do N (EAN) foram determinadas. Em R1, uma imagem aérea foi obtida e vermelho (R), verde (G) e azul (B) foram medidos e um índice de cor (InCol) foi estimado. A correlação entre os valores de cor e o InCol foi analisada com: concentração de N; biomassa; Índice de suficiência de nitrogênio e rendimento de grãos. A fertilização com N aumentou os EUA, PA e a produção média em 40 kg de grão por kg.ha⁻¹ de N fornecido. Não houve diferença na EUN, EAN, produção de grãos de acordo com o tipo de fertilizante, dose ou frequência de fertilização.

Palavras-chave: Milho, Fertilização, Nitrogênio, Irrigação, Dosagem.



1. Introducción

El maíz (*Zea mays*.) es el cultivo más sembrado y consumido en el mundo, con una zona de producción muy extendida en diversos ambientes ⁽¹⁾. En Uruguay la siembra de maíz abarca aproximadamente 80.000 hectáreas cada año, con rendimientos promedio de 4,9 Mg.ha⁻¹ y excepcionalmente superan los 6,0 Mg.ha⁻¹⁽²⁾. En la zafra 2015-2016, el cultivo presentó un rendimiento promedio bajo riego de 8,5 Mg ha⁻¹, un 46 % más que el rendimiento en secano. Sin embargo el rendimiento potencial del maíz regado en Uruguay es de 15 Mg ha⁻¹⁽³⁾, por lo que la brecha tecnológica aún es amplia⁽⁴⁾.

En Uruguay la principal limitante de rendimiento de los cultivos de verano es la disponibilidad hídrica. Si bien hay alta variabilidad interanual de lluvias, generalmente el déficit hídrico coincide con el período crítico de los cultivos, debido a los mayores valores de evapotranspiración del año y a la baja capacidad de almacenaje de agua⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾. Desde hace aproximadamente 15 años se viene produciendo una expansión de cultivos extensivos regados, coincidiendo con la cantidad de pivotes centrales importados, que fueron 51 en el año 2000 y 422 en el año 2015⁽⁸⁾.

Además de la disponibilidad hídrica, otro factor limitante del rendimiento del cultivo de maíz es la disponibilidad de nutrientes ⁽⁹⁾. Al respecto, se observa una brecha tecnológica debido a que en predios comerciales con sistemas de riego muy avanzados se utilizan prácticas tradicionales de fertilización, con la posibilidad de aplicar fertilizantes utilizando el agua como transporte para una dosificación racional que logre un sincronismo entre la aplicación y absorción de nutrientes por los cultivos⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.

En esta investigación el objetivo fue: a) generar información acerca de estrategias de fertilización fraccionada de nitrógeno(N) en un cultivo de maíz regado, para optimizar los costos de fertilización y minimizar el impacto ambiental, y b) avanzar en el diagnóstico de deficiencia de N en cultivo de maíz, mediante el análisis de imagen aérea. Las

hipótesis son que al fraccionar y efectuar la fertilización con N mediante el riego, es posible aumentar la eficiencia de uso del N y el rendimiento en grano del cultivo de maíz. Asimismo es posible diagnosticar la deficiencia de N a través de imagen aérea tomada desde un dron.

2. Materiales y Métodos

2.1 Características del experimento

El experimento se instaló luego de un barbecho de invierno, junto a la siembra de maíz el 7 de octubre de 2018 en el predio La Horqueta, ubicado en el kilómetro 64,5 de la Ruta N° 1 (34°33'8.51"S; 56°42'32.22"O). El mismo ocupó una superficie total de 1440 m². El maíz se cultivó con sembradora para siembra directa de chorrilloa razón de 100.000 semillas ha⁻¹ para lograr una población objetivo de 95.000 pl ha⁻¹. Se sembró el cultivar DK72 – 10VT3P de ciclo intermedio (73 días a floración) ⁽¹²⁾.

El suelo corresponde a un Hapludert (Clasificación USDA, 2006) que representa a un Vertisol Rúptico Éutrico según la Clasificación de Suelos del Uruguay⁽¹³⁾ de la Unidad de suelos Libertad de la carta de suelos escala 1:1 millón; representativo del grupo de suelos Coneat: 10.8b. Se caracteriza por ser de color negro o pardo muy oscuro, textura franco arcillo limosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenado.

2.2 Diseño experimental

El diseño experimental fue de bloques completos al azar (DBCA), con cuatro repeticiones, asignando en cada parcela un tratamiento de fertilización. Los bloques se dispusieron en el sentido de alejamiento del centro del pivote, entre la cuarta y quinta torre. El tamaño de parcela fue de 72 m².

Se evaluaron un total de 5 tratamientos de fertilización con N, siendo la cantidad, tipo de



fuelle, frecuencia y método de aplicación (diluido o sólido) las variables experimentales. La fertilización de base a siembra aplicada a toda la superficie fue de 160 kg.ha⁻¹ de del fertilizante 7-40-0 + 5 de azufre (S). Para los tratamientos F1, F2 y F3 se usó Fertec® (U+TSA) compuesto de urea y tiosulfato de amonio, N: 28, S: 5,2; densidad 1,4. Y para el tratamiento C0 se utilizó urea azufrada; N + S granulado (40-0-0 + 6 S).

T0: sin fertilización nitrogenada adicional.

C0: fertilización en cobertura de 150 kg.N ha⁻¹al estado de desarrollo de tres hojas (V3) y siete hojas (V7), el 30 y 70 % de la dosis, respectivamente.

F1: fertilización líquida en agua de 150 kg.N ha⁻¹ en tres hojas (V3) y siete hojas (V7), el 30 y 70 % de la dosis, respectivamente.

F2: fertilización líquida en agua de 150 kg.N ha⁻¹ fraccionado semanalmente desde V3 hasta inicios de estado reproductivo (R1).

F3: fertilización líquida en agua de 225 kg.N ha⁻¹ fraccionado semanalmente desde V3 hasta R1.

Para simular las condiciones del fertirriego, la dosificación del fertilizante en F1, F2 y F3 fue realizada con fertilizante líquido previamente diluido en agua, aplicado con mochila pulverizadora, previo a un evento de riego. En todos los tratamientos se midió conductividad eléctrica (CE) y pH para optimizar la nutrición mineral, considerando que la CE óptima se ubica entre 2,5 y 3,5 dS m⁻¹ y el pH entre 5,5 y 6,5 ⁽¹⁴⁾. La conductividad se midió con un medidor Orion 105 y el pH con un medidor Adwa modelo AD 1020.

Para definir la fertilización con 150 kg.N ha⁻¹, correspondiente a los tratamientos C0, F1 y F2, se consideró el requerimiento de N del cultivo para un rendimiento de 15 toneladas en 290 kg.ha⁻¹ de N ⁽¹⁵⁾ y el aporte por mineralización (en base al análisis de suelo previo a la aplicación de los tratamientos) que se estimó en 140 kg.ha⁻¹ de N. Para decidir el fraccionamiento del N, en los tratamientos F2 y F3 se realizaron aplicaciones semanales e incrementales de las dosis acorde a Rhoads et al. ⁽¹⁶⁾.

2.3 Manejo del riego

El manejo del riego fue de alta frecuencia en los períodos con ausencia de lluvias. Los riegos se efectuaron cada vez que el déficit de agua en el suelo fue 4 mm en la etapa inicial del ciclo del cultivo (desde la siembra hasta que el cultivo cubrió el 10% del suelo) y 15 mm en las etapas de rápido desarrollo y de mediados de temporada (desde el fin de la fase inicial hasta que se inició la senescencia de las hojas basales del cultivo), según la siguiente ecuación condicional:

$$D_i = S_i (D_{i-1} + ET_{ci} - P_{pi} - R_i) < 0, 0, (D_{i-1} + ET_{ci} - P_{pi} - R_i)$$

donde D_i : Déficit acumulado del día i ; D_{i-1} : Déficit acumulado del día $i-1$; ET_{ci} : evapotranspiración del cultivo del día i ; P_{pi} : precipitación del día i ; R_i : riego. La precipitación y el riego ingresado a la fórmula corresponde a la cantidad total de ambos parámetros, sin embargo la fórmula no admite que el contenido de agua en el suelo ascienda por encima de capacidad de campo (CC) en la zona de las raíces. Por esta razón tanto la precipitación como el riego son los retenidos en la zona de las raíces hasta CC o déficit acumulado cero. La ET_c se calculó como $ET_o \times K_c$, donde la ET_o es la evapotranspiración diaria del cultivo de referencia calculada por el método de Penman-Monteith y el K_c corresponde al valor diario del coeficiente de cultivo calculado a partir de los valores de tabla de FAO-56 ⁽¹⁷⁾. El valor del K_c en la fase inicial se determinó con el método gráfico a partir del valor promedio de ET_o y la frecuencia de humedecimiento del suelo en esta fase ⁽¹⁷⁾. Los datos climáticos utilizados para el cálculo de ET_o (año 1981-2019), y análisis de serie histórica de precipitaciones, son los correspondientes a la estación agroclimática Las Brujas del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, ubicada a 35 km del experimento (34°40'15.76"S; 56°20'28.67"O).

2.4 Determinaciones realizadas

La humedad del suelo fue monitoreada con sonda FDR (Frequency Domain Reflectometry, Delta-T



Devices™, USA), semanalmente desde la siembra del cultivo hasta la cosecha del mismo. Se colocó un tubo de acceso en cada tratamiento, en los dos bloques centrales. La sonda fue calibrada para medir en tres profundidades, de 0 a 20, 20 a 40 y de 40 a 60 cm, con el método gravimétrico de medición de agua en suelo acorde a Marano et al. (18).

Previamente a la elección del equipo de riego de pivote central para realizar el experimento, se midió la lámina de riego recogida y el coeficiente de uniformidad del pivote mediante la metodología de Heerman y Hein (19) descrita en Tarjuelo (20) obteniendo resultados satisfactorios.

En estado V3 de desarrollo del cultivo, previo a la aplicación de los tratamientos, se tomaron muestras de suelo (20 tomas) por bloque a las profundidades de 0 a 20 cm y 20 a 40 cm. Todas las muestras se secaron a 40 °C y se molieron para determinar: textura por el método Bouyoucos (21); materia orgánica (MO) mediante oxidación con $K_2Cr_2O_7$ en H_2SO_4 (22); pH en agua por potenciometría; nitratos (NO_3^-) por colorimetría (23); P disponible por el método Bray 1 (24); y bases intercambiables (K, Ca, Mg y Na) con extracción con acetato de amonio 1N (25). Posteriormente a cosecha se tomaron muestras a la profundidad de 0 a 20 cm y 20 a 40 cm por parcela para determinar NO_3^- .

En la emergencia del cultivo se determinó el porcentaje de implantación de acuerdo al total de semillas sembradas. En planta, a los estados de desarrollo V3, V6, R1 y cosecha, se determinó la producción de biomasa aérea, separando grano del resto de la planta para estimar absorción total de N. La concentración de N se determinó por el método de Kjeldahl (26). Semanalmente se midió altura de planta y se registró etapa fenológica de acuerdo a Ritchie y Hanway (27). A cosecha se determinó, además, población, producción de grano y humedad de grano, utilizando humidímetro portátil, peso de mil granos, espigas.m⁻², espigas.planta⁻¹ y número de granos.espiga⁻¹.

Para cada tratamiento, en los estados fenológicos V6, R1 y MF, se estimó la cantidad de N que faltó para alcanzar el nivel de suficiencia sugerido por

Lemaire [1] y [2] y un Índice de Suficiencia de N (ISN) [3]. La concentración y cantidad absorbida de N en cada tratamiento se analizó con el mismo modelo [1]

$$\% \text{ Óptimo} = 3,4 * \text{biomasa}^{-0,37} \quad [1]$$

$$\text{kgN faltante} = (\% \text{ Óptimo} - \% \text{ Medido}) / 100 * \text{biomasa} \quad [2]$$

$$\text{ISN} = \% \text{ Óptimo} / \% \text{ Medido} \quad [3]$$

Donde % Óptimo es la concentración de nitrógeno (%) óptimo para la cantidad de biomasa aérea desarrollada por el cultivo. Los kg de N faltantes es la cantidad de N que le faltó al cultivo para alcanzar el nivel óptimo.

Los indicadores relativos a N que proponen Iqbal et al. (28) y que fueron tenidos en cuenta en este estudio son la Eficiencia de Uso del Nitrógeno (EUN) [4] y la Eficiencia Agronómica del N (EAN) [5].

$$\text{EUN} = ((\text{N absorbido en cada tratamiento} - \text{N Parcela testigo sin fertilizar}) / \text{Cantidad de N aplicado}) * 100 \quad [4]$$

$$\text{EAN} = (\text{Rendimiento en grano de cada tratamiento} - \text{Rendimiento en grano de parcela testigo}) / \text{Cantidad de N aplicado} \quad [5]$$

Luego de culminado el ensayo, se recalcularon los valores de Kc por tratamiento y por fase, así como la duración de cada etapa del ciclo del cultivo (29). De acuerdo a FAO-56 (17), se distinguieron cuatro etapas o fases en el ciclo del cultivo: fase inicial, de desarrollo, de mediados de temporada y final.

Se utilizaron dos valores de Kc inicial, uno previo al riego, Kc1 correspondiente al valor de tabla de FAO (17) y otro luego que se inició el riego, Kc 2, correspondiente al valor de gráfico de Kc inicial para la frecuencia de humedecimiento del suelo de FAO-56 (17). Los coeficientes de cultivo de desarrollo del cultivo, mediados de temporada y final de temporada se nombraron como Kc 3, 4 y 5 respectivamente.

Para esto se utilizaron los valores de humedad del suelo medidos a profundidad radicular con la sonda FDR y los valores estimados por el balance teórico. El ajuste para recalculer los valores se realizó minimizando la suma de cuadrados del error



entre ambos valores. Con esta metodología se corrigió además la ET de cada tratamiento, se determinó la efectividad de cada riego (riego neto), la lluvia efectiva y se obtuvieron los indicadores de uso de agua propuestos por Caviglia et al.⁽³⁰⁾ y descriptos por Trenbath⁽³¹⁾: Productividad del agua (PA) [6], Eficiencia de Captura (ECA) [7] y Eficiencia de Uso del Agua (EUA) [8].

PA= Eficiencia de Captura del agua disponible (ECA) * Eficiencia de Uso del Agua (EUA) [6]

ECA= Suma evapotranspiración del cultivo (ETc) / agua total disponible (lluvia y riego) [7]

EUA= Rendimiento en grano / Uso de agua en la estación de crecimiento (ETc)⁽³²⁾ [8]

Para la comparación de medias de las variables producción total de materia seca, rendimiento en grano, eficiencia del uso del agua (EUA) y productividad del agua (PA) en cada estado de desarrollo del cultivo, se utilizó el test de LSD – Fisher con corrección Bonferroni para el valor de $p^{(33)}$. Para esta comparación se consideró a los efectos tratamiento y bloque y se asumió que los tratamientos tendrían varianzas independientes [9].

$$Y = \mu + \text{tratamiento} + \text{bloque} + \varepsilon (0, \sigma) \quad [9]$$

Donde Y representa la variable de respuesta y “tratamiento” corresponde a los diferentes tratamientos de fertilización.

Al llegar el maíz al estado de desarrollo R1 se le tomó una foto área desde 45 metros de altura con una cámara de 20 megapíxeles. A cada parcela se le midió el color, en las escala rojo (R), verde (G) y azul (B), con el software AP Fill Ink Coverage Meter. Con los valores obtenidos se estimó un índice color [10] (InCol). Se analizó la correlación entre los valores de color e InCol con: % N; biomasa; ISN; y rendimiento de grano ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

$$\text{InCol} = (G-R) / (G+R) \quad [10]$$

3. Resultados

3.1 Análisis de suelo y solución concentrada para la fertilización

De acuerdo a los resultados de las mediciones del análisis textural del suelo (Cuadro 1), se reafirma la clasificación correspondiente realizada a partir de Altamirano et al.⁽¹³⁾.

Cuadro 1. Análisis textural de suelo y Densidad aparente por horizonte.

Horizonte	Espesor cm	Dap g cm^{-3-1}	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clasificación
A	24	1,53	16	49	36	Franco arcillo limoso
B1	16	1,47	12	42	46	Arcillo limoso
B2	25	1,47	9	40	51	Arcilloso
C	35	1,50	11	39	50	Arcilloso

En el Cuadro 2 se presenta el análisis químico del suelo por horizonte previo a la siembra del maíz.

Cuadro 2. Análisis químico del suelo previo a siembra.

Horizonte	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	C %	Ca — meq	Mg 100g	K suelo ⁻¹	Na —
A	4,98	135	1,76	7,21	1,72	0,62	0,44
B1	5,37	242	1,14	12,11	3,83	0,75	0,57
B2	5,92	188	0,63	13,77	5,01	0,87	0,70
C	6,12	293	0,67	15,25	5,61	0,91	0,72

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de los análisis de CE y pH de las soluciones concentradas utilizadas en el riego.

Cuadro 3. Análisis de CE y pH de cada solución concentrada utilizada. CE en dS m^{-1}

% U+TSA	CE (mS cm^{-1})	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
2,40	1,65	7,10	15,00
3,70	2,27	7,08	15,10
4,90	2,42	7,10	15,20
7,30	3,97	7,12	15,10
9,70	4,97	7,12	14,70
14,60	6,79	7,16	13,90
19,50	8,09	7,22	13,20
21,90	8,69	7,24	12,90
29,20	9,77	7,31	12,00
68,18	10,26	7,46	12,00

Cabe destacar que los parámetros analizados son los correspondientes a las soluciones concentradas, por lo que el cultivo efectivamente



recibió una solución más diluida, con valores de CE inferiores a los mostrados.

3.2 Situación hídrica

En la caracterización del año según la lluvia solo el 28 % de los últimos 40 años de la serie superaron los 621 mm, registro de lluvia acumulada entre octubre y febrero para el año del estudio. En los meses de diciembre y enero, el año se ubicó como

el más lluvioso de la serie analizada, registrando 569 mm. En cuanto a la ETo, con 608 mm entre octubre y febrero, el año se clasificó como un año de baja demanda atmosférica; solo el 5,1 % de los años registraron valores por debajo del año de estudio ⁽⁴⁰⁾.

En base a los valores de Kc 4 y las diferentes duraciones de esta fase, la fertilización con N promovió la mayor biomasa y atrasó la senescencia de las hojas, manteniendo durante más tiempo la actividad fotosintética del cultivo (Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores de Kc ajustados y su duración en días para cada tratamiento.

Trat ⁽¹⁾	— Kc1 —		— Kc2 —		— Kc3 —		—Kc4 —		— Kc5 —		Kcaj	Kc FAO —CME—
	Valor ⁽²⁾	día ⁽³⁾	valor	día	valor	día	valor	día	Valor	día		
T0	0,3	17	0,9	65	0,001*día	75	0,910	110	-0,001 * día	146	290	725
C0	0,3	17	0,9	65	0,024*día	81	1,284	116	-0,007 * día	146	196	321
F1	0,3	17	0,9	65	0,024*día	81	1,284	116	-0,007 * día	146	220	280
F2	0,3	17	0,9	62	0,025*día	78	1,300	116	-0,003 * día	146	370	691
F3	0,3	17	0,9	61	0,025*día	77	1,300	122	-0,003 * día	146	376	725

⁽¹⁾T0: tratamiento testigo sin fertilización; C0: tratamiento fertilizado con 150 UN con urea azufrada; F1: tratamiento fertilizado con 150 UN con U+TSA en los estadios de desarrollo V3 y V6; F2: tratamiento fertilizado con 150 UN con U+TSA semanalmente desde el estadio V3; F3: tratamiento fertilizado con 225 UN con U+TSA semanalmente desde el estadio V3. ⁽²⁾Valor de kc con coeficiente de pendiente de la curva. ⁽³⁾días desde el 6 de octubre (10 días pre siembra) hasta el cual se mantiene el valor de Kc.

En las Figuras 1 y 2, se presentan los balances hídricos en los primeros 40 cm de profundidad de los tratamientos más contrastantes del experimento en cuanto a demanda hídrica, que son el F3, de mayor demanda y el T0, de menor.

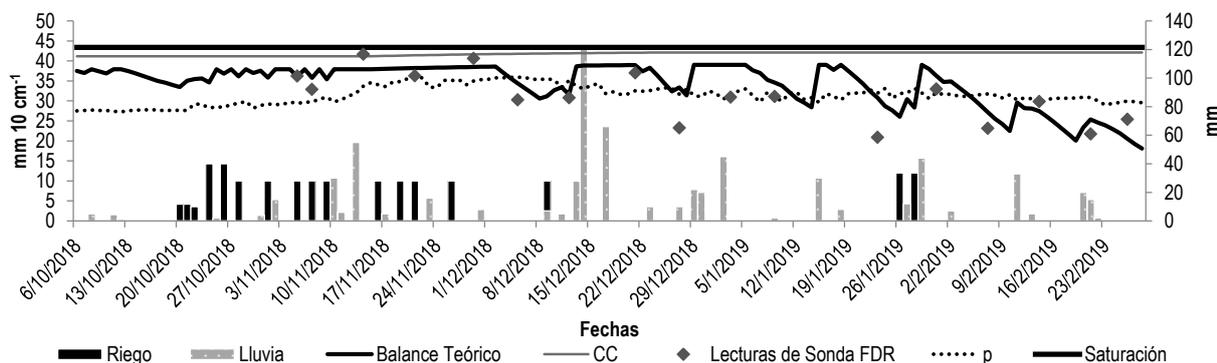


Figura 1. Balance hídrico del tratamiento F3.

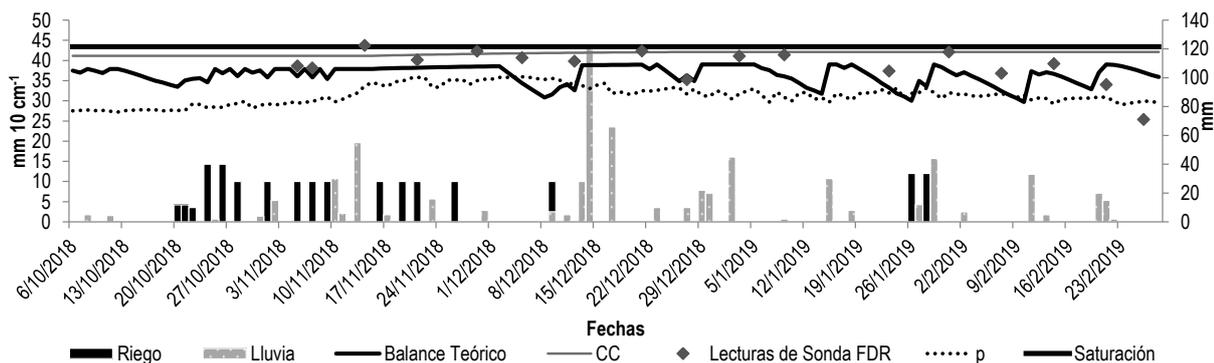


Figura 2. Balance hídrico del tratamiento T0.

3.3 Producción de biomasa

La producción de biomasa aérea sin considerar el grano al estado V3 no presentó diferencia entre los tratamientos por lo cual el ensayo comenzó en una condición de biomasa similar al iniciarse los tratamientos correspondientes (Figura 3).

La producción de biomasa de los tratamientos fertilizados comenzó a diferenciarse del testigo al llegar al estado de R1 y la diferencia aumentó hasta llegar al estado madurez fisiológica (MF).

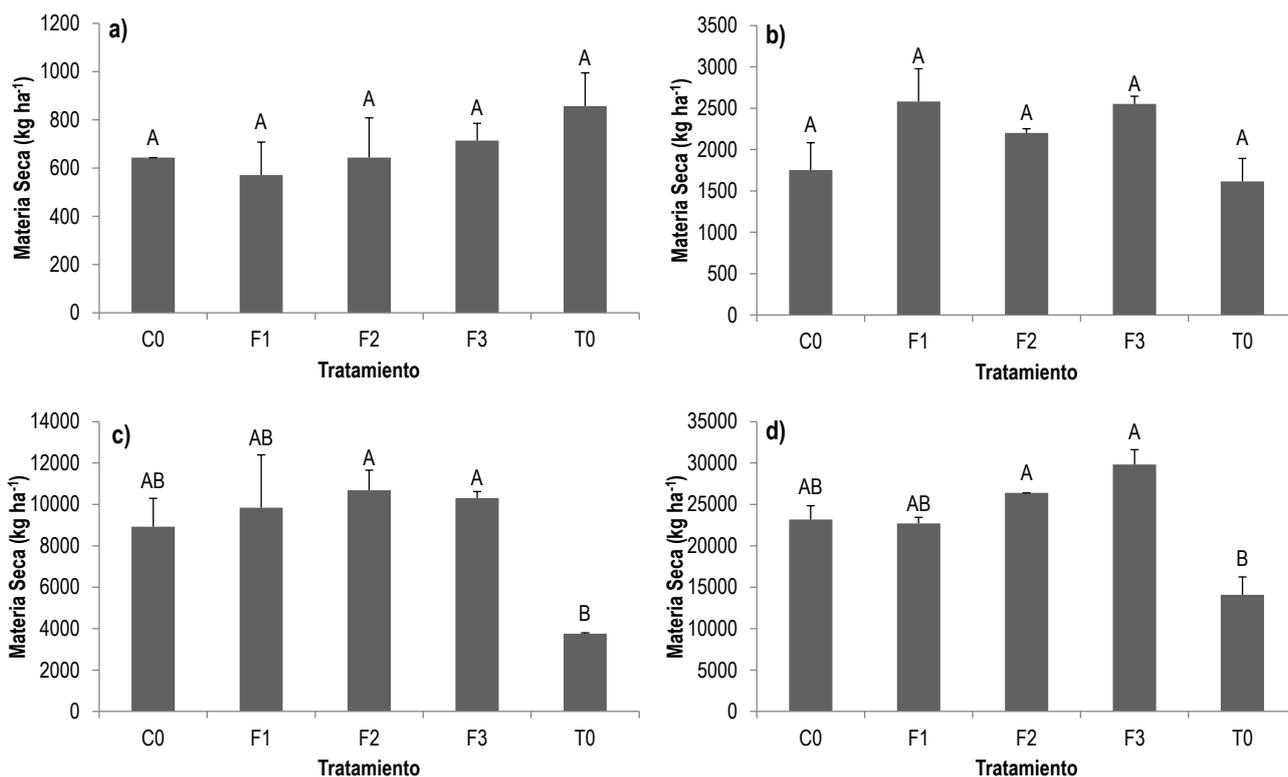


Figura 3. Producción de biomasa en cuatro estados fenológicos del cultivo. a) En estado de desarrollo V3; b) en V6; c) en R1 y d) a MF. Letras diferentes indican diferencias significativas entre medias de tratamiento ($Pr > |t|$) utilizando un p valor de 0,05 y corrección Bonferroni. Las líneas sobre las barras indican (\pm) el error estándar. T0: tratamiento testigo sin fertilización; C0: tratamiento fertilizado con 150 UN con urea azufrada; F1: tratamiento fertilizado con 150 UN con U+TSA en los estadios de desarrollo V3 y V6; F2: tratamiento fertilizado con 150 UN con U+TSA semanalmente desde el estadio V3; F3: tratamiento fertilizado con 225 UN con U+TSA semanalmente desde el estadio V3.



3.4 Producción de grano

La producción de grano presentó mayor rendimiento promedio en aquellos cultivos donde el fertilizante fue fraccionado semanalmente con respecto a los dosificados en dos oportunidades (Figura 4). Esta tendencia también fue observada

en la acumulación de biomasa en MF. Sin embargo, la alta variabilidad entre las parcelas no permitió manifestar diferencias estadísticamente significativas ni en producción de grano ($p = 0,72$), ni en biomasa acumulada en MF ($p = 0,0887$), entre los tratamientos.

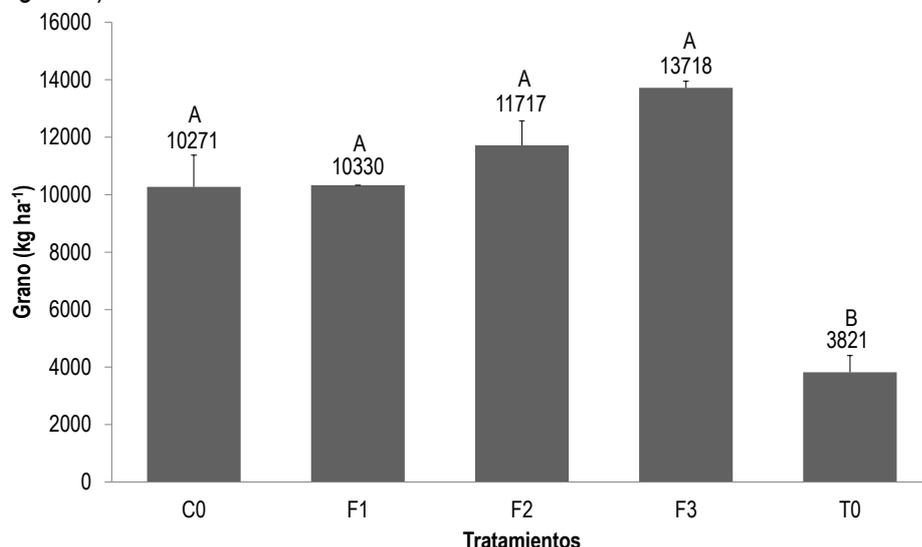


Figura 4. Producción de grano de los diferentes tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre medias de tratamiento ($Pr > |t|$) utilizando un p valor de 0,05 y corrección Bonferroni. Las líneas sobre las barras indican (\pm) el error estándar. T0: tratamiento testigo sin fertilización; C0: tratamiento fertilizado con 150 UN con urea azufrada; F1: tratamiento fertilizado con 150 UN con U+TSA en los estadios de desarrollo V3 y V6; F2: tratamiento fertilizado con 150 UN con U+TSA semanalmente desde el estadio V3; F3: tratamiento fertilizado con 225 UN con U+TSA semanalmente desde el estadio V3.



3.5 El Nitrógeno como limitante

Según la producción de grano en función del porcentaje de N en grano y en función del déficit de kg.N absorbidos (Figura 5), el rendimiento se incrementó a medida que la concentración N aumentó hasta 1,47 % N en V6 y hasta 1,36 % N en R1.

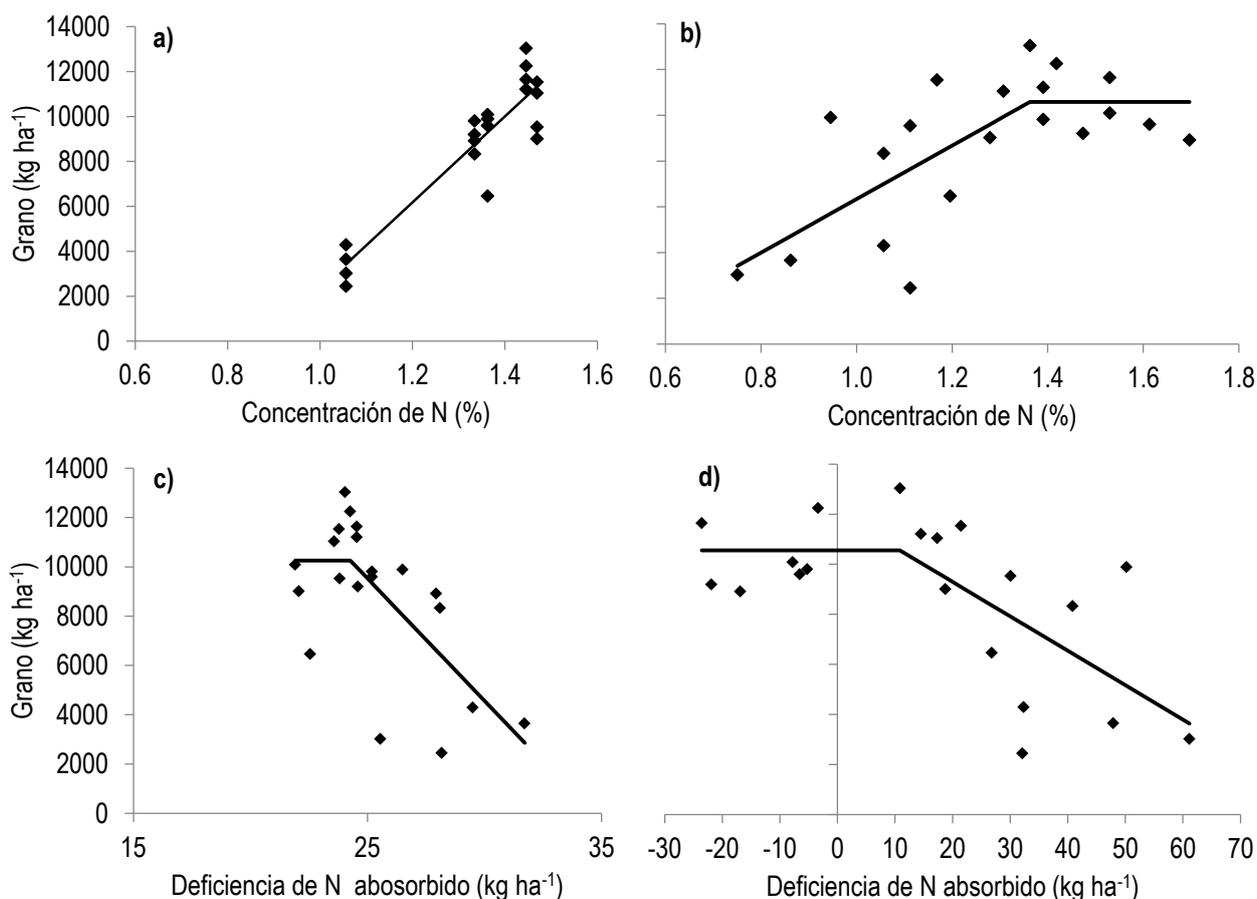


Figura 5. Rendimiento de grano en función del porcentaje de N en biomasa, y en función del déficit de N absorbidos a) y c) en estado de desarrollo V6; b) y d) en estado de desarrollo R1.

Al momento en que el maíz se encontraba en V3, todos los tratamientos presentaban igual estado de nutrición nitrogenada. Sin embargo, la absorción de N a lo largo del desarrollo del cultivo fue insuficiente y afectó negativamente la expresión del rendimiento de grano, excepto en el tratamiento F3 (y algunas parcelas de F2) que

aseguró que el cultivo absorbiese suficiente cantidad de N (Figura 5 d).



3.6 Diagnóstico por imagen

Los colores y el índice de color (InCol) se relacionaron con la biomasa, concentración de N en estado V6, índice de suficiencia de N (ISN), al estado de R1 y la producción final de grano. Se observó que el valor del color rojo (R) y el InCol se

comportaron en forma similar. Sin embargo, el InCol tuvo mayor relación con las cuatro variables estudiadas, por lo que podría ser de mayor utilidad para el diagnóstico de nutrición nitrogenada (Cuadro 5).

Cuadro 5. Coeficiente de correlación entre los valores de color rojo (R), verde (G) y azul (B), índice de color con biomasa producida, concentración de N en planta (% N), Índice de suficiencia de N (ISN) y producción de grano.

Variable estudiada	Color			Índice de color (G-R)/(G+R)
	R	G	B	
Biomasa (kg.ha ⁻¹ MS)	-0,70**	-0,58**	-0,50**	0,74**
Concentración de N (%)	-0,51**	-0,35 NS	-0,27 NS	0,65**
ISN	0,78**	0,62**	0,52**	-0,87**
Producción grano (kg.ha ⁻¹)	-0,93**	-0,82**	-0,69**	0,93**

** Diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre correlaciones; NS indica diferencias no significativas.

4. Discusión y conclusiones

4.1 Análisis de suelo y solución concentrada para la fertilización

El horizonte A tuvo un valor de densidad aparente de 1,53 g cm³ ⁻¹, alto en relación a su granulometría franco arcillo limosa, que podría estar indicando la existencia de un efecto de compactación, que pudo también ocurrir en los horizontes B y C ⁽³⁴⁾.

Según el análisis químico del suelo, el valor de pH fue bajo (4,98) en relación al valor en el que se da la máxima producción de grano del maíz que es próximo a pH 6,0, con variaciones según tipo de suelo y contenido de aluminio ⁽³⁵⁾. A su vez, los valores de bases fueron bajos, como también el de MO con respecto al suelo modal ⁽¹³⁾. Cabe destacar que el K no presentó valores que puedan ser limitantes para el cultivo ⁽³⁶⁾. A su vez, el P Bray 1 no fue limitante, aunque con una alta estratificación entre los primeros 20 cm y los siguientes 20cm, los resultados de análisis fueron de 29 mg kg⁻¹ en los primeros 20 cm de suelo y de 7 mg kg⁻¹ en el tramo de 20 a 40 cm ⁽³⁷⁾. Los valores de NO₃⁻ fueron 4 y 3 mg kg⁻¹ para los tramos de 0 a 20 y 20 a 40 cm, respectivamente. La cantidad de NO₃⁻ en el perfil del suelo fue superior al momento de la cosecha y fue más del

doble en el estrato de 0 a 20 cm con respecto a 20 a 40 cm de profundidad. Los resultados podrían explicarse por el excedente de la fertilización y a qué próximo al frente de movimiento del agua se da la concentración máxima de NO₃⁻ ⁽³⁸⁾. El aumento desde la siembra a la cosecha también podría favorecerse por el aumen

to de la mineralización durante el período estival, dada la mayor temperatura del suelo.

Los valores de CE y pH de las soluciones concentradas utilizadas en el riego se encontraron dentro de los rangos aceptados de acuerdo a Urrestarazu ⁽¹⁴⁾. El agua de riego utilizada presentó un valor inferior al promedio de cuatro muestreos de agua superficial de la zona rural de Canelones y Montevideo (0,601 mS cm⁻¹) ⁽³⁹⁾.

4.2 Situación hídrica

Lafitte ⁽⁴¹⁾ y Rodríguez et al. ⁽⁴²⁾ obtuvieron resultados similares al presente experimento, determinaron que el N aplicado a maíz promovió que la fase vegetativa y llenado de grano fueran más largas, permitiendo mayor interceptación de radiación y una tasa fotosintética más alta, favoreciendo mayor producción de fotoasimilados, y, por tanto, mayores rendimientos. A su vez, Soto



et al.⁽⁴³⁾, Ruiz⁽⁴⁴⁾ observaron que el incremento de la dosis fertilización nitrogenada tuvo como consecuencia la disminución de hojas senescentes.

El tratamiento sin fertilización adicional de N fue el primero en llegar al período definido por Kc 4 y el primero en comenzar el período de descenso de Kc. Los resultados son coincidentes con lo observado por Barrios y Baso⁽⁴⁵⁾, quienes estudiaron diferentes híbridos y su comportamiento en relación a distintas dosis de N, concluyendo que en la mayoría de los híbridos el testigo sin N presentó menos días a floración y a maduración que el resto de los tratamientos fertilizados.

Por otra parte, los tratamientos de fertilización semanal (F2 y F3) alcanzaron antes el Kc 4 que los fertilizados en dos momentos (C0 y F1), y el valor máximo de Kc fue mayor al fertilizar semanalmente, probablemente debido a la mayor producción de biomasa. El tratamiento F3 fue el que mantuvo por más tiempo el Kc máximo, lo cual se debería a que mantuvo su follaje verde por un período mayor de tiempo. Según lo anterior esto debería haberse reflejado en el rendimiento final ya que diversos autores han determinado que el rendimiento responde positivamente a la aplicación de N alargando el ciclo del cultivo⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾.

Los tratamientos con fertilización nitrogenada tuvieron mayor consumo de agua, dada una mayor producción de biomasa respecto a T0. La tendencia de mayor consumo se acentúa con más énfasis a partir de mediados de diciembre, época de mayor demanda atmosférica, salvo desde mediados de noviembre a principios de diciembre en que el suelo estuvo en saturación, condición que fue reflejada por el balance teórico y confirmada por las medidas de sonda. El mayor consumo de agua en los tratamientos con fertilización nitrogenada se evidenció en la mayor frecuencia en que el agua disponible descendió por debajo del umbral a partir de la última semana de enero y durante el mes de febrero, período en el que se registraron menos lluvias.

La fertilización con N aumentó la EUA y PA. En el mismo sentido, Pietrobón et al.⁽⁵⁰⁾ reportaron que

el aumento en la disponibilidad de N disminuyó la EUN e incrementó la EUA. Por otra parte, el fraccionamiento semanal de la fertilización no aumentó la PA. A su vez, no hubo efecto de las diferentes fuentes de N sobre EUA y PA. Pedrol et al.⁽⁵¹⁾ en ensayos de maíz bajo riego observaron que con distintas dosis de N (120, 180 y 240 kg.N ha⁻¹), la EUA fue de entre 15,9 y 17,9 kg mm⁻¹. Estos resultados se presentan similares a los obtenidos en los tratamientos F1 (16,6 kg mm⁻¹) y F2 (18,5 kg mm⁻¹), sin embargo la EUA en F3 (21,6 kg mm⁻¹) es levemente superior incluso a la dosis mayor del mencionado experimento.

4.3 Producción de biomasa

Al comparar la biomasa producida hasta MF sin considerar el grano, el tratamiento T0 tuvo menor biomasa que el resto (14078 kg.ha⁻¹ del tratamiento testigo vs. 25527 kg.ha⁻¹ promedio del resto de los tratamientos). La falta de diferencia estadística entre los tratamientos fertilizados pudo deberse a la alta variabilidad espacial del experimento, que permitió un suministro de N adecuado aún en algunas parcelas de los tratamientos con menor fertilización. Esta variabilidad no pudo ser evaluada en el diseño experimental.

Al contrastar las dos diferentes fuentes de N (urea azufrada y U+TSA) no hubo efecto en ninguna de las variables evaluadas. Sin embargo, Fontanetto et al.⁽⁵²⁾ en investigaciones desarrolladas en la región pampeana norte de Argentina observaron mayores producciones de maíz utilizando U+TSA con respecto a la urea, ambos aplicados al voleo a una dosis de 100 kg.N ha⁻¹, en fase vegetativa. Los autores atribuyen esta mayor eficiencia en la fuente nitrogenada U+TSA a menores pérdidas de N por volatilización con respecto a las pérdidas que tuvo la urea. Es esperable que la aplicación de ambas fuentes, en este ensayo, no se haya hecho en condiciones que hubiesen favorecido la pérdida de N por la vía de la volatilización en forma de amoníaco.



4.4 Producción de grano

Roque et al ⁽⁵³⁾ observaron que es posible la obtención de mayores rendimientos debido a menor exposición a pérdidas de N por lavado del suelo, en un esquema de seis aplicaciones con respecto a dos. Al respecto, Esteve ⁽⁵⁴⁾ demostró en varias especies y en distintos sistemas de riego, que es más eficiente el fraccionamiento del fertilizante en cinco o seis aplicaciones con respecto a dos.

En el presente trabajo, la producción de granos aumentó en promedio 40 kg.ha⁻¹ grano por cada kg.N ha⁻¹ aportado. El incremento de la fertilización aumentó la biomasa alcanzada en V6, pero el efecto desapareció posteriormente y tampoco incidió en el rendimiento en grano. Al respecto, Wong et al. ⁽⁵⁵⁾, en un experimento de dos años de evaluación observaron diferencias significativas ante el aumento de dosis de 125 a 375 kg.N ha⁻¹ en el rendimiento de materia seca. Sin embargo, estos autores no encontraron diferencias ni en Índice de cosecha (IC), ni en rendimiento de grano ⁽⁵⁶⁾. Luego del estado de V6 el aporte del suelo fue suficiente para compensar las diferencias de aporte de N por parte de las fertilizaciones, en algunas parcelas. Esto puede suponerse ya que el rendimiento en grano aumentó con la concentración de N en planta y la cantidad de N absorbida por el cultivo. Una de las fuentes de N en este caso pudieron ser los residuos vegetales en suelo provenientes del cultivo anterior de avena, ya que pueden aportar cantidades significativas de N disponible para el cultivo, durante su mineralización ⁽⁵⁷⁾.

4.5 El Nitrógeno como limitante

Según el modelo propuesto por Lemaire, los niveles críticos para la producción estimada serían de 1,42 y 1,40 % N, en los estados V6 y R1, respectivamente, similares a los aquí observados. En el estado de V6 la producción de grano disminuyó cuando el déficit de absorción de N superó los 24 kg.ha⁻¹, mientras que en el estado de R1 el descenso de rendimiento comenzó con un déficit de absorción de 11 kg.ha⁻¹. En V6 los

tratamientos F2 y F3 fueron los únicos que lograron (en todas las repeticiones) un déficit de N inferior a 24,5 kg.ha⁻¹, dada la estrategia de fertilización semanal y de aumento de dosis en el caso de F3. Esto podría sugerir que la dosis de N correspondiente a un cultivo de maíz con riego se ubicaría por encima de la dosis que surge de la guía IPNI ⁽¹⁵⁾, que es de 166 kg.ha⁻¹, si esta se aplica utilizando fertilizantes sólidos en cobertura.

La concentración de N disminuyó a medida que la biomasa del cultivo aumentó incluso ante un suministro adecuado de N ⁽⁵⁸⁾. La fertilización con N aseguró mayor absorción de N y aumento de rendimiento. La falta de diferencias entre tratamientos podría deberse al suministro no limitante del suelo ⁽⁵⁹⁾. A su vez, se llegó al valor de ISN de 1 en el estado de R1, es decir que la cantidad de N de la planta alcanzó el óptimo para su nivel de biomasa producida en dicho estadio. De esta forma se evidencia que todos los tratamientos habrían tenido deficiencia de N de no haberse fertilizado en V6. El incremento de concentración de N en planta y la deficiencia de N absorbido en relación a la producción de grano alcanzaron un plateau, por lo que no sería posible que hubiese aumentado el rendimiento máximo de haber incrementado la absorción de N del cultivo.

Ceriani e Inella ⁽⁶⁰⁾ observaron que en ambientes de riego se generan las condiciones para una mayor absorción de N en relación a secano. Al respecto, determinaron que la respuesta de maíz bajo riego fue de hasta 188 kg.ha⁻¹ y hasta el estado de desarrollo V10, con una EUN de 20,7 kg grano kg.N⁻¹, mientras que en secano la respuesta fue de 123 kg.ha⁻¹ y hasta un estado de desarrollo V6, con una EUN de 10,7 kg grano kg.N⁻¹. El rendimiento de grano fue de 6132 y 10727 kg.ha⁻¹ en secano y riego respectivamente. En el presente trabajo los promedios de EUN (45,63 kg.Nkg.N⁻¹) y EAN (45,75 kg grano kg.N⁻¹) fueron ampliamente superiores. Esta situación podría explicarse por la mayor diferencia entre los tratamientos de fertilización y el testigo, y a la mayor disponibilidad hídrica durante el crecimiento (827 vs. 482 mm).

Abraham y Falco ⁽⁶¹⁾ en maíz bajo riego en un experimento ubicado en el litoral oeste de Uruguay, no encontraron diferencias entre aplicar



180 kg.ha⁻¹ en V6 o distribuidas entre V6, V10 y V12, presentando un rendimiento promedio de 14394 kg.ha⁻¹ de grano, superior al secano. Los autores observaron que el riego puede generar un ambiente propicio para una mayor mineralización de N del suelo y una mayor absorción que puede darse en etapas más avanzadas, con respecto al maíz en secano. Es posible que en el presente estudio los tratamientos F2 y F3, que mantuvieron dosificaciones de fertilizante en etapas avanzadas del maíz, sin riego hubiesen presentado menor mineralización, absorción de N y, por tanto, un menor rendimiento. No obstante, si bien las deficiencias de N en secano pueden ser menores, el potencial de rendimiento también. En Uruguay, Ceriani e Inella ⁽⁶⁰⁾ encontraron que el maíz presentó mayor rendimiento en grano por kg de N agregado en riego que en secano. Además la EAN tuvo su punto más alto con dosis de 150 kg.ha⁻¹, descendiendo con dosis superiores de entorno a 200 kg.ha⁻¹. En el presente trabajo, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos.

3.6 Diagnóstico por imagen

Elwadie et al. ⁽⁶²⁾ estudiaron diferentes espectros e índices de colores en el cultivo de maíz y determinaron que utilizando aquellos que se basan en reflectancia verde como el llamado GNVDI, de características relativamente similares al InCol, tienen mejor correlación que los basados en reflectancia roja para la estimación de la producción de grano. A su vez, estos autores observaron que la predicción para producción de grano mejoró progresivamente durante la etapa de crecimiento, fue óptima en R5 y disminuyó en madurez. Esta situación se explicaría porque en etapas tempranas el tamaño fotosintético del área foliar no sería representativo ⁽⁶²⁾. Es importante considerar, sin embargo, que la utilidad del diagnóstico radica en que pueda realizarse un momento donde pueda corregirse la deficiencia, lo cual no sería posible en R5.

En Nebraska (USA), Blackmer et al. ⁽⁶³⁾ analizando imágenes según diferentes ondas de reflectancia para la utilización en diagnóstico del estado nutricional del maíz, encontraron que alrededor de 550 (G) y 710 (R) nm se obtiene la mejor

detección de deficiencia de N en el rango espectral de 400 a 1000 nm. A su vez, expresaron que el uso de relaciones como el InCol puede tener la ventaja de compensar defectos en condiciones de luz fluctuante. Diversos autores, entre ellos García y Espinosa ⁽⁶⁴⁾ lograron determinar dosis de N a ser aplicada utilizando un índice de verdor en etapas más susceptibles a estrés por falta de N, de V6 a V12.

4.7 Conclusiones

Es necesario fertilizar con altas dosis de N para asegurar altos rendimientos de cultivo de maíz regado. Sin embargo las fuentes de N aquí utilizadas no generaron diferencias de respuesta del cultivo.

El fraccionamiento semanal de la fertilización con N en conjunto con el monitoreo del status de N en planta, en el período comprendido entre V6 y R1, permitiría flexibilizar la estrategia de fertilización con la posibilidad de ahorro de fertilizante.

La utilización del riego resulta fundamental para generar las condiciones para una mayor absorción de N, que permita un mayor rendimiento potencial del maíz.

El análisis de color de imágenes del cultivo es una herramienta promisorio, ya que tiene alta correlación con variables que permitirían corregir la fertilización del cultivo.

Author contribution statement

BA: concepción, diseño del experimento, supervisión, conducción, procesamiento estadístico, interpretación de resultados, redacción, corrección de redacción.

BMM: concepción, diseño del experimento, supervisión, conducción, interpretación de resultados, corrección de redacción.

EJM: concepción, diseño del experimento, supervisión, conducción, análisis de laboratorio, Interpretación de resultados, revisión de literatura, redacción.



LP: concepción, diseño del experimento, supervisión, conducción, interpretación de resultados, corrección de redacción.

Referencias

1. Morceli P. 2014. El mercado mundial del maíz. En: Red de Políticas Agropecuarias. El mercado del maíz en los países del CAS. Montevideo, Uruguay. Consejo Agropecuario del Sur. 9 – 16.
2. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2017. Anuario estadístico agropecuario 2017. (en línea). Montevideo. 214 p. Consultado 4 dic. 2017. Disponible en: http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/diea-anuario2017_0.pdf
3. Giménez L. 2012 ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? ; capítulo 3. In: Seminario Internacional, 2., 2012, Salto, UY. Riego en cultivos y pasturas. Montevideo: INIA, 2012. p. 35-41.
4. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2016. Encuesta agrícola “invierno 2016”. Serie Encuestas N° 337. Montevideo. 19 p. Consultado 6 dic. 2017. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/estadisticas/produccion-vegetal/agricultura-de-secano/encuesta-agr%C3%ADcola-invierno-2016>.
5. Sawchik J, Ceretta S. 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción (CALMER-AUSID-INIA). En: Jornada Técnica de Cultivos de Verano. Serie de Actividades de Difusión N° 417. 28-33.
6. Giménez L, García Petillo M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. Agrociencia Uruguay. 15 (2): 100-108.
7. Castaño JP, Gimenez A, Ceroni M, Forest J, Aunchayna R. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980–2009. Montevideo, INIA. 40 p.
- (Serie Técnica no. 193).
8. MGAP. DGRN. (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - Dirección General de Recursos Naturales, UY). 2016. Registros de permisos de importación de Equipos de Riego. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 6 dic 2017. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy>
9. Ciampitti I, García F. 2008. Balance y eficiencia de uso de los nutrientes en sistemas agrícolas. Revista Horizonte A. 4 (18): 22-28.
10. Cadahía LC. 2005. (Ed.) Fertirrigación: Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Mundi-Prensa Libros. 681 p.
11. Lamm FR, Schlegel AJ. 2000. Nitrogen fertilization for corn production when using lepa center pivot sprinklers. En: National Irrigation Symposium proceeding of the 4th Decennial Symposium. (4°, 2000, Tribune, Kansas) Proceedings. Phoenix, Arizona. American Society of Agricultural Engineers. 14-16.
12. Dekalb. 2013. Guía técnica Dekalb 2013. 43 p.
13. Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay; clasificación de suelos. Montevideo, MAP. DSF. t.1. 96 p.
14. Urrestarazu M. 2004. (Ed.). Tratado de cultivo sin suelo. España: Ediciones Mundi-Prensa. (3ª edición) 914.
15. IPNI (International Plant Nutritional Institute, AR). 2016. Planilla de cálculo para estimar requerimientos nutricionales de cultivos de cereales, oleaginosos, forrajeras e industriales. (en línea). Buenos Aires. s.p. Consultado 17 jun. 2017. Disponible en <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>
16. Rhoads FM, Mansell RS, Hammond LS. 1978. Influence of Water and Fertilizer Management on Yield and Water-input Efficiency of Corn. Agronomy Journal. 70 (2): 305-308.
17. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56, Rome, Italy.
18. Marano RP, Ledesma F, Camussi G,



- Carnevale I. 2012. Uso de sondas FDR para balance de agua en suelo: calibración y aplicación. In Actas XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo/1ª edición. Ed. MNEMOSYNE, Mar del Plata. 10 p.
19. Heermann DF, Hein PR. 1968. Performance characteristics of self-propped center pivot sprinkler irrigation system. Transactions of the ASAE. 11(1): 11-15.
20. Tarjuelo JM. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. 3 ed. Editora Mundi-Prensa, Madrid, España. 569 p.
21. Bouyoucos GJ. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. Agron. J. 54: 464-465.
22. Walkley A, Black TA. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science. 37: 29-38.
23. Mulvaney RL. 1996. Nitrogen-inorganic forms. In Sparks et al. (eds.) Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. p. 1123-1184.
24. Bray RH, Kurtz, LT. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. Soil Science. 59: 39-45.
25. Jackson ML. 1964. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega S.A. Barcelona. España. 662 p.
26. Bremner JM, Mulvaney CS. 1982. Nitrogen total. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR. (Eds). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. ASA. Madison. pp. 595-624.
27. Ritchie W, Hanway J. 1997. How a corn plant develops. State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames. Iowa Special Reports. no.48. 21 p.
28. Iqbal Z, Latif A, Ali S, Iqbal MM. 2003. Effect of fertigated phosphorus on P use efficiency and yield of wheat and maize. Songklanakarin Journal of Science and Technology. 25 (6): 697-702.
29. Allen R. 2006. Evapotranspiración del cultivo; guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. 298 p. (Estudio FAO. Riego y Drenaje no. 56).
30. Caviglia O, Sadras V, Andrade F. 2013. Modelling long-term effects of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the south-eastern Pampas. Field Crops Research. 149: 300-311.
31. Trenbath BR. 1986. Resource use by intercrops. In: Francis, C. A. ed. Multiple cropping systems. New York, United States, MPC. pp. 57-81.
32. Lamm FR, Schlegel AJ. 2000. Nitrogen fertilization for corn production when using lepa center pivot sprinklers. En: National Irrigation Symposium proceeding of the 4th Decennial Symposium. (4°, 2000, Tribune, Kansas) Proceedings. Phoenix, Arizona. American Society of Agricultural Engineers. 14-16.
33. Di Rienzo J, Casanoves F, Balzarini M, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat. FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. Recuperado de: <http://www.infostat.com.ar>.
34. USDA. 1999. Guide Soil Quality Test Kit Guide. USDA Agricultural Research Service. United States of America. 88 p. (National Conservation Service. Soil).
35. Piedrahíta O. 2009. Acidez del suelo. Magnesio Heliconia SA (14): 30.
36. Barbazán MM, Bordoli JM, Coitiño J, del Pino A, Hoffman E, Mazzilli S. 2013. Avances en estudios de potasio en Uruguay. Nutrición de los cultivos para la intensificación productiva sustentable. 151-155.
37. Perdomo, s/f. Recomendación de Dosis de Fertilización [en línea]. 26 de junio de 2020. http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/curso/docs/RecDosis_impr.pdf.
38. Perdomo CH, Barbazán M, Durán Monzoni JM. 2008. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.
39. Teixeira de Mello, F. 2007. Efecto del uso del suelo sobre la calidad del agua y las comunidades de peces en sistemas lóticos de la cuenca baja del



Río Santa Lucía (Uruguay). Tesis de Magíster en Ciencias Ambientales. Montevideo, Uruguay. Facultad de Ciencias. 58 p.

40. INIA. 2020. Banco de Datos Agroclimáticos. Disponible en:

<http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico> . Verificado el 23/9/2020

41. Lafitte H. 2001. Fisiología del maíz tropical. En: Paliwal, Granados, Lafitte y Violic (Eds.). El Maíz en los Trópicos. Mejoramiento y Producción. Roma: CIMMYT-FAO. 8 p.

42. Rodríguez LA, Sombrero S, Cedrán M. 2014. Efectos de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz. Tierras de Castilla y León: Agricultura. (223): 44-51.

43. Soto O, Jahn B, Arredondo S. 2004. Mejoramiento del porcentaje de proteína en maíz para ensilaje con el aumento y parcialización de la fertilización nitrogenada. Agricultura Técnica. 64 (2): 156-162.

44. Ruiz I. 1993. Características nutritivas de hojas verdes y secas de maíz destinado a ensilaje. Agricultura Técnica (Chile) 53:356-358.

45. Barrios M, Basso C. 2018. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre componentes del rendimiento y calidad nutricional del grano de seis híbridos de maíz. Bioagro. 30 (1).

46. Tanaka A, Yamaguchi J. 1981. Producción de materia seca, componentes de rendimiento y rendimiento de grano en maíz. Chapingo: Rama de botánica. (4): 124.

47. Bravo A, Chan J. 1987. Relaciones agua-suelo-planta atmósfera del maíz de riego en zonas semiáridas. Terra. 5 (2): 132-139.

48. Lemcoff J, Loomis R. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize 1. Crop Science. 26 (5): 1017-1022.

49. Blumenthal J, Lyon D, Stroup W. 2003. Optimal plant population and nitrogen fertility for dryland corn in western Nebraska. Agronomy Journal. 95 (4): 878-883.

50. Pietrobón MH, Imvinkelried O, Dellaferrera IM, Montenegro AJ. 2016. Eficiencia De Uso De Los Recursos, Productividad Producción En Maíz

Según Diferentes Cultivos Antecesores. Revista AVE. 15 (1): 74–84. doi:10.14409/fa.v15i1.5874.

51. Pedrol HM, Castellarín JM, 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.

52. Fontanetto H, Keller O, Giailevra D, Belotti L, Negro C. 2008. Aspectos del manejo del cultivo de maíz de segunda y de la fertilización nitrogenada en la región pampeana norte de Argentina. Información Técnica Cultivos de Verano. (112): 37-45.

53. Roqué C, Heredia S, Del Franco ME, Benedetto N, Mastromauro M, Boveda M 2017. Experiencias prácticas sobre manejo de riego por pulsos con enfoque en fertirriego. [En línea]. 4 abril 2020. <https://pyrargentina.com.ar/wp-content/uploads/roque-publicacion-en-la-web-2017.doc-1.pdf>

54. Esteve GJ. 1986. Apuntes sobre riego localizado. Servicio de Extensión Agraria. (2): 29-37.

55. Wong JAC, Sánchez DGR, Ríos JLB, Cervantes GG, Sosa ES. 2006. Rendimiento de maíz forrajero en respuesta a fertilización nitrogenada y densidad de población. Revista Fitotecnia Mexicana. 29 (2): 97-101.

56. Muchow RC. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment III. Grain yield and nitrogen accumulation. Field Crops Research. 18 (1): 31-43. doi.org/10.1016/0378-4290(88)90057-3.

57. Cabrera ML. 2007. Mineralización y nitrificación: procesos claves en el ciclo del nitrógeno. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 34: 1-9.

58. Greenwood DJ, Neeteson JJ, Draycott A. 1986. Quantitative relationships for the dependence of growth rate of arable crops on their nitrogen content, dry weight and aerial environment. In: Lambers H., Neeteson J.J., Stulen I. (eds) Fundamental, Ecological and Agricultural Aspects of Nitrogen Metabolism in Higher Plants.



Developments in Plant and Soil Sciences, vol 19. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4356-8_55

59. Vidal M, Ruiz R, Antúnez A, Araya C. 2015. Antecedentes nutricionales del cultivo de maíz en Chile. En: Antúnez A, Vidal M, Felmer S, González M. eds. Riego por pulsos en maíz grano. Rengo, Chile, INIA Chile. pp. 81-95.

60. Ceriani M, Innella JA. 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.

61. Abraham I, Falco N. 2016. Efecto de la

64. García JP, Espinosa J. 2008. Relación del índice de verdor con la aplicación de nitrógeno en

fertilización nitrogenada tardía (V10-12) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 57 p.

62. Elwadi ME, Pierce FJ, Qi J. 2005. Remote sensing of canopy dynamics and biophysical variables estimation of corn in Michigan. *Agronomy Journal*. 97 (1): 99-105.

63. Blackmer AM, Schepers JS, Varvel GE, Walter-Shea EA. 1996. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agronomy Journal*. 88 (1): 1-5.

diez híbridos de maíz. *Informaciones Agronómicas*. (71): 9-14.

Se enviará a la revista *Agrociencia Uruguay*.

6.2 ANEXOS DE CUADROS Y FIGURAS

Fecha	ETo	Kc	ETc	Lluvias	Déf ac.	Riego	Prof. Rad.	A D Prof. Rad.	p	AFD
	(mm d ⁻¹)		(mm d ⁻¹)							
6/10/2018	2,90	0,30	0,87	0,0	0,87	0,00	20,00	20,60	0,62	12,67
7/10/2018	3,50	0,30	1,05	0,0	1,92	0,00	20,00	20,60	0,61	12,53
8/10/2018	4,00	0,30	1,20	5,0	0,00	0,00	20,00	20,60	0,60	12,40
9/10/2018	3,30	0,30	0,99	0,0	0,99	0,00	20,00	20,60	0,61	12,58
10/10/2018	3,50	0,30	1,05	0,0	2,04	0,00	20,00	20,60	0,61	12,53
11/10/2018	2,40	0,30	0,72	4,4	0,00	0,00	20,00	20,60	0,62	12,80
12/10/2018	1,50	0,30	0,45	1,0	0,00	0,00	20,00	20,60	0,63	13,02
13/10/2018	3,20	0,30	0,96	0,0	0,96	0,00	20,00	20,60	0,61	12,60
14/10/2018	3,70	0,30	1,11	0,0	2,07	0,00	20,00	20,60	0,61	12,48
15/10/2018	4,10	0,30	1,23	0,0	3,30	0,00	20,00	20,60	0,60	12,38
16/10/2018	4,30	0,30	1,29	0,0	4,59	0,00	20,00	20,60	0,60	12,33
17/10/2018	4,10	0,30	1,23	0,0	5,82	0,00	20,00	20,60	0,60	12,38
18/10/2018	3,00	0,30	0,90	0,0	6,72	0,00	20,00	20,60	0,61	12,65
19/10/2018	3,80	0,30	1,14	0,0	7,86	0,00	20,00	20,60	0,60	12,45
20/10/2018	3,50	0,30	1,05	0,0	8,91	4,20	20,00	20,60	0,61	12,53
21/10/2018	3,40	0,30	1,02	0,0	5,73	4,20	20,00	20,60	0,61	12,55
22/10/2018	3,80	0,90	3,42	0,0	4,95	3,55	20,00	20,60	0,51	10,57
23/10/2018	3,60	0,90	3,24	0,0	4,64	0,00	20,00	20,60	0,52	10,72
24/10/2018	2,20	0,90	1,98	0,0	6,62	14,30	20,00	20,60	0,57	11,76
25/10/2018	2,60	0,90	2,34	2,0	0,00	0,00	20,00	20,60	0,56	11,46
26/10/2018	2,40	0,90	2,16	0,0	2,16	14,30	20,00	20,60	0,56	11,61
27/10/2018	3,60	0,90	3,24	0,0	0,00	0,00	20,00	20,60	0,52	10,72
28/10/2018	4,00	0,90	3,60	0,0	3,60	10,00	20,00	20,60	0,51	10,42
29/10/2018	4,90	0,90	4,41	0,0	0,00	0,00	20,00	20,60	0,47	9,76
30/10/2018	2,10	0,90	1,89	0,0	1,89	0,00	20,00	20,60	0,57	11,83
31/10/2018	3,20	0,90	2,88	4,0	0,77	0,00	20,00	20,60	0,53	11,02
1/11/2018	3,80	0,90	3,42	0,0	4,19	10,00	20,00	20,60	0,51	10,57
2/11/2018	3,50	0,90	3,15	15,0	0,00	0,00	20,00	20,60	0,52	10,80
3/11/2018	3,60	0,90	3,24	0,0	0,00	0,00	20,00	20,60	0,52	10,72
4/11/2018	4,60	0,90	4,14	0,0	0,00	0,00	20,00	20,60	0,48	9,98
5/11/2018	4,10	0,90	3,69	0,0	3,69	10,00	20,00	20,60	0,50	10,35
6/11/2018	4,50	0,90	4,05	0,0	0,00	0,00	20,00	20,60	0,49	10,05
7/11/2018	4,70	0,90	4,23	0,0	4,23	10,00	20,00	20,60	0,48	9,91
8/11/2018	5,80	0,90	5,22	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,44	9,09

9/11/2018	5,60	0,90	5,04	0,00	5,04	10,00	20,00	20,60	0,45	9,24
10/11/2018	2,60	0,90	2,34	30,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,56	11,46
11/11/2018	2,60	0,90	2,34	6,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,56	11,46
12/11/2018	3,00	0,90	2,70	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,54	11,17
13/11/2018	3,20	0,90	2,88	55,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,53	11,02
14/11/2018	5,10	0,90	4,59	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,47	9,61
15/11/2018	5,70	0,90	5,13	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,44	9,16
16/11/2018	4,60	0,90	4,14	0,00	0,00	10,00	20,00	20,60	0,48	9,98
17/11/2018	3,60	0,90	3,24	5,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,52	10,72
18/11/2018	5,30	0,90	4,77	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,46	9,46
19/11/2018	5,30	0,90	4,77	0,00	0,00	10,00	20,00	20,60	0,46	9,46
20/11/2018	6,30	0,90	5,67	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,42	8,72
21/11/2018	6,50	0,90	5,85	0,00	0,00	10,00	20,00	20,60	0,42	8,57
22/11/2018	6,20	0,90	5,58	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,43	8,79
23/11/2018	2,20	0,90	1,98	16,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,57	11,76
24/11/2018	2,00	0,90	1,80	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,58	11,91
25/11/2018	4,70	0,90	4,23	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,48	9,91
26/11/2018	4,50	0,90	4,05	0,00	0,00	10,00	20,00	20,60	0,49	10,05
27/11/2018	4,70	0,90	4,23	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,48	9,91
28/11/2018	2,50	0,90	2,25	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,56	11,54
29/11/2018	3,90	0,90	3,51	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,51	10,50
30/11/2018	4,30	0,90	3,87	8,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,50	10,20
1/12/2018	4,30	0,90	3,87	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,50	10,20
2/12/2018	4,80	0,90	4,32	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,48	9,83
3/12/2018	4,70	0,90	4,23	0,00	4,23	0,00	20,00	20,60	0,48	9,91
4/12/2018	4,70	0,90	4,23	0,00	8,46	0,00	20,00	20,60	0,48	9,91
5/12/2018	4,70	0,90	4,23	0,00	12,69	0,00	20,00	20,60	0,48	9,91
6/12/2018	4,40	0,90	3,96	0,00	16,65	0,00	20,00	20,60	0,49	10,13
7/12/2018	4,40	0,90	3,96	0,00	20,61	0,00	20,00	20,60	0,49	10,13
8/12/2018	4,60	0,90	4,14	0,00	24,75	0,00	20,00	20,60	0,48	9,98
9/12/2018	5,60	0,90	5,04	7,00	22,79	10,00	20,00	20,60	0,45	9,24
10/12/2018	5,40	0,85	4,61	0,00	17,40	0,00	20,00	20,60	0,45	9,33
11/12/2018	2,90	0,81	2,34	5,00	14,74	0,00	20,00	20,60	0,54	11,18
12/12/2018	5,90	0,76	4,49	0,00	19,23	0,00	20,00	20,60	0,43	8,82
13/12/2018	4,20	0,71	3,00	28,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,49	10,09
14/12/2018	3,40	0,67	2,27	121,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,52	10,68
15/12/2018	5,00	0,62	3,11	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,45	9,35
16/12/2018	5,90	0,58	3,40	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,42	8,56
17/12/2018	2,60	0,53	1,38	66,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,55	11,23
18/12/2018	3,60	0,48	1,74	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,50	10,36
19/12/2018	3,00	0,44	1,31	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,53	10,83

20/12/2018	3,40	0,39	1,33	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,51	10,46
21/12/2018	4,60	0,34	1,59	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,45	9,37
22/12/2018	4,70	0,30	1,40	0,00	1,40	0,00	20,00	20,60	0,45	9,23
23/12/2018	5,10	0,25	1,29	10,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,43	8,82
24/12/2018	5,70	0,21	1,17	0,00	1,17	0,00	20,00	20,60	0,40	8,22
25/12/2018	6,30	1,20	7,56	0,00	8,73	0,00	20,00	20,60	0,35	7,16
26/12/2018	6,40	1,15	7,36	0,00	16,09	0,00	20,00	20,60	0,34	6,99
27/12/2018	4,60	1,20	5,52	10,00	11,61	0,00	20,00	20,60	0,43	8,84
28/12/2018	6,10	1,20	7,32	0,00	18,93	0,00	20,00	20,60	0,36	7,36
29/12/2018	4,20	1,20	5,04	22,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,45	9,24
30/12/2018	3,80	1,20	4,56	20,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,47	9,63
31/12/2018	5,60	1,20	6,72	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,38	7,85
1/1/2019	4,80	1,20	5,76	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,42	8,64
2/1/2019	3,10	1,20	3,72	45,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,50	10,33
3/1/2019	4,60	1,20	5,52	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,43	8,84
4/1/2019	5,50	1,20	6,60	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,39	7,95
5/1/2019	6,20	1,20	7,44	0,00	0,00	0,00	20,00	20,60	0,35	7,26
6/1/2019	4,20	1,20	5,04	0,00	5,04	0,00	40,00	21,81	0,45	9,78
7/1/2019	2,20	1,20	2,64	0,00	7,68	0,00	40,00	21,81	0,54	11,87
8/1/2019	5,20	1,20	6,24	0,00	13,92	0,00	40,00	21,81	0,40	8,73
9/1/2019	3,60	1,20	4,32	2,00	16,24	0,00	40,00	21,81	0,48	10,41
10/1/2019	2,50	1,20	3,00	0,00	19,24	0,00	40,00	21,81	0,53	11,56
11/1/2019	4,90	1,20	5,88	0,00	25,12	0,00	40,00	21,81	0,41	9,05
12/1/2019	5,10	1,20	6,12	0,00	31,24	0,00	40,00	21,81	0,41	8,84
13/1/2019	3,00	1,20	3,60	0,00	34,84	0,00	40,00	21,81	0,51	11,03
14/1/2019	3,50	1,20	4,20	0,00	39,04	0,00	40,00	21,81	0,48	10,51
15/1/2019	2,10	1,20	2,52	30,00	0,00	0,00	40,00	21,81	0,55	11,98
16/1/2019	4,80	1,20	5,76	0,00	0,00	0,00	40,00	21,81	0,42	9,15
17/1/2019	3,90	1,20	4,68	0,00	4,68	0,00	40,00	21,81	0,46	10,09
18/1/2019	2,80	1,20	3,36	8,00	0,00	0,00	40,00	21,81	0,52	11,24
19/1/2019	4,70	1,20	5,64	0,00	5,64	0,00	40,00	21,81	0,42	9,25
20/1/2019	4,90	1,20	5,88	0,00	11,52	0,00	40,00	21,81	0,41	9,05
21/1/2019	5,00	1,20	6,00	0,00	17,52	0,00	40,00	21,81	0,41	8,94
22/1/2019	5,90	1,20	7,08	0,00	24,60	0,00	40,00	21,81	0,37	8,00
23/1/2019	4,90	1,20	5,88	0,00	30,48	0,00	40,00	21,81	0,41	9,05
24/1/2019	6,30	1,20	7,56	0,00	38,04	0,00	40,00	21,81	0,35	7,58
25/1/2019	3,40	1,20	4,08	0,00	42,12	0,00	40,00	21,81	0,49	10,62
26/1/2019	4,80	1,20	5,76	0,00	47,88	12,00	40,00	21,81	0,42	9,15
27/1/2019	5,00	1,20	6,00	12,00	29,88	0,00	40,00	21,81	0,41	8,94
28/1/2019	6,40	1,20	7,68	0,00	37,56	12,00	38,33	21,71	0,34	7,44
29/1/2019	5,00	1,20	6,00	44,00	0,00	0,00	36,67	21,61	0,41	8,86

30/1/2019	3,30	1,15	3,80	0,00	3,80	0,00	35,00	21,51	0,50	10,71
31/1/2019	5,20	1,10	5,72	0,00	9,52	0,00	40,00	21,81	0,42	9,18
1/2/2019	4,70	1,05	4,94	0,00	14,45	0,00	40,00	21,81	0,45	9,87
2/2/2019	4,90	1,00	4,90	7,00	12,35	0,00	40,00	21,81	0,45	9,90
3/2/2019	4,40	0,95	4,18	0,00	16,53	0,00	40,00	21,81	0,48	10,53
4/2/2019	4,30	0,90	3,87	0,00	20,40	0,00	40,00	21,81	0,50	10,80
5/2/2019	4,60	0,85	3,91	0,00	24,31	0,00	40,00	21,81	0,49	10,76
6/2/2019	5,10	0,80	4,08	0,00	28,39	0,00	40,00	21,81	0,49	10,62
7/2/2019	5,40	0,75	4,05	0,00	32,44	0,00	40,00	21,81	0,49	10,64
8/2/2019	5,10	0,70	3,57	0,00	36,01	0,00	40,00	21,81	0,51	11,06
9/2/2019	4,20	0,65	2,73	0,00	38,74	0,00	40,00	21,81	0,54	11,79
10/2/2019	5,40	0,60	3,24	0,00	41,98	0,00	40,00	21,81	0,52	11,35
11/2/2019	3,50	0,58	2,04	33,00	11,02	0,00	40,00	21,81	0,57	12,39
12/2/2019	4,40	0,57	2,49	0,00	13,52	0,00	40,00	21,81	0,55	12,00
13/2/2019	4,20	0,55	2,31	5,00	10,83	0,00	40,00	21,81	0,56	12,16
14/2/2019	2,10	0,53	1,12	0,00	11,95	0,00	40,00	21,81	0,61	13,20
15/2/2019	4,10	0,52	2,12	0,00	14,06	0,00	40,00	21,81	0,57	12,33
16/2/2019	4,50	0,50	2,25	0,00	16,31	0,00	40,00	21,81	0,56	12,21
17/2/2019	4,80	0,48	2,32	0,00	18,63	0,00	40,00	21,81	0,56	12,15
18/2/2019	4,80	0,47	2,24	0,00	20,87	0,00	40,00	21,81	0,56	12,22
19/2/2019	5,10	0,45	2,30	0,00	23,17	0,00	40,00	21,81	0,56	12,17
20/2/2019	5,60	0,43	2,43	20,00	5,59	0,00	40,00	21,81	0,55	12,06
21/2/2019	5,60	0,42	2,33	15,00	0,00	0,00	40,00	21,81	0,56	12,14
22/2/2019	4,10	0,40	1,64	2,00	0,00	0,00	40,00	21,81	0,58	12,74
23/2/2019	2,10	0,38	0,80	0,00	0,80	0,00	40,00	21,81	0,62	13,47
24/2/2019	3,00	0,37	1,10	0,00	1,91	0,00	40,00	21,81	0,61	13,21
25/2/2019	3,50	0,35	1,23	0,00	3,13	0,00	40,00	21,81	0,60	13,11
26/2/2019	4,40	0,33	1,45	0,00	4,58	0,00	40,00	21,81	0,59	12,91
27/2/2019	4,20	0,31	1,29	0,00	5,87	0,00	40,00	21,81	0,60	13,05
28/2/2019	3,70	0,29	1,06	0,00	6,93	0,00	40,00	21,81	0,61	13,25

Cuadro 1. Balance hídrico, Déf ac.: Déficit acumulado; Prof. Rad.: Profundidad radicular; A D Prof. Rad.: Agua Disponible en profundidad radicular; AFD: Agua fácilmente disponible.

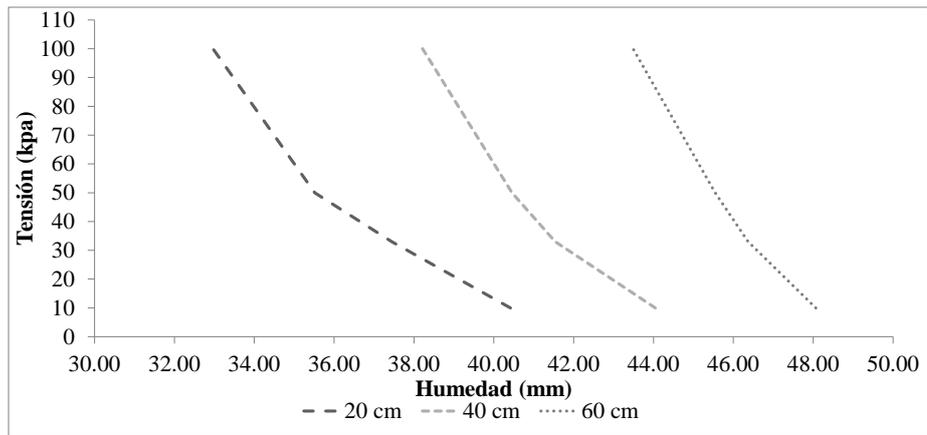


Figura1. Curva de tensión-humedad a 20, 40 y 60 cm de profundidad.

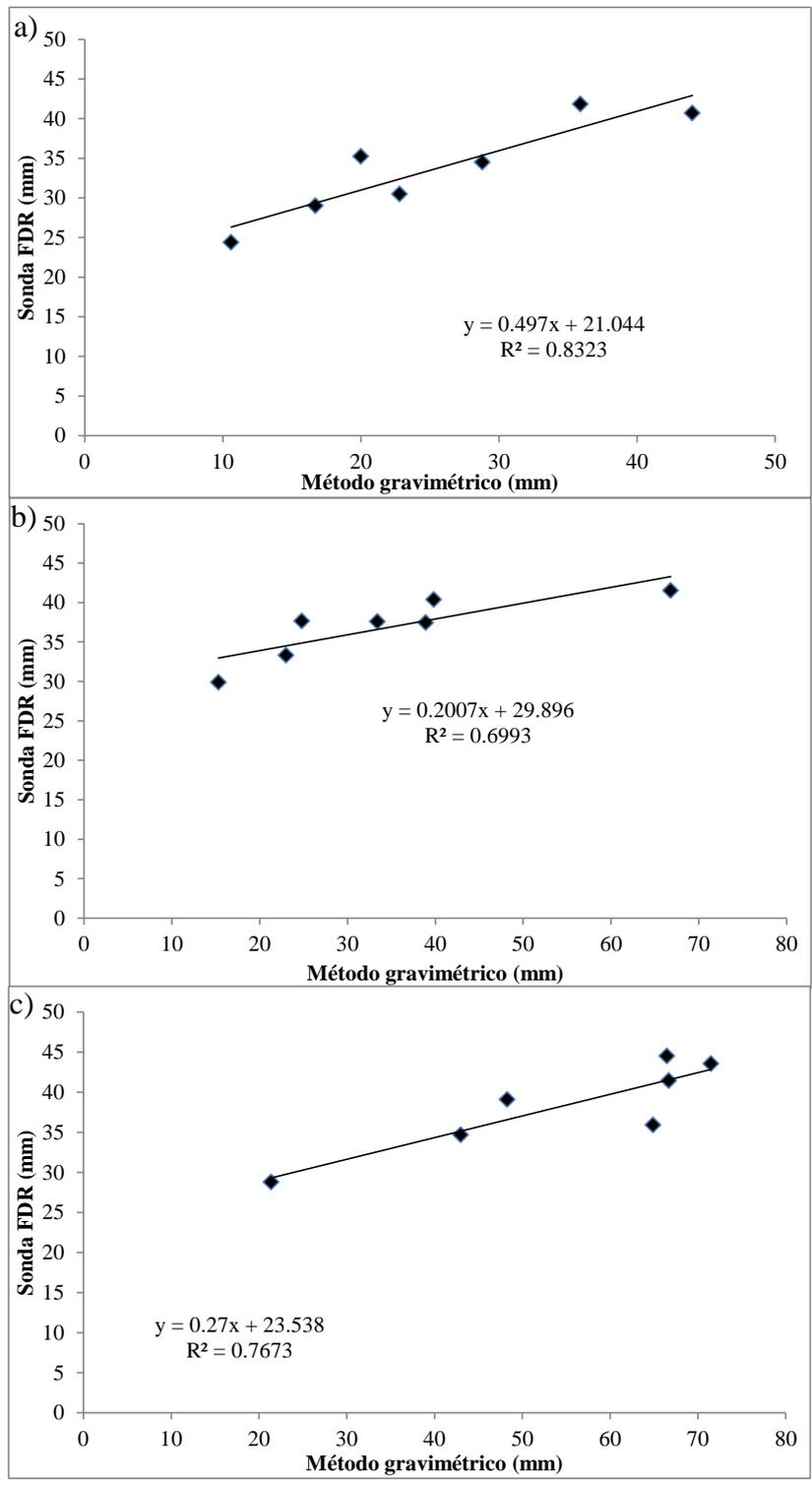


Figura2. Calibración de sonda FDR: a, b y c corresponden a 20, 40 y 60 cm respectivamente.

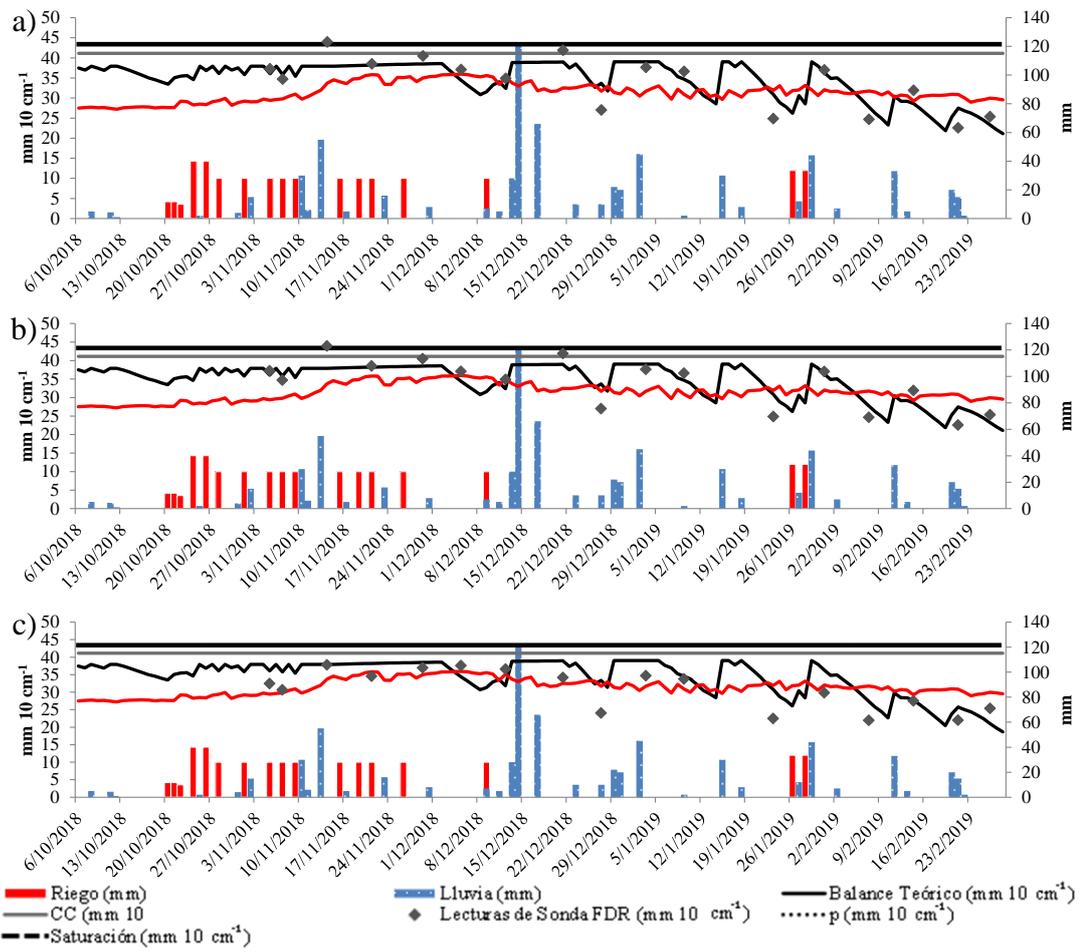


Figura 3. Figuras a, b y c: balance hídrico de C0, F1 y F2 respectivamente.