

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESTUDIO DEL FRACCIONAMIENTO DE LA FERTILIZACIÓN
NITROGENADA EN MAÍZ

por

Federico Daniel CANZANI VALENZUELA

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

PAYSANDÚ
URUGUAY
2022

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. (Dr.) Luis Giménez

Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli

Ing. Agr. Federico Rovegno

Fecha: 22 de abril de 2022

Autor: -----

Federico Daniel Canzani Valenzuela

AGRADECIMIENTOS

A Luis Giménez por guiarme y darme el sostén académico para poder realizar este trabajo.

A Federico Rovegno por el apoyo y por su buena predisposición a lo largo de este trabajo.

A todo el personal de biblioteca por su buena atención a la hora de consultas, pedidos de materiales y corrección del trabajo.

A mis amigos y compañeros de Facultad por haberme acompañado a lo largo de esta hermosa etapa de mi vida.

A mis Padres por ser dos pilares que siempre me acompañan y me dan todo su apoyo, confianza y afecto incondicional.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. <u>CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE</u>	3
2.1.1. <u>Ecofisiología del cultivo</u>	3
2.1.2. <u>Rendimiento</u>	6
2.1.2.1. <u>Fisiología del rendimiento</u>	6
2.1.2.2. <u>Componentes del rendimiento</u>	7
2.2. <u>IMPORTANCIA DEL AGUA EN MAÍZ</u>	8
2.3. <u>NITRÓGENO EN MAÍZ</u>	12
2.3.1. <u>Absorción de N</u>	13
2.3.2. <u>Efecto del N sobre el rendimiento</u>	15
2.3.3. <u>Respuesta al agregado de N en función de las condiciones hídricas del ambiente</u>	19
2.3.4. <u>Fertilizantes nitrogenados</u>	22
2.3.5. <u>Métodos de aplicación de los fertilizantes</u>	25
2.3.5.1. <u>Fertirriego</u>	26
2.3.6. <u>Manejo del N en maíz</u>	29
2.3.7. <u>Fraccionamiento de la dosis de N</u>	31
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	39
	IV

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO.....	39
3.2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	39
3.3. DETERMINACIONES EFECTUADAS.....	43
3.4. DETERMINACIONES ESTADÍSTICAS.....	44
3.4.1. <u>Hipótesis biológicas</u>	44
3.4.2. <u>Diseño experimental</u>	44
3.4.3. <u>Análisis estadístico</u>	45
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	46
4.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	46
4.1.1. <u>Precipitaciones</u>	46
4.1.2. <u>Radiación solar</u>	48
4.1.3. <u>Temperatura</u>	50
4.1.4. <u>Evapotranspiración del cultivo</u>	52
4.1.5. <u>Evolución del agua disponible en el suelo</u>	53
4.2. EVOLUCIÓN DE LA MATERIA SECA.....	57
4.3. RENDIMIENTO Y PRINCIPALES COMPONENTES DEL RENDIMIENTO.....	59
4.3.1. <u>Subcomponentes numéricos del rendimiento</u>	66
4.3.2. <u>Relación entre el rendimiento y componentes principales</u>	69
5. <u>CONCLUSIONES</u>	72
6. <u>RESUMEN</u>	74
7. <u>SUMMARY</u>	76
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	78

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No. Página

1. Características físicas e hidrológicas del suelo.39
2. Esquema de los tratamientos evaluados.41
3. Rendimiento (kg ha^{-1}), NG (número de granos por metro cuadrado) y PG (peso de mil granos), para los diferentes niveles de fraccionamiento de la dosis de N y para dos condiciones hídricas.60
4. Sub-componentes del rendimiento: número de espigas por planta (NEP), número de hileras por espiga (NH ESP.), número de granos por hilera (NGH) y número de granos por espiga (NG ESP.), para los distintos tratamientos.67

Figura No.

1. Esquema del experimento.42
2. Precipitaciones (mm) ocurridas en la EEMAC

(Paysandú) en el verano 2019-2020 y valores promedio para la serie histórica 2002 a 2020.	47
3. Radiación solar ($Mj\ m^{-2}\ d^{-1}$) diaria promedio incidente ocurridas en la EEMAC (Paysandú) en el verano 2019-2020 y las medias mensuales para la serie histórica 2002 a 2020.	49
4. Temperaturas ($^{\circ}C$) promedios mensuales y decádicas durante la zafra 2019-2020 ocurridas en la EEMAC (Paysandú) y valores promedio mensuales de la serie histórica 2002-2020.	51
5. Evapotranspiración (ET) acumulada (mm) durante el ciclo del cultivo para los tratamientos bajo condiciones de riego y seco.	52
6. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) para los tratamientos bajo condiciones de riego.	54
7. Evolución del porcentaje de AD para los tratamientos bajo condiciones de seco.	56
8. Evolución de la materia seca (MS, $kg\ ha^{-1}$) para cada nivel de fraccionamiento de la dosis de N en	

riego y seco evaluada al inicio del período crítico (PC), final del PC y a cosecha.	58
9. Relación entre el rendimiento (kg ha^{-1}) y el número de granos por unidad de superficie (NG m^{-2}), para los tres niveles de fraccionamiento bajo riego y seco.	69
10. Relación entre el rendimiento (kg ha^{-1}) y el peso de mil granos (g), para los tres niveles de fraccionamiento bajo riego y seco.	70

1. INTRODUCCIÓN

El maíz es una de las especies cultivadas más antigua a nivel mundial, la cual se encuentra presente en una diversidad de ambientes mucho mayor que la de cualquier otro cultivo. Es de gran importancia económica ya sea como alimento humano, como alimento para el ganado o como materia prima de un gran número de productos industriales (Paliwal et al., 2001). En el presente es el primer cultivo del mundo en producción y es el cereal de mayor rendimiento en grano (FAO, 2019).

A nivel nacional, el maíz es el tercer cultivo de verano en términos de área sembrada, además es el segundo cultivo en rendimiento después del arroz, el cual se realiza sólo en condiciones de riego. En condiciones de secano el rendimiento promedio de maíz es de 6.121 kg ha⁻¹ (MGAP. DIEA, 2020), mientras que en riego es posible alcanzar rendimientos entre 13.500 a 15.300 kg ha⁻¹ (Giménez, 2012a).

La disponibilidad hídrica es la mayor responsable de la variabilidad productiva y principal limitante para lograr elevados rendimientos en maíz de secano. Por tal motivo, la implementación de una tecnología como el riego suplementario permitiría captar un alto porcentaje del rendimiento potencial del maíz (Giménez, 2012a). La implementación de riego en maíz conlleva a un ajuste en el manejo, principalmente en la fertilización nitrogenada. El N es el factor que en condiciones de disponibilidad hídrica no limitante con mayor frecuencia limita el crecimiento y rendimiento del maíz (Barraco et al., 2011).

Actualmente, el manejo del N en maíz en el país, se basa fundamentalmente en la aplicación de fertilizantes en dos momentos, a la siembra y en V6 (Quincke et al., 2008). La desventaja que presenta este manejo del N es la exposición a pérdidas de este nutriente por lixiviación, desnitrificación, volatilización y escorrentía debido a que la capacidad de absorción de N por maíz en el periodo siembra a V6 es baja. Por lo tanto, el N queda en el suelo expuesto a pérdidas causando posiblemente contaminación del ambiente y sin posibilidad de corrección en otro momento, es probable que el cultivo presente deficiencias, no pueda cubrir los requerimientos de N y por tanto, no alcanzar los rendimientos esperados.

En conjunto con el riego se puede implementar el fertirriego, una tecnología que consiste en la aplicación de fertilizantes vía riego (Bar-Yosef, 1991). El fertirriego permite fraccionar las dosis de fertilizantes con el objetivo de acompañar los requerimientos del cultivo a lo largo de su ciclo.

En base a esta situación, se plantea el estudio del fraccionamiento de la dosis de N durante el ciclo de desarrollo del maíz. El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta productiva del maíz a diferentes fraccionamientos de la dosis de N en condiciones de riego y seco.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE

El maíz (*Zea mays*) pertenece a la familia Poáceas (Gramíneas) a la tribu Maydeae y al género *Zea*, siendo la única especie de este género en ser cultivada (Paliwal et al., 2001).

El maíz es una especie monoica diclina, es decir que las inflorescencias masculinas y femeninas se desarrollan separadamente en la misma planta (Fassio et al., 1998). Esta especie presenta la espiga (órgano femenino y de principal interés comercial), en posición axial sujeta a dominancia apical por la panoja masculina, principalmente en el periodo de floración momento en el cual se determina el número de granos por superficie (Giménez, 2001).

2.1.1. Ecofisiología del cultivo

El maíz se produce en una gran diversidad de ambientes, mucho mayor que otros cultivos, ambientes que hoy en día se extienden desde los 58° de latitud norte en Canadá y en Rusia hasta los 40° de latitud sur en Argentina y Chile (Paliwal et al., 2001). La mayor producción de este cultivo ocurre donde las isotermas de los meses más calurosos se encuentran en los rangos de 21 a 27 °C y la estación libre de heladas es de 120 a 180 días (Shaw, citado por Fassio et al., 1998).

El desarrollo del cultivo consiste en una secuencia obligatoria de etapas o fases dadas en un orden riguroso e irreversible, que corresponden con la iniciación de órganos nuevos, siendo un fenómeno puramente cualitativo. Se le llama ciclo de desarrollo al conjunto de fases que van desde la germinación de la semilla hasta la floración y formación del fruto (Fassio et al., 1998).

La forma de describir el desarrollo del maíz es a través de una escala fenológica, la más utilizada es la de Ritchie y Hanway (1982). En la que se distinguen dos grandes períodos, el vegetativo y el reproductivo. El primero se subdivide en estadios identificados con la letra V y un subíndice, E que corresponde con la emergencia, un subíndice numérico que señala el número de orden de la última hoja totalmente expandida (lígula visible) y la letra T que indica el panojamiento (aparición de la panoja). El reproductivo que se subdivide en estadios identificados con la letra R y un subíndice, comienza con la emergencia de los estigmas (R1) y finaliza con la madurez fisiológica (R6), transcurriendo por el cuajado y las diferentes etapas de llenado de grano.

Las etapas fenológicas anteriormente mencionadas son válidas para todos los cultivos de maíz, sin embargo, pueden presentar variaciones fenológicas y estructurales, como lo pueden ser la duración de cada etapa o el número de hojas, debido a la diferencia entre genotipos y la respuesta que presenta el cultivo a diferentes factores ambientales como la temperatura y el fotoperiodo (Cárcova et al., 2003).

La temperatura actúa durante todo el ciclo fenológico del maíz, influyendo sobre el tiempo real que transcurre hasta que el cultivo alcanza un

estadio de desarrollo, en general a medida que aumenta la temperatura los estadios se cumplen más rápidamente. La tasa de desarrollo presenta un comportamiento lineal entre una temperatura base, a la cual la tasa de desarrollo es nula, y una temperatura óptima, a la cual se alcanza la máxima tasa de desarrollo (Cárcova et al., 2003). Por encima de la temperatura óptima hay una reducción en la tasa de desarrollo hasta que se vuelve nula al llegar a una temperatura máxima. En maíz la temperatura base se encuentra alrededor de los 8°C, con una temperatura óptima de 34°C y una temperatura máxima de 44°C (Kiniry, citado por Fassio et al., 1998).

Este factor no solamente afecta el desarrollo, sino que también el crecimiento del cultivo, actuando sobre las tasas de respiración y de fotosíntesis. El crecimiento óptimo del cultivo ocurre a temperaturas entre 24 y 30°C, temperaturas a las cuales alcanza las máximas tasas fotosintéticas. Las temperaturas nocturnas elevadas no favorecen el crecimiento, sino que incrementan las tasas de respiración y de esta forma se reduce el peso seco acumulado durante el día por la fotosíntesis. Además, las temperaturas nocturnas elevadas aceleran el desarrollo del cultivo, acortando su ciclo reduciendo los días de aprovechamiento de la radiación (Fassio et al., 1998).

El fotoperiodo actúa reduciendo la duración de las etapas del cultivo en términos de tiempo térmico. El maíz responde al fotoperiodo como una especie cuantitativa de día corto, es decir a medida que las horas de luz disminuyen su ciclo se hace cada vez más corto. Esto sucede hasta alcanzar un fotoperiodo umbral, que varía entre genotipos, pero en general se ubica entre 12 a 13

horas. A diferencia de la temperatura, el fotoperiodo a partir del cambio de ápice no ejerce ningún efecto sobre el desarrollo (Cárcova et al., 2003).

2.1.2. Rendimiento

2.1.2.1. Fisiología del rendimiento

En maíz, al igual que la gran parte de los cultivos, el rendimiento depende de la biomasa producida y del índice de cosecha (IC), la forma en que el cultivo particiona la biomasa acumulada durante su crecimiento entre los órganos de cosecha y el resto de la planta. La biomasa acumulada en el cultivo depende de la cantidad de radiación solar disponible, de la capacidad del canopeo para interceptarla o sea la eficiencia de intercepción y de la eficiencia con que el cultivo convierte la radiación capturada en biomasa vegetal, es decir la eficiencia de uso de la radiación (Eyhéabide, 2015).

El maíz tiene una alta eficiencia de uso de la radiación (EUR) por poseer un metabolismo de fijación de carbono por la vía C4, lo que le permite una tasa fotosintética entre 30 a 40% mayor que las especies C3 (Andrade et al., 2000a, Cárcova et al., 2003, Hesketh, citado por Eyhéabide, 2015). Además, presenta ventajas comparativas en la eficiencia de intercepción de la radiación, una vez alcanzados índice de área foliar crítico, debido a que su canopeo está integrado por hojas con hábito erectófilo y buena separación vertical lo que le brinda un bajo coeficiente de extinción lumínica permitiendo

una penetración y distribución más uniforme de la luz en el perfil del canopeo (Andrade et al., 2000a, Maddonni, citado por Eyhérbide 2015).

Este cultivo presenta un IC aproximado a 0,45, es decir el 45% de la biomasa total corresponde a biomasa en granos, mucho mayor que el de otros cultivos, debido a la calidad energética de su grano el cual presenta un alto porcentaje de carbohidratos (84%), generando un menor costo energético por unidad de producción de granos (Andrade et al., 2000a).

2.1.2.2. Componentes del rendimiento

El rendimiento en maíz puede estudiarse a través de sus componentes numéricos principales, es decir el número de granos (NG) por unidad de superficie y el peso de granos (PG). En este cultivo, el rendimiento está más asociado al NG que al PG. La principal determinante del NG es la supervivencia de estructuras florales fecundadas. Por lo tanto, cobran crucial importancia los factores y mecanismos involucrados en el aborto de esas estructuras (Cirilo y Andrade, 1994, Andrade et al., 1996, Cárcova et al., 2003).

Se ha determinado que el NG queda establecido aproximadamente entre las dos semanas pre y post floración, motivo por el cual esta etapa queda establecido como el periodo crítico de determinación del rendimiento. Las ocurrencias de déficit o estrés durante este periodo, que coincide con el crecimiento activo de la espiga, emergencia de estigmas y el inicio de llenado de granos, genera grandes mermas en el NG (Cárcova et al., 2003). Durante el

periodo antes mencionado, la tasa de crecimiento por planta (TCP) es indicador de la condición fisiológica de la misma y por lo tanto de su capacidad para fijar granos. Se ha observado que es necesario valores mínimos de TCP equivalentes a $1 \text{ gr.pl}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ para que ocurra la fijación de grano (Andrade et al., 1999).

2.2. IMPORTANCIA DEL AGUA EN MAÍZ

El agua, en conjunto con los nutrientes, es un factor limitante del rendimiento, un suministro limitado de la misma provoca una disminución en la TCP impidiendo que alcancen su potencial (van Ittersum y Rabbinge, 1997). Esa reducción de la TCP se debe a reducciones en la disponibilidad de CO_2 para la fotosíntesis y una limitación de los procesos de elongación celular (Fassio et al., 1998).

La reducción en el rendimiento, a causa del estrés hídrico depende de la intensidad, la duración y el momento del estrés (Hall et al., 1982). Por lo tanto, las disminuciones en rendimiento que provoca una deficiencia hídrica no es la misma en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo. De acuerdo con Giménez (2012b), para dos años de estudio con rendimientos potenciales entre 13.200 y $15.300 \text{ kg ha}^{-1}$, las pérdidas de rendimiento del cultivo bajo estrés hídrico durante el periodo crítico fueron de 47 y 50% del rendimiento potencial, siendo las pérdidas más altas, debido que durante esta etapa se fija el NG, que es el componente principal del rendimiento. Se ha encontrado disminuciones en rendimiento de $17,7 \text{ kg ha}^{-1}$ por cada mm de reducción en la evapotranspiración

(ET) del cultivo (Otegui et al., 1995). Para la etapa de llenado de granos la ocurrencia de un déficit hídrico significa una reducción entre 29 y 31% del rendimiento potencial según Giménez (2012b), mientras que NeSimith y Ritchie (1992) han encontrado reducciones entre un 21 y 40%. La magnitud de las pérdidas en esta etapa depende de qué tan temprano ocurra este déficit, si ocurre al inicio provoca mayores pérdidas debido a que el embrión recién formado es susceptible de aborto en situaciones de estrés, afectando el NG, que si ocurren más avanzada la etapa de llenado de granos donde es principalmente afectado el PG (Giménez, 2012b, NeSimith y Ritchie, 1992). La reducción en el PG se debe principalmente a un período de llenado de granos lineal más corto, más que por una tasa de llenado lineal de granos menor (NeSimith y Ritchie, 1992). En la etapa vegetativa el estrés hídrico provoca una menor altura de planta, un menor desarrollo del área foliar y una pérdida de 28 a 32% del peso final en materia seca (MS). Sin embargo el efecto sobre el rendimiento es bajo, debido a que no se afectan directamente los componentes del rendimiento (Cakir, 2004). Pero cuando las deficiencias se producen durante la etapa vegetativa y continúan durante el periodo crítico, el rendimiento del maíz disminuyó un 56%, porque se ve afectado tanto el crecimiento vegetativo como el NG (Giménez, 2012b).

En Uruguay la principal limitante para la producción de cultivos estivales es la disponibilidad hídrica, la cual está determinada por tres factores (Giménez, 2012a). El primero es la baja capacidad de almacenaje de agua disponible en los suelos, los suelos agrícolas presentan una capacidad de almacenaje de agua disponible que varía entre 80 y 160 mm (Molfino y Califra, 2001), esto permite satisfacer como máximo un 20 a 30% del consumo de agua del cultivo

generando una dependencia de las precipitaciones (PP) (Giménez, 2012a). El segundo es la alta demanda atmosférica en verano (Sawchik et al., 2010). Por último, el tercero es la gran variabilidad de las PP tanto en intensidad como en volumen que generalmente no cubren las demandas de los cultivos (Giménez, 2012a). Esto provoca que en verano las PP y el agua almacenada en el suelo, no sean suficientes para atender las necesidades de agua o ET potencial de los cultivos (Corsi, 1982).

Los requerimientos de agua por parte del cultivo se pueden expresar a través de la evapotranspiración bajo condiciones estándar (ETc). La cual se define como ET del cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes (Allen et al., 2006). En base a investigaciones realizadas por Giménez y García Petillo (2011), para zonas contrastantes del Uruguay (Salto y Colonia) se han encontrado valores de ETc para el maíz correspondientes a 536 mm y 672 mm, mientras Giménez (2012a) obtuvo valores de consumos totales de agua en maíz para tres años consecutivos (2009, 2010 y 2011) de 460 a 600 mm.

El área de maíz a nivel nacional se realiza un 90% en condiciones de secano y un 10% bajo riego, por lo tanto, la disponibilidad de agua de ese 90% dependerá de la ocurrencia de PP y la capacidad de almacenaje de agua de los suelos (MGAP.DIEA, 2020). En estas condiciones la ET puede desviarse de la ETc debido a condiciones no óptimas como puede ser la limitación de agua, la presencia de plagas, enfermedades o la baja fertilidad del suelo, en este caso

se hace referencia a la evapotranspiración real del cultivo (ETr) (Allen et al., 2006). Para los cultivos de verano, realizados en secano en el país la principal limitante y la causa de no alcanzar la ETc es la disponibilidad de agua (Giménez, 2012a).

Giménez y García Petillo (2011) estimaron en el país la ETc y la ETr para dos localidades contrastantes (Salto y Colonia) en un periodo de 23 años para diferentes cultivos. Los resultados obtenidos para maíz fueron que la ETr siempre fue menor que la ETc, pero esa diferencia presentó una alta variabilidad entre años debido principalmente a la variabilidad que presenta la ETr. Se destacaron las menores diferencias en los años “Niño”, en los que presentaron PP muy superiores al promedio, encontrando los mayores valores de ETr. En cambio, en los años “Niña” se encontraron las mayores diferencias, presentando los valores de ETr menores. Este comportamiento, se explica por la gran variabilidad interanual de los valores mensuales de las PP. Castaño et al. (2011) analizaron una serie histórica de años, donde en base a la distribución en terciles, se constató que en los diez años menos lluviosos (inferiores a P33) las PP mensuales fueron mayormente inferiores a 60-80 mm, mientras que los diez años más lluviosos (mayores a P66) fueron en general mayores a 120-160 mm. Además, hay que señalar que no toda el agua de las PP es retenida por el suelo, sino que parte de la misma se pierde por escurrimiento superficial y por drenaje profundo, donde se ha registrado para una serie de años (1985-2009) una alta variabilidad de agua no retenida por los suelos, con los menores excesos de agua (inferiores a P33) fue inferior a 40-60 mm, mientras que en los mayores excesos (mayores a P66) estos fueron en general mayores a 80-100 mm (Castaño et al., 2011).

Para entender los efectos del impacto de esta limitante sobre la producción de maíz Giménez (2019) empleó el concepto de brecha tecnológica relativa (BRT) que es el cociente entre el rendimiento máximo logrado por la investigación, obtenidos con riego suplementario, y los rendimientos medios obtenidos por los productores comerciales. Para el cálculo de la BRT se utilizaron rendimientos experimentales de riego en maíz realizados en la EEMAC entre 2009 y 2017 y el rendimiento promedio nacional de los productores comerciales para la misma serie de años. Los rendimientos experimentales estuvieron en el rango $11.500 \text{ kg ha}^{-1}$ y $15.500 \text{ kg ha}^{-1}$, mientras los rendimientos de los productores estuvieron entre 3.500 kg ha^{-1} y 7.100 kg ha^{-1} obteniendo una diferencia promedio de 8.500 kg ha^{-1} . No solamente, se obtuvieron rendimientos muy superiores en los experimentos de riego, sino que además la variabilidad interanual fue mucho menor, representada por el coeficiente de variación. A nivel experimental presentó se un coeficiente de variación de 8%, mientras que la producción comercial mostró un coeficiente de variación de 21%. Por último, el valor de BRT obtenido fue muy superior a 2, proponiendo que la implementación de riego suplementario en conjunto a prácticas de manejos acordes al mismo, permite por lo menos duplicar el rendimiento de maíz.

2.3. NITRÓGENO EN MAÍZ

El nitrógeno (N) es el nutriente mineral, en condiciones de adecuada disponibilidad hídrica, que con más frecuencia limita el crecimiento y

rendimiento del maíz (Barraco et al., 2011). Esto se debe a los grandes requerimientos de este nutriente (el cual representa el 1,5 a 3% del peso seco de la planta) y porque la gran mayoría de los suelos no tienen la suficiente capacidad de aporte de este nutriente para satisfacer las necesidades del cultivo (Below, 2004). Siendo para el maíz de vital importancia debido a su incidencia sobre el establecimiento y mantenimiento de la capacidad fotosintética, además de la formación y desarrollo de los órganos reproductivos (Below, 1995).

2.3.1. Absorción de N

Según Perdomo et al. (2008) podemos encontrar en el suelo un 98% del N ligado a compuestos orgánicos, no disponibles para las plantas, y un 2% en forma inorgánica como amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) los cuales son la fuente de N para los cultivos. El N ligado a la materia orgánica puede transformarse en N inorgánico a través del proceso de mineralización, pero por año solamente entre un 2 a 3% del N se vuelve disponible lo cual no es suficiente para satisfacer las necesidades de un cultivo (Below, 2004).

El maíz posee la capacidad de absorber N tanto como NO_3^- o como NH_4^+ , normalmente la mayor parte del N lo absorbe como NO_3^- (Perdomo et al., 2008). Estas dos formas minerales de N presentan diferencias en su absorción, almacenaje y asimilación. El NO_3^- es absorbido mediante un proceso activo que involucra un gasto de energía, puede ser almacenado como tal en los tejidos radiculares y debe ser reducido para poder ser utilizado por las plantas. En

cambio, el NH_4^+ es absorbido mediante un proceso pasivo (no involucra gasto de energía) o activo, a diferencia del NO_3^- no puede ser almacenado y debe ser incorporado inmediatamente a un esqueleto carbonado, debido a que altos niveles de esta forma mineral son tóxicos para las plantas, y no requiere ser reducido para poder ser utilizado (Perdomo et al., 2008).

Ciampitti et al. (2010) observó que el N presenta un patrón de acumulación muy similar al de la MS, donde la absorción de N por parte del maíz varía en las diferentes etapas de su desarrollo (Oyarzun, 2010). Perdomo et al. (2008), describen que la acumulación de N en la planta en función del tiempo sigue una curva sigmoide, donde en las primeras etapas es escasa debido a que la planta recién se está desarrollando, luego ocurren una etapa de máxima absorción que corresponde con el periodo de activo crecimiento, hasta que finalmente la tasa de absorción se reduce.

De acuerdo con Dreccer et al. (2003), hacia el final del periodo de floración, periodo de elevado ritmo de crecimiento, la acumulación de N alcanza el 60% del total absorbido hasta la madurez fisiológica en maíz. Hasta este momento existe una acumulación de N en diferentes órganos, siendo muy baja la removilización de este nutriente dentro de la planta. En maíz durante el periodo pos floración sucede una reducción en la absorción de N, en coincidencia con un aumento de la removilización del N dentro de la planta, los granos en crecimiento a partir de esta etapa constituyen el principal destino del N. En el momento que alcanza la etapa de madurez fisiológica el 70% del N absorbido durante todo el ciclo se encuentra en los granos.

Una característica que presenta este nutriente es su movilidad dentro de la planta (Perdomo et al., 2008). A medida que avanza el ciclo del cultivo y comienza a formarse los granos se produce una translocación del N desde las estructuras vegetativas al grano, donde el 35 a 48% del N en los granos proviene de estructuras vegetativas (Ciampitti et al., 2010). La cantidad de N que es trasladado hacia el grano depende de la disponibilidad del mismo, en situaciones de deficiencias de N la translocación a los granos es mayor, desencadenando un proceso de senescencia anticipada del cultivo debido a que reduce el contenido de N de las hojas, y consecuentemente, su actividad fotosintética reduciendo la acumulación de biomasa (Ciampitti y Vyn, 2011).

2.3.2. Efecto del N sobre el rendimiento

La absorción de N por parte del maíz está directamente relacionada con el rendimiento, es decir a mayor rendimiento el cultivo necesita absorber más N (Muchow, 1988, Ciampitti et al., 2010). Por lo tanto, las características de cada ambiente que determina el rendimiento, desde el punto de vista climático (PP, radiación, temperaturas) como de manejo (densidad, fecha de siembra, elección del cultivar), las cuales determina la capacidad del mismo de capturar los recursos ambientales, van a determinar las necesidades de N por parte del cultivo (Salvagiotti et al., 2011). Sin embargo, se ha estimado que el maíz absorbe 22 kg de N por cada tonelada de grano producida (IPNI, 2016, Dreccer et al., 2003).

El rendimiento del maíz está determinado por dos componentes el NG y el PG, ambos componentes se incrementan con la absorción de macronutrientes limitantes, como el N. La relación de estos dos componentes con el N es de tipo plateau, es decir hay una zona de respuesta lineal, donde a mayor absorción de N hay un aumento del NG y PG, más allá esa zona incrementos en la absorción de N no representan aumentos en ninguno de los componentes del rendimiento. Los componentes del rendimiento se definen de forma secuencial a lo largo del ciclo del maíz, por lo tanto cambios en la disponibilidad de nutrientes tendrán distintos impactos según el momento del ciclo (Dreccer et al., 2003).

La ocurrencia de deficiencias de N durante la etapa vegetativa del maíz produce una reducción en la tasa de expansión foliar provocando una disminución en el índice de área foliar, asociado a una menor disponibilidad de N en las hojas, sería la causal de la reducción en la eficiencia de conversión de la radiación (Andrade et al., 2000b). Esto no solamente provocaría una caída en la tasa de crecimiento durante el periodo vegetativo que significaría una menor producción de biomasa, sino que también afectaría la tasa de crecimiento durante el periodo crítico generando una reducción en el NG (Uhart y Andrade, 1995a). Sumado a esa disminución en el NG, la caída en la tasa de crecimiento también genera una reducción en la capacidad fosa de los granos, a causa de un menor número de células del endospermo y una menor formación de gránulos de almidón (Gambín et al., 2006). No solamente la tasa de crecimiento es la causa de la disminución del NG sino también la acumulación de N está asociada con la definición del NG (Uhart y Andrade, 1995a). Además, en menor medida la deficiencia de N reduce la partición de MS hacia la espiga encontrado

reducciones en la relación de MS de espiga y MS total en la cosecha (Uhart y Andrade, 1995b). Para el caso de los híbridos prolíficos de maíz se ha encontrado que la caída en la tasa de crecimiento a causa del déficit de N disminuye el número de espigas por metro cuadrado, debido a la caída en la tasa de crecimiento de espigas subapicales (Dreccer et al., 2003).

Otro factor que determina el NG y depende de la disponibilidad de nutrientes, como el N, es la sincronización entre la floración masculina y femenina, es decir la liberación del polen en presencia de estigmas receptivos (Cárcova et al., 2003). Anderson et al. (1984) observaron que el aumento de la fertilización con N aumentaba el número de plantas de maíz sincronizadas tanto en aquellas plantas que desarrollan una espiga o dos espigas.

El N no solamente es importante para la determinación del NG sino que también juega un rol muy importante en la determinación del PG. Este componente del rendimiento se genera a partir de una serie de etapas desde la fecundación de los ovarios hasta la madurez fisiológica. La disponibilidad de N incide sobre la fase lag, la cual se caracteriza por la formación de las células del endospermo y la fase de llenado efectivo en la cual se acumula el 80% del peso de grano y sus principales componentes (Cárcova et al., 2003). Pico et al. (2021) encontraron que aumentos en el suministro de N provocan aumentos en el número de células del endosperma que se producen durante la fase lag del llenado de granos, generando un mayor peso potencial de granos. Mientras que durante la fase de llenado efectivo el principal efecto de la disponibilidad de N se da a través de su influencia sobre la producción de fotoasimilados, necesarios para la producción de almidón en los granos (Dreccer et al., 2003).

El maíz muestra una reducción drástica del PG ante una reducción de la disponibilidad de asimilados durante el llenado de granos, pero una virtual falta de capacidad de respuesta en PG a las mejoras en la disponibilidad de asimilados (Borrás et al., 2004). La demanda de N por los granos en activo crecimiento aumenta la removilización de N de las hojas, estableciendo una fuerte deficiencia de este nutriente produciéndose una disminución en la actividad fotosintética y finalmente la senescencia anticipada de las hojas (Rajcan y Tollenaar, 1999a). Por otra parte, según lo reportado por Uhart y Andrade (1995a) deficiencias de N reducen la tasa de expansión de las hojas y la duración del área foliar. En concordancia Bu et al. (2014), agregan que deficiencias de N provocan caídas en el crecimiento de las hojas disminuyendo el índice de área foliar. Una caída en la producción de fotoasimilados durante el llenado de granos a su vez provoca una menor absorción de N. Esto se debe a que durante este periodo el principal destino de los fotoasimilados son los granos reduciendo la proporción de estos a la raíz, provocando una menor absorción de N (Rajcan y Tollenaar, 1999b). Por lo tanto, una deficiencia de N provoca una caída en la producción de fotoasimilados a su vez esto reduce la absorción de N por parte de las raíces. La elevada removilización de asimilados y nutrientes al grano permiten mantener la tasa de llenado, pero la caída en la actividad fotosintética sumada a una senescencia anticipada de las hojas no permiten mantener un flujo umbral de asimilados que permita continuar con la acumulación lineal de MS en los granos, por lo cual el periodo de llenado efectivo se reduce generando una caída en el PG (Cordi et al., 1997). Esto concuerda con Rivelli et al. 2016 quienes reportan que defoliación durante el llenado de granos provocan acortamiento en el periodo de llenados de granos sin afectar la tasa de llenado causando reducción en el PG. En la misma línea

Maddonni et al. (2006) refieren que acortamiento en la duración en el área foliar provocan una caída en la captura de radiación, que se traducen en disminuciones PG. En este sentido, Muchow (1988) encontró que las deficiencias de N afectan la duración de la fase de llenado efectivo, provocando una reducción en días de este periodo, reduciendo no solamente el PG sino que también se reduce el índice de cosecha. Por otro parte, Mayer et al. (2012) observaron que un estrés de N reduce la tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo de llenado de granos lo que provoca un acortamiento de la fase llenado efectivo y una reducción del PG. En un experimento por Fernández y Ciampitti (2018) con el objetivo de evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada tardía sobre el PG en maíz, compararon el rendimiento, NG, PG, tasa de llenado y duración de llenado de granos para un testigo sin agregado de N, en comparación al agregado de N en R1 y dos semanas después de R1, para tres híbridos. La ausencia de fertilización con N mostró reducciones significativas en el rendimiento, a su vez un PG y un NG significativamente menor a los tratamientos fertilizados. En relación al proceso de llenado de granos, la fertilización con N aumentó significativamente la duración del llenado de granos, sin cambios en la tasa de llenado de grano.

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

La producción de granos en maíz está principalmente limitada por el N y la disponibilidad de agua en el suelo (Maddonni et al., 2003). Para conocer la interacción entre estos factores varios trabajos han investigado los cambios en

la eficiencia del uso de N (EUN), eficiencia de uso del agua (EUA) y en el rendimiento con diferentes niveles de dosis de N y de estatus hídrico.

Pedrol et al. (2008) evaluaron la EUA, EUN y rendimiento a diferentes dosis de N bajo riego y en seco. Estos investigadores no detectaron interacción del estatus hídrico por la dosis de N, es decir que los diferentes niveles de N afectaron el rendimiento y sus componentes de manera similar bajo riego y en seco, tampoco detectaron diferencias en la EUA para una misma dosis de N bajo riego y seco, la cual fue, para un rendimiento promedio de las diferentes dosis de N, de 15,5 kg de grano por milímetro. Mientras que dentro de cada estatus hídrico para las diferentes dosis de N se encontró un aumento significativo en la EUA al aumentar la dosis de N, hasta una dosis de 120 kg N ha⁻¹ para seco y 180 kg N ha⁻¹ para riego. En el caso de la EUN se encontraron diferencias según el nivel hídrico para cada dosis de N, donde el promedio de las distintas dosis de N fue de 21,6 y 31,1 kg de grano por cada kg de N para riego y seco, respectivamente.

Rinaldiy Di Paolo (2008) evaluaron la EUA, la EUN y el rendimiento en grano para diferentes niveles de N (0 kg N ha⁻¹, 150 kg N ha⁻¹ y 300 kg N ha⁻¹) y para tres estatus hídricos, seco, suministro del 50 y 100% de la ETc. En este trabajo, se obtuvo que el rendimiento en grano presentó un efecto positivo al riego y a las dosis de N, a su vez la interacción entre N y el estatus hídrico fue significativa. El aumento de la dosis de N, amplificó el efecto del riego y viceversa. Para los tratamientos de seco la disponibilidad de N no mostró influencia en el rendimiento de grano, encontrando rendimientos en el entorno de los 3.900 y 2.600 Kg ha⁻¹ para los años 2000 y 2001, respectivamente. Los

tratamientos con 50% de la ETc alcanzaron rendimientos de 8.000, 9.600 y 10.300 kg ha⁻¹ para 0 kg N ha⁻¹, 150 kg N ha⁻¹ y 300 kg N ha⁻¹, respectivamente. Mientras que los tratamientos que tuvieron un 100% de la ETc alcanzaron rendimientos de 8.000, 12.400 y 14.300 kg ha⁻¹ para 0 kg N ha⁻¹, 150 kg N ha⁻¹ y 300 kg N ha⁻¹, respectivamente. Según los autores no hay diferencias entre los tratamientos con 50 y 100% de la ETc con 0 kg N ha⁻¹ debido a que el factor limitante es el N. Mientras que para la EUA también se encontró una interacción entre la dosis de N y el estatus hídrico, donde los mayores valores se obtuvieron con la dosis de 300 kg N ha⁻¹ y no hubo diferencias entre los niveles de 50 y 100 de la ETc. Por último, la EUN aumentó linealmente con la disponibilidad de agua del suelo y disminuye con la aplicación de N, no se encontraron diferencias significativas entre los niveles hídricos de 50 y 100% de la ETc, pero el tratamiento de secano redujo significativamente la EUN en todos los niveles de N. Según los autores, este resultado confirma cómo el riego deficitario reduce la capacidad del cultivo en su absorción y uso eficiente del N del suelo.

Ceriani e Innela (2012), en un trabajo realizado a nivel nacional, encontraron que los tratamientos con riego presentaron una superior EUN en todos los niveles de N, donde la mayor eficiencia se alcanzó con 150 kg N ha⁻¹, siendo esta de 25,3 Kg de grano por Kg de N, mientras que en secano esta se alcanzó con 100 kg N ha⁻¹ de N representando 16,4 Kg de grano por Kg de N.

2.3.4. Fertilizantes nitrogenados

Una vez que se ha tomado la decisión sobre la cantidad de fertilizante N a aplicar uno de los aspectos a tener en cuenta es el tipo de fertilizante a usar (Casanova y Barbazán, 2008). El fertilizante nitrogenado más utilizado a nivel nacional es la urea, se importaron 322.622 tt.año⁻¹ en el año 2019, aunque otras fuentes como el nitrato de amonio y UAN (urea-nitrato de amonio) cada vez comienza a tomar más importancia (MGAP.DIEA, 2020).

La urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) es un fertilizante de origen sintético, el cual contiene un 46% de N, cuando es incorporado al suelo debe pasar por una serie de etapas para ser absorbido por los cultivos. Las cuales van desde la hidrólisis, catalizada por la enzima ureasa, formando carbonato de amonio, luego NH_4^+ , nitrito y por último NO_3^- el cual es absorbido por el cultivo (Perdomo et al., 2008). Una de las desventajas que presenta este fertilizante son las pérdidas N por volatilización, en forma de gas amoniacal (NH_3). Las pérdidas de N son el resultado de numerosos procesos químicos, físicos y biológicos, cuya magnitud es afectada por factores del ambiente (temperatura y velocidad del viento) y del suelo (capacidad de intercambio catiónico, humedad, pH). Las pérdidas de N en forma de NH_3 suceden principalmente en verano asociadas a la alta ET, por lo tanto, cuando el suelo este húmedo y hay una alta demanda atmosférica las pérdidas potenciales de N pueden llegar a 66% del N aplicado (Hoffman et al., 1996). Esto coincide con lo reportado por Rimski-Korsakov et al. (2008) quienes reportan que en maíz el principal destino del N proveniente del fertilizante después de la planta fue la volatilización, perdiéndose por este proceso entre un 24 y 11% del N aplicado.

El nitrato de amonio (NH_4NO_3), en comparación con la urea presenta un menor porcentaje de N (34%), pero se diferencia por contener tanto N en forma de NO_3^- y de NH_4^+ en partes iguales (Fernández et al., 2009). El agregado por parte del nitrato de amonio de N en forma de NO_3^- permite un rápido aporte de N al cultivo independientemente de las condiciones de humedad. Esta es la principal diferencia con la urea en la cual la velocidad de aporte de N depende de las condiciones de humedad del suelo, donde en situaciones de suelo seco no permite corregir las deficiencias del cultivo (Hoffman y Mazzilli, 2008). Sin embargo, esta forma de N también puede sufrir pérdidas a través de los procesos de lixiviación y de desnitrificación. El proceso de lixiviación ocurre debido a que NO_3^- posee una carga negativa que provoca que no sea retenido por los coloides del suelo, por lo tanto, en situaciones de suelo saturado donde el agua se mueve a través de los macroporos puede llevar consigo al NO_3^- a horizontes más profundos. En este proceso las pérdidas de N dependen de la distribución y de la intensidad de las PP. Según Rimski-Korsakov et al. (2008) y Aparicio et al. (2008) las pérdidas del N proveniente de la fertilización no son muy importantes a través de este proceso, sino que los nitratos lixiviados provienen principalmente de las fertilizaciones previas y la mineralización de fracciones orgánicas del suelo.

El fertilizante UAN es una solución de urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) y nitrato de amonio (NH_4NO_3) que posee entre 28 y 32% de N, siendo el fertilizante líquido nitrogenado más utilizado (Fernández et al., 2009). La utilización de fertilizantes líquidos como el UAN presenta algunas ventajas frente a los fertilizantes sólidos como una dosificación muy precisa, una mayor uniformidad de la aplicación, la

posibilidad de aplicación con otros agroquímicos y su aplicación a través del agua del riego (Peterson y Frye, 1989).

Varios investigadores han estudiado la respuesta del maíz al uso de diferentes fertilizantes nitrogenados.

Bonelli et al. (2018) en un experimento realizado en Balcarce, que consistió en la aplicación de 80 kg N ha^{-1} con diferentes fertilizantes en tres momentos (siembra, V6, V10) del ciclo de maíz. No encontraron diferencias en rendimiento, en la acumulación de N, ni en la eficiencia de recuperación del fertilizante (ERN) en maíz bajo SD, al utilizar diferentes fertilizantes como la urea, UAN, nitrato de amonio calcáreo (CAN), ni tampoco cuando se utilizó UAN más tiosulfato de amonio (UAN+T), molécula que hace que el UAN sea menos susceptible a pérdidas de N por volatilización.

Melchiori et al. (2007) evaluaron la diferencia en rendimiento de maíz para diferentes fertilizantes (UAN, urea, CAN, UAN+T) aplicando 80 kg N ha^{-1} en tres momentos (siembra, V6 y V10) del ciclo del cultivo y un testigo sin aplicación de N. Estos investigadores, obtuvieron que los tratamientos en los que se aplicó N, los rendimientos fueron superiores al testigo, pero los diferentes fertilizantes mostraron diferencias para el rendimiento promedio de los tres momentos. El rendimiento de los tratamientos con CAN y urea fue superior al rendimiento obtenido con UAN y no tuvieron diferencias significativas con el UAN+T. Por otra parte, los fertilizantes líquidos (UAN y UAN+T) tuvieron rendimientos similares.

Ferraris et al. (2009) en un trabajo realizado en Pergamino en el que se realizó fertilización a la siembra con dos dosis de N de 60 y 120 kg N ha⁻¹ con UAN, urea y urea más tiamida tiosfosfórica (urea + NBPT), el cual actúa bloqueando la enzima ureasa por el término de diez días aproximadamente, sumado a un testigo sin fertilizar. El rendimiento de los tratamientos fertilizados fue superior al testigo. Mientras que el mayor rendimiento, se obtuvo con una dosis de 60 kg N ha⁻¹ con UAN, lo cual fue atribuido a una limitación en los rendimientos y a la baja demanda de N causada por el estrés hídrico, el cual no tuvo diferencias significativas con los tratamientos de 120 kg N ha⁻¹ de UAN y las dos dosis de urea + NBPT, los cuales no difirieron con los tratamientos de urea.

En un experimento, realizado a nivel nacional por Ceriani e Innela (2012), para una misma dosis de N (50 kg N. ha⁻¹) en riego y en seco, se evaluaron dos fuentes de N, una sólida (Urea) y otra líquida (UAN) para identificar la opción más eficiente de agregado de N a V6. En este trabajo, no se encontró diferencias entre los fertilizantes, tanto en rendimiento o en alguno de sus componentes.

2.3.5. Métodos de aplicación de los fertilizantes

Los fertilizantes nitrogenados pueden ser aplicados de muchas formas y en diferentes momentos del ciclo del cultivo. En algunos casos, el fertilizante nitrogenado determina el método de aplicación, en otros casos, el tiempo de aplicación con respecto a la etapa de cultivo puede determinar el método de

aplicación más eficiente a utilizar. El método y el momento de la aplicación afectan la eficiencia de los fertilizantes nitrogenados, pudiendo ajustarse para mejorar la EUN (Peterson y Frye, 1989). Dentro de los métodos de aplicación y ubicación del fertilizante, para diferentes estados de desarrollo del cultivo podemos encontrar métodos de ubicación superficial como al voleo, aplicación subsuperficial como la inyección de fertilizantes líquidos, aplicación junto a la semilla como es en la línea, aplicaciones entre las hileras como la aplicación en bandas, aplicación de fertilizantes líquidos pulverizado o chorreado, o la aplicación del fertilizante a través del agua de riego (Maddonni et al., 2003). En este trabajo, vamos hacer hincapié en el último método anteriormente mencionado que es el fertirriego.

2.3.5.1. Fertirriego

El fertirriego o la fertirrigación es la aplicación de fertilizantes a los cultivos por vía del agua de riego (Bar-Yosef, 1991). Esta tecnología permite incrementar la eficiencia del uso de los fertilizantes, minimizar la aplicación de éstos y aumentar los beneficios económicos de la inversión en fertilizantes (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

En el uso de fertilizantes, el factor fundamental a considerar es que su aplicación debe ser tal, que acompañe los requerimientos de los cultivos. Pero dichos requerimientos varían a lo largo del ciclo de desarrollo de los cultivos y por lo tanto, el ideal sería utilizar varias aplicaciones pequeñas a lo largo del ciclo, monitoreando las necesidades en cada etapa. Esto explica, la principal

ventaja que presenta el fertirriego sobre otros métodos de aplicación de fertilizantes, debido a que el fertirriego nos permite satisfacer los niveles de requerimientos de nutrientes a lo largo del ciclo del cultivo (Baethgen, 1996). Otras ventajas específicas que presenta el fertirriego sobre otros métodos de aplicación de fertilizantes es el suministro más frecuente de nutrientes manteniendo una concentración más estable de los mismos en el suelo, permite una utilización más eficiente y una aplicación precisa de los fertilizantes de acuerdo con los requerimientos del cultivo. Asimismo, permite una aplicación más uniforme debido a que se aplica en todo el volumen del suelo regado provocando una mayor disponibilidad para el cultivo. Por último, se puede aplicar al suelo cuando las condiciones del suelo o del cultivo prohibirían la entrada al campo con equipos convencionales (Kafkafi y Kant, 2005).

El fertirriego, es una tecnología que permite reducir la aplicación de fertilizantes. Tal es así, que en un experimento realizado en maíz utilizando riego por goteo, la fertirrigación permite ahorrar entre el 30 y 50% de fertilizante sin afectar el crecimiento, ni el rendimiento del maíz (Fan et al., 2020).

Varios trabajos han implementado el fertirriego a través del método de riego por goteo con mantillo en maíz. En dos trabajos, realizados por Wang et al. (2021) y Zhanget al. (2019), encontraron que la utilización de esta práctica permite incrementar el rendimiento, acompañado de un aumento de la EUN y en conjunto a una mejora en la EUA en maíz.

Por otra parte, en un experimento realizado por Wuet al. (2019) de maíz en dos tipos suelo, uno de textura arcillosa y otro de textura arenosa, donde los

tratamientos aplicados fueron secano con una fertilización basal, riego por goteo con una fertilización basal (Rg), fertirriego por goteo (Fg), fertirriego por goteo subterráneo (Fgs) y fertirriego por goteo sumado a un mantillo de plástico (Fgp). Se comparó el rendimiento, la acumulación de nutrientes (N, P, K), la EUA y la eficiencia de uso de nutrientes (N, P, K) para los diferentes tratamientos en maíz. En la acumulación total de nutrientes no hubo diferencia entre el tratamiento con riego y los tratamientos con fertirriego, donde presentaron una mayor acumulación que el tratamiento en secano, para los dos tipos de suelo. El rendimiento, en el suelo arenoso se observó un aumento de un 28% para Rg, de 36% para Fgp y por último un 41% para Fg y Fgs, comparados con el secano. Mientras que en el suelo arcilloso los tratamientos Rg, Fg, Fgs y Fgp aumentaron el rendimiento un 12%, 17%, 13% y 18% respectivamente, en comparación con el secano. La EUN fue superior en los tratamientos bajo fertirriego, no presentando diferencias significativas entre sí, para los dos tipos de suelo. Por último, la EUA fue superior en los tratamientos bajo fertirriego tanto en los dos tipos de suelo, sin diferencias significativas en el suelo arenoso, pero con diferencias significativas entre Fgp y Fgs, presentando una mayor EUA que el tratamiento Fgp.

Un aspecto a destacar del fertirriego, es la frecuencia de aplicación del fertilizante y su impacto sobre el rendimiento de los cultivos. Para dos trabajos, uno realizado por Kumaret al. (2016) y otro por Chauhdary et al. (2019), encontraron que frecuencias de fertirrigación más altas en la aplicación de fertilizante N producen un mayor rendimientos en maíz en comparación con las frecuencias más bajas, en el primer trabajo pasando a una frecuencia semanal y en el segundo a una frecuencia diaria.

Otro aspecto, a considerar en el fertirriego es el tipo de fertilizante a usar. En un experimento realizado por Li et al. (2021), evaluaron los efectos de la urea, el nitrato de amonio, el sulfato de amonio y el nitrato de calcio aplicados mediante fertirrigación por goteo para los cultivos de trigo y maíz. Se encontró que los mayores rendimientos en maíz se obtuvieron utilizando como fertilizante urea y el sulfato de amonio, mientras que la mayor EUA y EUN en maíz se obtuvo con urea, además este fertilizante redujo la pérdida de N en un 15% promedio en comparación con los otros fertilizantes nitrogenados durante la temporada del maíz.

El dióxido de nitrógeno (N_2O) y óxido nitroso (NO) son importantes gases antropogénicos de efecto invernadero y la agricultura representa su mayor fuente (Reay et al., 2012). Por lo tanto, es importante mitigar el N_2O y las emisiones de NO a través de prácticas agrícolas optimizadas en agricultura (Zhanget al., 2019). Según Guillermo Guardia et al. (2017), el fertirriego es una práctica que permite disminuir la emisión de estos gases, el fertirriego aplicado a través de riego por goteo puede disminuir las emisiones de N_2O en un 80% y 78% para CAN y urea respectivamente, en comparación a la aplicación de estos fertilizante de forma sólida al voleo con un posterior riego por aspersión.

2.3.6. Manejo del N en maíz

El manejo del N en maíz en el país, se basa fundamentalmente en el análisis de suelo en dos momentos, a la siembra y en V6 (Quincke et al., 2008).

Para este manejo, el indicador utilizado es la concentración de NO_3^- en los primeros 20 cm del suelo, donde el nivel crítico a la siembra se encuentra entre 14 y 15 ppm y el nivel crítico a V6 entre 20 y 25 ppm para un maíz con rendimiento entre 10.000 y 14.000 kg ha^{-1} .

La desventaja que presenta este manejo del N es que aplicaciones a la siembra dejan expuesto a este nutriente a pérdidas por lixiviación, desnitrificación, volatilización y escorrentía debido a que la absorción del N por el maíz es mínima hasta los 35 días después de la emergencia (Beegle y Durst, 2003). Mientras que las fertilizaciones a V6 generalmente es más eficiente que la realizada a la siembra debido a que en este momento comienza la fase de máximo crecimiento y absorción de nutrientes por parte del cultivo (Ciampitti et al., 2010). Sin embargo, el maíz alcanza el 60% del N absorbido total a final de floración, provocando que elevadas dosis de N a V6, con el objetivo de satisfacer las necesidades del cultivo hasta el fin de su ciclo, provocan que parte de ese N sea absorbido y otra parte quede expuesta a pérdidas, el N perdido no es absorbido por el cultivo, sin posibilidad de otro momento de corrección es muy probable que el cultivo sufra deficiencias (Dreccer et al., 2003).

¹¹Hoffman, E. M. 2019. Nutrición y manejo de la fertilización en cultivos extensivos: cultivos de verano 2019 (sin publicar).

2.3.7. Fraccionamiento de la dosis de N

El fraccionamiento de dosis de N hace referencia a la aplicación del fertilizante nitrogenado en varias etapas del ciclo del cultivo, logrando una mejor utilización del N debido a la sincronización entre las aplicaciones y los periodos de mayor demanda por parte del cultivo (García y Espinosa, 2009). Además, permite reducir las pérdidas de N, aumentar la eficiencia de uso de este nutriente y, con ello, un aumento del rendimiento y calidad del grano (Okumura et al., 2011). Otras razones que justifican aplicar esta tecnología son diferir trabajos realizados a la siembra más adelante en el ciclo de cultivo y poder utilizar esta herramienta en conjunto a diagnósticos confiables en estadios avanzados (Scharf et al., 2002).

En un trabajo realizado por Ceriani e Innella (2012), estos autores evaluaron la aplicación de diferentes dosis de N en diferentes momentos en condiciones de riego y seco. Los tratamientos consistían en cuatro dosis de N en V6 de 50, 100, 150, 200 kg N ha⁻¹ y un testigo sin fertilizar, la combinación de 50 kg N ha⁻¹ en V6 y V10 o una aplicación única de 100 kg N ha⁻¹ en el estado V10. Estos autores encontraron una importante respuesta al agregado de N la cual fue amplificada con buenas condiciones hídricas. Por otra parte, bajo condiciones de riego no encontraron diferencias en los momentos de aplicación de N. En cambio, en condiciones de seco la mejor opción fue el agregado de N temprano (V6), ya que los tratamientos con N en V10 rindieron casi lo mismo que el testigo. Concluyeron que estos resultados se podrían explicar porque bajo condiciones de seco la ausencia de una aplicación de N en V6 generó un estrés nitrogenado hasta estados muy avanzados del cultivo

comprometió el rendimiento sin posibilidades de recuperarlo. En cambio, bajo condiciones de riego un estrés nitrogenado inicial puede ser tolerado sin deprimir el rendimiento si se agrega N a V10.

Siguiendo esta línea Cazabán y Rubio (2014) evaluaron la importancia del momento de fertilización en condiciones de secano. Para esto los tratamientos implementados fueron 100 kg N ha⁻¹ aplicados en V6, 100 kg N ha⁻¹ aplicados en V10 o fraccionada la mitad en cada estadio. Estos autores encontraron una disminución significativa del rendimiento por diferir la aplicación de N al estado de V10 mientras que no hubo diferencias entre aplicar 100 kg N ha⁻¹ en V6 o hacerlo fraccionado 50 kg N ha⁻¹ en V6 y 50 kg N ha⁻¹ en V10. Los autores explican que estos resultados eran esperables a causa de los bajos niveles de nitratos en suelo a V6.

Abraham y Falco (2016) evaluaron en condiciones de riego y secano el fraccionamiento de la fertilización en dos estadios (V6-V10 y V6-V12). Para el fraccionamiento compararon una dosis de 180 kg N ha⁻¹ en V6 frente a una misma dosis de 80 kg N ha⁻¹ en V6 sumada a una aplicación de 100 kg N ha⁻¹ en V10 o en V12. Por otra parte, se evaluó la aplicación de una misma dosis pero con el agregado de 130 kg N ha⁻¹ en V6 y 50 kg N ha⁻¹ en V10 o en V12. En riego no hubo respuesta al agregado de N posterior a V6, pero en secano la aplicación fraccionada de 130 kg N ha⁻¹ en V6 y 50 kg N ha⁻¹ en V10 tuvo un rendimiento significativamente mayor que la fertilización únicamente a V6.

En relación con este tema Armand Ugon y Ferrari (2018) evaluaron dos formas de fraccionamiento de la dosis de N en condiciones de riego. En primer

lugar, compararon el agregado de 120 kg N ha⁻¹ en una única dosis en V6 o V10 y fraccionada en partes iguales en esos dos momentos. Por otra parte, compararon la aplicación de una dosis de 180 kg N ha⁻¹ en V6, fraccionada en dos momentos con una aplicación de 120 kg N ha⁻¹ en V6 y 60 kg N ha⁻¹ en V10 y viceversa, por último, un fraccionamiento en tres momentos donde se aplicó 60 kg N ha⁻¹ en V6, V10 y en panojado (R1). Estos autores no encontraron diferencias significativas en los fraccionamientos para rendimiento, sus componentes o para EUN ni en la recuperación aparente de N en ninguno de los dos sitios experimentales.

Ernst et al. (2021) en un experimento, con el objetivo de generar información sobre estrategias de fertilización con N en maíz, evaluaron el rendimiento en grano, el contenido de N en planta y biomasa en los estadios V3, V6, R1 y madurez fisiológica. El experimento contó con cinco tratamientos, un testigo el cual recibió una aplicación basal de fertilizante nitrogenado a la siembra. Un primer tratamiento, el cual consistió en una dosis de 150 kg N ha⁻¹ fraccionada un 30% en V3 y un 70% en V7 a través de una fertilización en cobertura. Un segundo tratamiento similar al anterior con la diferencia que el fertilizante fue aplicado con el agua de riego. Un tercer tratamiento en el cual se aplicó una dosis de 150 kg N ha⁻¹ como fertilizante diluido en agua, fraccionado semanalmente con dosis crecientes desde V3 hasta R1, donde se aplicó un 5% de la dosis en las primeras 4 semanas, un 10% en la séptima a octava semana y un 15% desde la décima a doceava semana. Un cuarto tratamiento similar al anterior con la diferencia de que la dosis fue de 225 kg N ha⁻¹. Los tratamientos que fueron fertilizados presentaron mayor rendimiento que el testigo, sin detectar diferencias significativas entre los tratamientos. En el caso de la

biomasa, los tratamientos que fueron fertilizados presentaron una mayor producción de biomasa en los cuatro estados evaluados frente al testigo, sin detectar diferencia significativa. Es decir, el fraccionamiento de la dosis de N no tuvo efecto sobre el rendimiento ni sobre la producción de biomasa del cultivo. En relación a la concentración de N, estos autores describen que el rendimiento aumentó a medida que la concentración de N se acercaba a 1,47% en V6 y hasta 1,36% en R1.

En un trabajo realizado por Abebe y Feyisa (2017), evaluaron el rendimiento y la producción de biomasa bajo cuatro niveles de dosis de N (46, 69, 92 y 115 kg N ha⁻¹) y cuatro niveles de fraccionamiento de la dosis de N. La dosis y el fraccionamiento tuvieron influencia sobre el rendimiento del cultivo, pero el efecto de estos factores fue influenciado por la cantidad y distribución de las PP durante el ciclo. Se obtuvo que en una situación con una cantidad y distribución de las PP relativamente adecuadas la aplicación de 92 kg N ha⁻¹ con un fraccionamiento que consistió en la aplicación de un 50% de la dosis de N entre 10 y 15 días después de la siembra y el 50% restante siendo aplicado 35 a 45 días después de la siembra, el rendimiento obtenido fue el más alto. En contrapartida, en una situación con PP intensas e irregulares que pueden provocar pérdidas de N por escorrentía y lixiviación durante el tiempo de aplicación de N, la aplicación de 92 kg N ha⁻¹ con un fraccionamiento que consistió en una primera aplicación entre los 10 a 15 días después de la siembra de un tercio de la dosis de N, una segunda aplicación entre los 35 a 45 días después de la siembra de un tercio de la dosis de N y una tercera aplicación entre los 55 a 65 días después de la siembra de un tercio de la dosis de N, diera el rendimiento más alto. Por otra parte, la dosis como el

fraccionamiento también tuvieron efecto sobre la producción de biomasa, donde la mayor producción se obtuvo con una dosis de 115 Kg N ha⁻¹ y un fraccionamiento que consistió en una primera aplicación entre los 10 a 15 días después de la siembra de un cuarto de la dosis de N, una segunda aplicación entre los 33 a 40 días después de la siembra de un cuarto de la dosis de N, una tercera aplicación a los 55 a 60 días después de la siembra de un cuarto de la dosis de N y una cuarta aplicación a los 75 a 80 días después de la siembra de un cuarto de la dosis de N.

En otro trabajo realizado por Chura et al. (2019), con el objetivo de evaluar el efecto de diferentes densidades de siembra (62 500 y 69 444 pl ha⁻¹), tres dosis de N (180, 200 y 220kg N ha⁻¹) y dos niveles de fraccionamiento que consistieron en dividir la aplicación de N en dos momentos (50% de la dosis de N en V3 y 50% en V7) y en tres momentos (20% de la dosis de N en V3, un 40% en V7 y un 40% en V12). No se encontró un efecto significativo de las interacciones entre los factores sobre el crecimiento y componentes del rendimiento. Además, se encontró que el fraccionamiento del N por tres veces, no proporcionó ventajas con relación al fraccionamiento por dos veces.

García y Espinosa (2009) evaluaron el efecto del fraccionamiento de la dosis de N en 16 localidades. Los tratamientos consistieron en la aplicación de una dosis de 100 kg N ha⁻¹ aplicada 50% a la siembra y 50% en V6, 20% a la siembra y 80% en V6, 20% a la siembra, 40% en V6 y 40% en V10 y por último 30% a la siembra, 40% en V6 y 30% en V10. Estos investigadores obtuvieron como resultado que los fraccionamientos triples tuvieron un rendimiento significativamente superior a los fraccionamientos dobles en ocho localidades.

Dentro de los fraccionamientos triples, el fraccionamiento que consistió en la aplicación de un 20% a la siembra, 40% en V6 y 40% en V10 de la dosis de N, presentó mayores rendimientos que el fraccionamiento que consistió en la aplicación de 30% a la siembra, 40% en V6 y 30% en V10 de la dosis de N. No solamente se obtuvo los mayores rendimientos con ese fraccionamiento, sino que además se obtuvo los mayores valores de EUN con un valor de 33 kg de grano por cada kg de N.

Silva et al. (2005), evaluaron el efecto de la aplicación de tres dosis de N (30, 80 y 130 kg N ha⁻¹), la dosis de 30 kg N ha⁻¹ fue aplicada en VE, a diferencia de las dosis de 80 y 130 kg N ha⁻¹ las cuales fueron divididas en tres partes iguales en la etapa vegetativa (aplicadas en los estadios de V3 a V4, de V7 a V8 y de V10 a V11), en combinación a tres dosis de N en R1 (0, 50 y 100 kg N ha⁻¹), para dos híbridos de maíz. Según estos autores, el rendimiento en grano se vio afectado por la interacción entre la aplicación de N en el periodo vegetativo y en R1, donde la respuesta de los híbridos de maíz al agregado de N en R1 depende de la dosis de N en el estado vegetativo. Con una dosis de 30 kg N ha⁻¹ en el periodo vegetativo, el rendimiento aumentó 2.800 y 3.600 kg ha⁻¹ con la aplicación posterior de 50 y 100 kg N ha⁻¹ en R1, respectivamente, en comparación con el testigo. Este aumento en el rendimiento se debió a un NG mayor por mazorca. Mientras que con una dosis de 130 kg N ha⁻¹ en el periodo vegetativo, los aumentos fueron de 700 y 1.700 kg ha⁻¹, respectivamente, con la aplicación de 50 y 100 kg N ha⁻¹ en R1, en comparación con el testigo. En este caso el aumento del rendimiento se debió a un incremento del PG. Para una dosis intermedia de 80 kg N ha⁻¹ en el periodo vegetativo no hubo respuesta a la aplicación de N en R1.

Chaudhary et al. (2013) evaluaron el crecimiento, componentes del rendimiento, rendimiento y absorción de nutrientes, para tres dosis de N (125, 150 y 175 kg N ha⁻¹), fraccionadas en tres, cuatro y cinco momentos, con y sin azufre (control y 40 kg S ha⁻¹). Se encontró que el fraccionamiento en cuatro momentos (25% en la siembra, 25% en la etapa de V4-V6, 25% en V8, 25% en R1) presentó un mayor crecimiento, un aumento del rendimiento a causa de un aumento de sus componentes y un aumento de la absorción de nutrientes por parte del maíz.

Cardoso et al. (2011), evaluó tres formas de fraccionamiento de la dosis de N, 120 kg N ha⁻¹ en V4, 60 kg N ha⁻¹ en V4 y en V8 y 40 kg N ha⁻¹ en V4, V8 y V12, aplicados en cobertura. Se encontró que el fraccionamiento no tuvo efecto sobre el rendimiento y tampoco sobre sus componentes, independientemente del fertilizante nitrogenado utilizado.

Por otra parte, Hammad et al. (2011), evaluaron el rendimiento y crecimiento de maíz para cinco dosis de N (100, 150, 200, 250 y 300 kg N ha⁻¹) y tres formas de fraccionamiento de la dosis de N, las cuales consistían en fraccionar la dosis de N en un tercio a la siembra, un tercio en V6 y un tercio en V12, en un tercio en V2, un tercio en V16 y un tercio en R1 y un tercio a la siembra, un tercio en V12 y un tercio en R2. Tanto el fraccionamiento como la dosis de N tuvieron efecto sobre el crecimiento y rendimiento del maíz, donde el mayor rendimiento se obtuvo con una dosis de 250 kg N ha⁻¹ y con la aplicación de un tercio de la dosis de N en V2, un tercio en V16 y un tercio en R1.

En un experimento, realizado por Panison et al. (2019) evaluaron el efecto del fraccionamiento de la dosis de N sobre el rendimiento, sus componentes y la EUN en dos híbridos de maíz. Los tratamientos consistieron en un testigo sin fertilizar, en tres aplicaciones únicas de una dosis de 300 kg N ha⁻¹ en los estadios V5, V10 y VT, en dos formas de fraccionamiento de esa misma dosis aplicado la mitad en V5 y la otra mitad en V10 y por último dividiendo esa dosis de 300 kg N ha⁻¹ en tres partes iguales en los estados V5, V10 y VT. Las aplicaciones de la dosis de N realizadas una vez en V5 o V10 o dividida en dos o tres aplicaciones en diferentes etapas de crecimiento, no presentaron diferencias significativas en rendimiento, en NG y en PG. Mientras que la aplicación única en VT presentó un menor rendimiento y NG que los demás tratamientos, pero superó al testigo sin fertilizar. Para el caso del componente PG no se encontraron diferencias significativas entre las aplicaciones únicas o el fraccionamiento, presentando un PG superior al testigo en todos los casos. Por otra parte, la EUN no mostró diferencias significativas para los diferentes tratamientos fertilizados, los cuales presentaron una mayor EUN que el testigo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El experimento se realizó en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC) de Facultad de Agronomía, ubicada sobre ruta 3, Km 363, en el Departamento de Paysandú, Uruguay, (32° 23´S; 58° 02´ W), durante el año agrícola 2019-2020. El ensayo se realizó sobre el campo experimental de riego, en un suelo clasificado como Brunosol sub-éutrico típico correspondiente a la unidad San Manuel, sobre la formación Fray Bentos (Altamirano et al., 1976). Las características físicas e hidrológicas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características físicas e hidrológicas del suelo.

Horizonte	Profundidad (cm)	Dap. (g cm ⁻³)	PMP (mm)	CC (mm)	CAAD (mm)
A	0-20	1,25	28	54	26
B	20-70	1,34	150	235	85
Total	0-70		178	289	111

Dap.: densidad aparente. CC: capacidad de campo. PMP: punto de marchitez permanente. CAAD: capacidad de almacenaje de agua disponible.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

La siembra se realizó el 18 de noviembre de 2019. El cultivar utilizado fue NS7818Viptera3, que posee tres eventos transgénicos los cuales les confieren resistencia a lepidópteros (BT11y MIR162) y a glifosato (GA21). En el

estado V2 se realizó un raleo manual con el objetivo de lograr una población de 100.000 pl. ha⁻¹.

El control de malezas se realizó a través de una aplicación en pre-emergencia de Dual Gold (2 l ha⁻¹). Mientras que no fue necesaria la aplicación de insecticidas para el control de plagas.

Por otra parte, según el análisis de suelo realizado a la siembra la concentración de NO₃⁻ en suelo fue de 10 ppm. Mientras que no fue necesaria la aplicación de fósforo y potasio.

En este experimento, se evaluaron seis tratamientos, los cuales están conformados por tres formas de fraccionamiento de la dosis de N que consistieron en la aplicación de N en dos momentos (Frac.DN 1), en cinco momentos (Frac.DN 2) y ocho momentos (Frac.DN 3) durante el ciclo del cultivo, bajo dos condiciones hídricas riego y secano (Cuadro 2). El fertilizante nitrogenado utilizado fue urea y se aplicó en forma manual inmediatamente después del riego, al ser un fertilizante soluble se disolvía de forma rápida asemejándose a un fertirriego, en diferentes etapas del ciclo del cultivo las que se detallan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Esquema de los tratamientos evaluados.

Tratamientos			V2	V6	V7	V7	V8	V10	V11	VT	N Total
T1	Riego	Frac.DN 1	41	109							150
T2		Frac.DN 2	21	33		33		33		33	152
T3		Frac.DN 3	21	19	19	19	19	19	19	19	153
T4	Secano	Frac.DN 1	41	109							150
T5		Frac.DN 2	21	33		33		33		33	152
T6		Frac.DN 3	21	19	19	19	19	19	19	19	153

N: Nitrógeno. Tn: Tratamiento. Vn: Número de hojas. VT: Panojamiento.

Frac.DN 1: Fraccionamiento de la dosis de N en 2 momentos.

Frac.DN 2: Fraccionamiento de la dosis de N en 5 momentos.

Frac.DN 3: Fraccionamiento de la dosis de N en 8 momentos.

El experimento contó con tres bloques y dos tamaños de parcela. El fraccionamiento de la dosis de N se aplicó en la parcela menor y el factor disponibilidad hídrica se aplicó en la parcela mayor (Figura 1). En este caso se debe utilizar dos tamaños de parcela debido a que el riego no puede ser aplicado en el mismo tamaño de parcela que el factor fraccionamiento de la dosis de N, por temas operativos.

B III	Frac.DN1	Frac.DN2	Frac.DN3	Frac.DN1	Frac.DN2	Frac.DN3
	Riego			Secano		
B II	Frac.DN3	Frac.DN2	Frac.DN1	Frac.DN3	Frac.DN2	Frac.DN1
	Secano			Riego		
B I	Frac.DN2	Frac.DN1	Frac.DN3	Frac.DN2	Frac.DN1	Frac.DN3
	Secano			Riego		

B: Bloque.

Frac.DN1: Fraccionamiento de la dosis de N en 2 momentos.

Frac.DN2: Fraccionamiento de la dosis de N en 5 momentos.

Frac.DN3: Fraccionamiento de la dosis de N en 8 momentos.

Figura 1. Esquema del experimento.

El método de riego utilizado fue por goteo, para ello cada hilera contó con un lateral con emisores ubicados a 0,20 m en cada cinta y reguladores de presión a nivel del sistema de riego a modo de entregar un caudal constante de 1,49 l h⁻¹. El manejo de riego, consistió en disponer un nivel de agua disponible (AD) del suelo por encima del 60% durante el PC y por encima del 40% en el resto de las etapas del cultivo. Se consideró como PC a la etapa ubicada 15 días antes del inicio de la floración femenina y 15 días posteriores a la misma. El riego fue empleado según balances hídricos de paso diario, los cuales consideraron $\Delta H = PP + R - ET_c$ siendo ΔH la variación del agua en el suelo y ET_c la evapotranspiración de cultivo. La ET_c que se calculó en base a la evapotranspiración de referencia (ET_o) de Penman–Monteithy el valor de coeficiente del cultivo (K_c) recomendado por las tablas de FAO para el cálculo de necesidades hídricas de los cultivos. Los datos de PP, temperaturas y

radiación solar incidente utilizados se obtuvieron a partir de la Estación meteorológica automática de la EEMAC (Vantage Pro 2TM modelo 6510).

3.3. DETERMINACIONES EFECTUADAS

Se midió la evolución de la acumulación de biomasa aérea a lo largo del ciclo del cultivo. Para lo cual se realizaron tres muestreos de biomasa aérea, al inicio de PC (7 de enero, muestreo 1), fin de PC (7 de febrero, muestreo 2) y cosecha (23 de marzo, muestreo 3). En los dos primeros muestreos, se cortó un metro lineal de plantas a ras del suelo, el cual se encontró al centro de la parcela para asegurar que las plantas se encontraban en competencia a ambos lados. A cosecha se cortaron dos metros de planta con igual criterio de corte para medirlos componentes numéricos del rendimiento.

La muestra se pesó en fresco y se retiró una planta representativa, que se utilizó como sub-muestra, la cual se secó en estufa a temperatura de 60°C hasta peso constante, para la determinación del porcentaje de MS. Al final del PC, a las plantas de la muestra se les retiró la espiga y se midió el peso fresco de las chalas y las espigas, los cuales fueron llevados a estufa en el laboratorio para la determinación del porcentaje de MS. En el momento de la cosecha, se realizaron las mismas determinaciones, a las cuales se le sumó el peso fresco de los marlos de la muestra y su peso seco, luego de haber sido secados en estufa.

Para determinar los componentes del rendimiento, se realizó la cosecha en forma manual. En el laboratorio, se midió la longitud de las espigas, el número de hileras por espiga (NHE), el número de granos por hilera (NGH), el número de granos por espiga (NGE), el peso de mil granos (PG) y el porcentaje de humedad de los granos.

3.4. DETERMINACIONES ESTADÍSTICAS

3.4.1. Hipótesis biológicas

El fraccionamiento de la dosis de N provoca incrementos significativos del rendimiento en maíz, bajo condiciones de riego.

El fraccionamiento de la dosis de N provoca incrementos significativos del rendimiento en maíz, bajo condiciones de secano.

3.4.2. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue el de parcelas divididas, correspondiendo la parcela mayor al factor disponibilidad hídrica y la parcela menor al factor fraccionamiento de la dosis de N.

3.4.3. Análisis estadístico

El análisis se realizó mediante el software estadístico "InfoStat" versión estudiantil 2020. Por medio de este software, se realizó un análisis de varianza y se hicieron pruebas de comparación múltiple de medias (según Tukey al 5%).

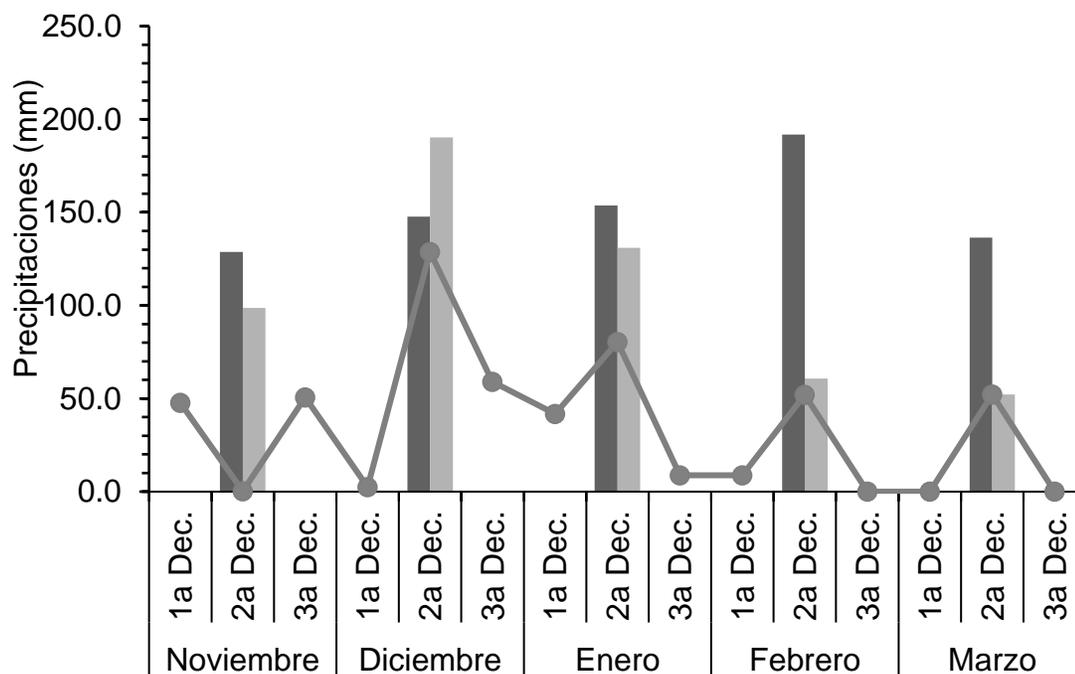
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS

4.1.1. Precipitaciones

La Figura 2, muestra las PP registradas en la zafra 2019-2020 y las PP medias acumuladas mensualmente de la serie histórica 2002-2020, elaboradas en base a los registros de la estación meteorológica automática de la EEMAC¹.

¹Udelar. FA-EEMAC (Universidad de la República.Facultad de Agronomía. EEMAC). 2020. Precipitaciones (sin publicar). 46



Columna gris oscura: PP promedio mensual (mm-histórico 2002-2020).

Columna gris clara: PP mensual año 2019-2020.

Línea gris: PP decádica año 2019-2020 (mm).

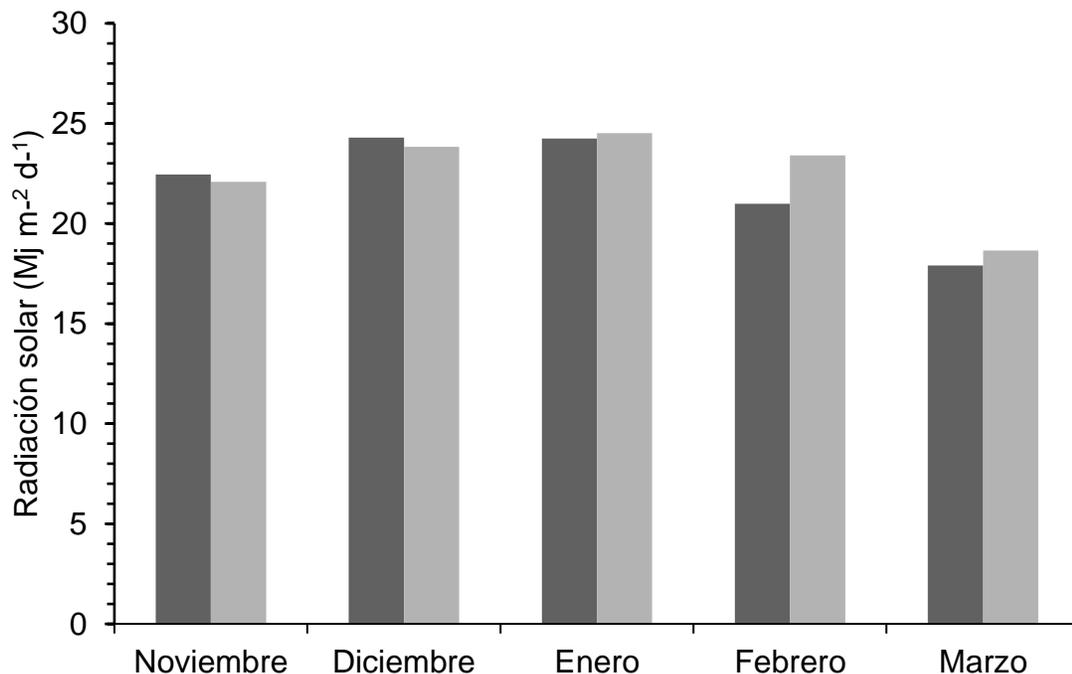
Figura 2. Precipitaciones (mm) ocurridas en la EEMAC (Paysandú) en el verano 2019-2020 y valores promedio para la serie histórica considerada de 2002 a 2020.

Como se puede observar en la Figura 2, diciembre fue el único mes donde las PP fueron superiores a la media histórica presentando 42 mm por encima de la misma, mientras que los meses de noviembre y enero presentaron valores levemente inferiores a la media histórica, 30 mm y 23 mm, respectivamente. Por otra parte, en los meses de febrero y marzo las PP estuvieron muy por debajo de la media histórica, 131 mm y 84 mm, respectivamente.

Las PP acumuladas durante el ciclo del cultivo fueron de 485 mm, encontrándose por debajo de la media histórica para ese periodo de 669 mm. Mientras que durante el PC las PP sumaron un total de 133 mm, encontrándose 174 mm por debajo de la media histórica para ese periodo.

4.1.2. Radiación solar

La Figura 3, muestra los valores mensuales promedio de radiación solar (RS) diaria incidente en la zafra 2019-2020 y medias mensuales de RS diaria incidente para la serie histórica 2002-2020, elaboradas en base a los registros de la estación meteorológica automática de la EEMAC.



Columna gris oscura:Media Histórica: Radicación media diaria incidente histórica del periodo 2002-2020.

Columna gris clara:Radiación media diaria incidente del periodo 2019-2020.

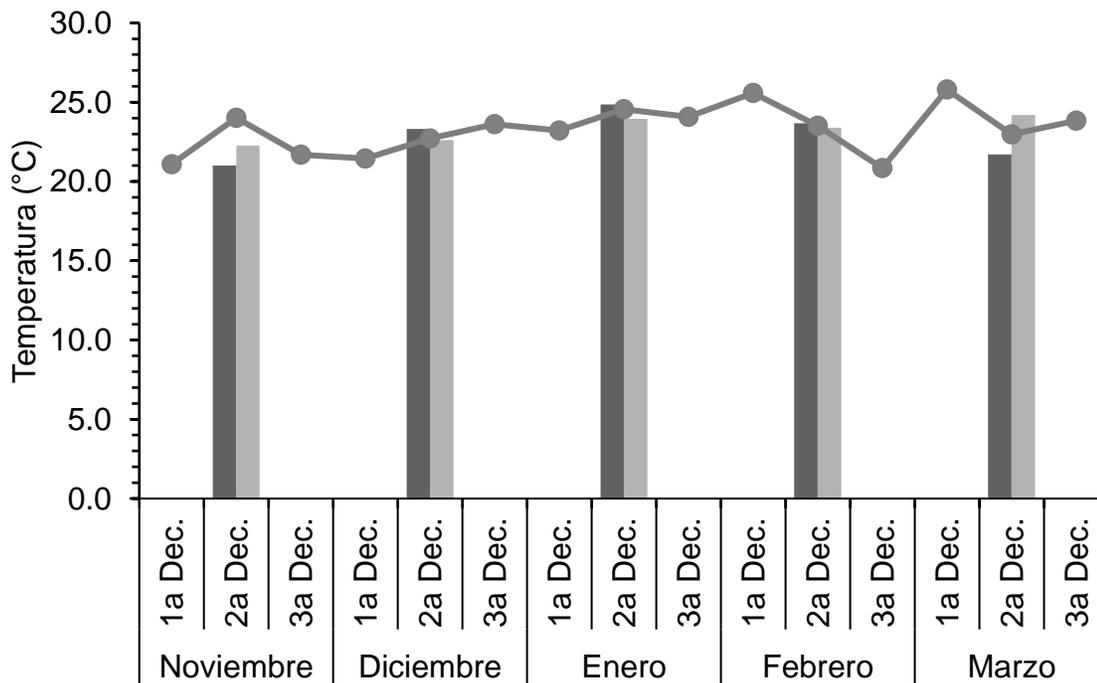
Figura 3. Radiación solar (Mj m⁻² d⁻¹) diaria promedio incidente ocurrida en la EEMAC (Paysandú) en el verano 2019-2020 y las medias mensuales para la serie histórica 2002 a 2020.

En la Figura 3, se observa que en los meses de febrero y marzo del año agrícola 2019-2020 fueron los que presentaron mayores diferencias con el promedio de la serie histórica, mostrando valores de RS diaria incidentes superiores al promedio histórico. Esto fue consecuencia de las menores PP con respecto a la media histórica, lo que generó valores de RS diaria incidentes mayores en los meses mencionados.

La RS diaria incidente promedio durante el ciclo del cultivo en 2019-2020 fue de $22,8 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ superando al promedio histórico de $22,1 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, a causa de las menores PP en comparación a la serie histórica como anteriormente fue mencionado. El mismo efecto sucedió durante el PC, la RS diaria incidente promedio durante este periodo en 2019-2020 fue de $24,6 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ superando el promedio histórico de $23,5 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

4.1.3. Temperatura

En la Figura 4, se muestran las medias mensuales de temperatura en la zafra 2019-2020 y las medias mensuales de temperatura para la serie histórica 2002-2020, elaboradas en base a los registros de la estación meteorológica automática de la EEMAC.

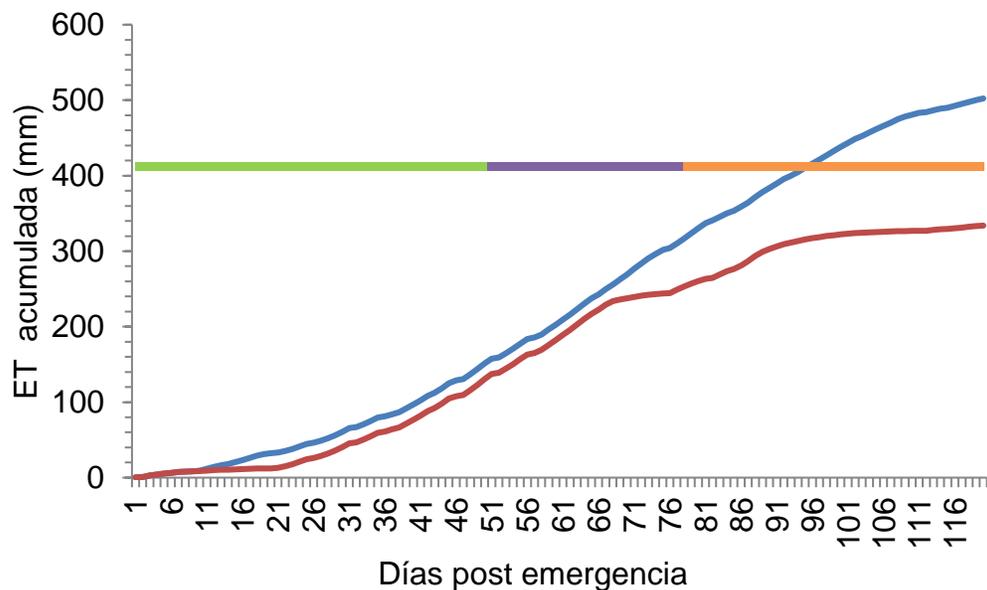


1a Dec: Primera decada. 2a Dec: Segunda decada . 3a Dec: Tercera decada.
 Columna gris oscura: Temperatura promedio mensual del periodo 2002-2020.
 Columna gris clara: Temperatura promedio mensual del periodo 2019-2020.
 Línea gris: Temperatura decádica del periodo 2019-2020.
 Figura 4. Temperaturas (°C) promedio mensuales y decádicas durante la zafra 2019-2020 ocurridas en la EEMAC (Paysandú) y valores promedio mensuales de la serie histórica 2002-2020.

Las temperaturas durante la zafra 2019-2020 fueron similares al promedio histórico 2002-2020. De todas formas, las temperaturas durante el ciclo del cultivo estuvieron por debajo de las temperaturas óptimas para maíz mencionadas por Fassio et al. (1998), igualmente se entiende que no fueron limitantes para los procesos de crecimiento y desarrollo del cultivo.

4.1.4. Evapotranspiración del cultivo

En la Figura 5, se presenta la curva de la ET acumulada del cultivo para los tratamientos bajo condiciones de riego y seco.



Línea azul: Riego. Línea roja: Secano.
Línea verde: Periodo vegetativo.
Línea violeta: Periodo crítico.
Línea naranja: LLenado de granos.

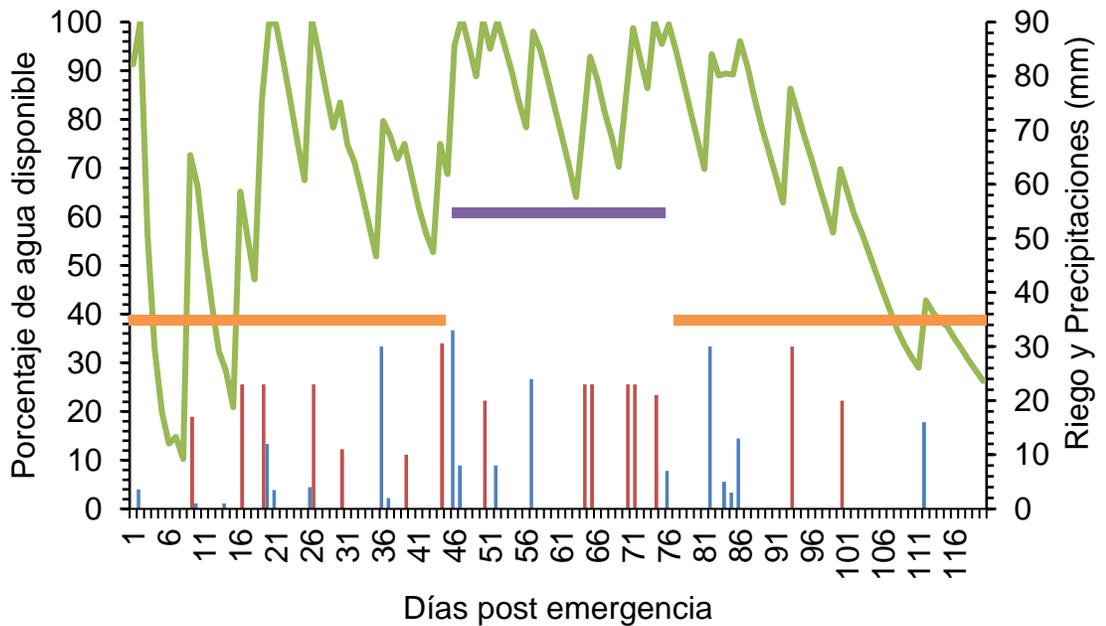
Figura 5. Evapotranspiración (ET) acumulada (mm) durante el ciclo del cultivo para los tratamientos bajo condiciones de riego y seco.

La ET acumulada del cultivo bajo condiciones de riego presentó un valor aproximado a 500 mm muy superior al valor de ET registrado en condiciones de seco de 330 mm. Al comparar estos valores con los registrados por Giménez (2012a) de 460 a 600 mm para cultivos de maíz con

un rendimiento entre 13.200 y 15.300 kg ha⁻¹, encontramos que los tratamientos bajo condiciones de riego se encontraron en valores de ET aproximados. En cambio, en los tratamientos bajo condiciones de secano están muy por debajo. Durante la etapa vegetativa la ET de los tratamientos regados y secanos presentaron diferencias mínimas con valores de ET de 100 mm aproximadamente. En cuanto al PC las diferencias entre regados y secanos comenzaron a ser mayores, la ET en condiciones de riego presentó un valor de 189 mm siendo superior al valor de ET en condiciones de secano de 152 mm. Por último, durante el llenado de granos se encontraron grandes diferencias en la ET del cultivo, mientras los tratamientos bajo condiciones de riego presentaron valores de 200 mm aquellos bajo condiciones de secano vieron muy disminuido su consumo de agua presentando un valor de 90 mm.

4.1.5. Evolución del agua disponible en el suelo

En la Figura 6, se muestra la evolución del porcentaje de AD en suelo estimando mediante un balance hídrico de suelos, a la profundidad radicular para los tratamientos bajo condiciones de riego, en conjunto a los umbrales de riego de 60% del AD para el PC y 40% del AD para las otras etapas del cultivo, sumado a los riegos realizados y las PP.



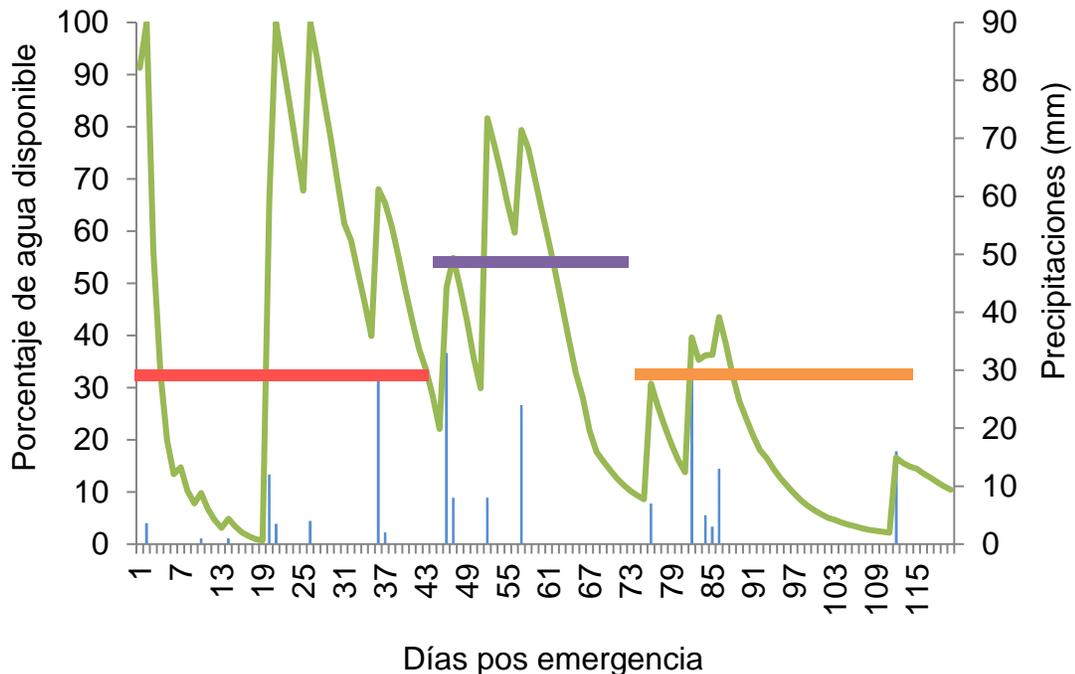
- Línea verde: Porcentaje de agua disponible.
- Líneas naranjas: Umbral de riego para etapas no críticas.
- Línea violeta: Umbral de riego para el periodo crítico.
- Columnas azul: Precipitaciones efectivas (mm).
- Columnas rojas: Riego efectivo (mm).

Figura 6. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) para los tratamientos bajo condiciones de riego.

En la Figura 6, se puede apreciar que el contenido de AD durante la etapa vegetativa se encontró, mayoritariamente, por encima del 40%, no obstante, se pueden observar periodos cortos por debajo de este umbral, se interpreta que los mismos no afectaron el crecimiento del cultivo ya que se ubicaron en las primeras etapas del ciclo. En concordancia con esta interpretación, Cakir (2004) describe que las deficiencias en esta etapa tienen un bajo efecto sobre el rendimiento. El AD durante el PC estuvo por encima del

60%. Por otra parte, durante el periodo de llenado de granos, el AD en el suelo estuvo por encima del 40% en la gran parte de este periodo, sin embargo, se puede observar un periodo muy corto por debajo de este umbral que no tendría efectos sobre el llenado de granos. Por lo tanto, podemos afirmar que el cultivo no sufrió deficiencias y se encontró en situación de bienestar hídrico. Esto es respaldado por Muchow y Sinclair (1991) y Andrade y Sadras (2000) quienes afirman que los cultivos comienzan a sufrir estrés hídrico cuando los niveles de AD se encuentran por debajo de 60% durante el PC y por debajo del 40% durante las otras etapas del cultivo. En igual forma, Giménez (2010) siguiendo estos umbrales de riego ha obtenido rendimientos de maíz superiores a 13.000 kg ha⁻¹.

En la Figura 7, se presenta la evolución del porcentaje de AD en suelo estimando mediante un balance hídrico de suelos, a la profundidad radicular para los tratamientos bajo condiciones de secano.



Línea verde: Porcentaje de agua disponible.
 Línea roja: Periodo vegetativo.
 Línea violeta: Periodo crítico.
 Línea naranja: Llenado de granos.
 Columnas azul: Precipitaciones efectivas (mm).

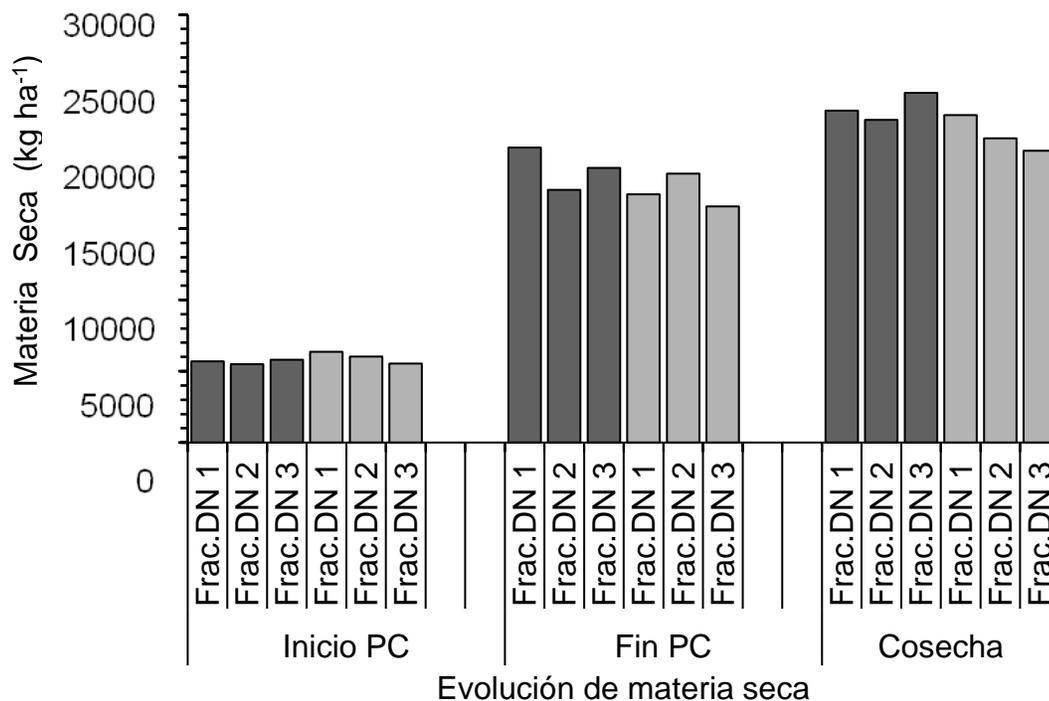
Figura 7. Evolución del porcentaje de AD para los tratamientos bajo condiciones de secano.

En la Figura 7, se presenta la evolución del porcentaje de AD en los tratamientos bajo condiciones de secano. Se tomó nuevamente como referencia lo reportado por Muchow y Sinclair (1991) y Andrade y Sadras (2000). Por lo tanto, durante la etapa vegetativa el cultivo se mantuvo con una buena disponibilidad hídrica, solamente durante un periodo corto el AD se encontró por debajo de 40%. En tanto, las condiciones hídricas durante el PC fueron diferentes, durante dos tercios de este periodo el cultivo presentó deficiencias

encontrándose los niveles de AD por debajo del 60%. Por último, durante todo el periodo de llenado de granos el cultivo se encontró en una situación de deficiencias hídricas, presentando en una parte significativa de este periodo disponibilidades hídricas inferiores a 20 % de AD.

4.2. EVOLUCIÓN DE LA MATERIA SECA

En la Figura 8, se muestra la MS acumulada por unidad superficie en las tres etapas evaluadas (inicio del PC, final del PC y cosecha), para los tres niveles de fraccionamiento de la dosis de N en condiciones de riego y seco. No se encontraron diferencias en la acumulación de MS, en las tres etapas evaluadas entre los distintos tratamientos estudiados.



Gris oscuro: Riego. Gris claro: Secano. PC: Periodo crítico.
 Frac.DN 1: Fraccionamiento de la dosis de N en 2 momentos.
 Frac.DN 2: Fraccionamiento de la dosis de N en 5 momentos.
 Frac.DN 3: Fraccionamiento de la dosis de N en 8 momentos.
 Las columnas con letras diferentes en cada condición hídrica presentan diferencias significativas (p -valor $< 0,05$).
 Figura 8. Evolución de la materia seca (MS, kg ha^{-1}) para cada nivel de fraccionamiento de la dosis de N en riego y secano evaluada al inicio del período crítico (PC), final del PC y a cosecha.

Al analizar la evolución de la MS acumulada, se observa que la mayor acumulación sucede durante el PC. Esto se debe a que durante la etapa de llenado de granos ocurre un proceso de removilización de reservas desde los

órganos vegetativos hacia los granos (Dreccer et al., 2003). Este proceso da lugar a una pérdida neta en el peso de los órganos vegetativos durante esta fase final del crecimiento, no experimentando aumentos significativos en la MS total (Andrade et al., 1996).

La ausencia de diferencias en la acumulación de MS al inicio y final del PC, para los diferentes niveles de fraccionamiento evaluados, puede atribuirse a que el fraccionamiento de las dosis no afectó la disponibilidad de N para el cultivo. Se interpreta que esto provocó que aquellos factores determinantes de la producción de MS que dependen de la disponibilidad de N como el IAF y la EUR, no fueron afectados por el fraccionamiento de dosis de N, y de esa manera se explicaría la ausencia de diferencias en la acumulación de MS. En el caso de la MS a cosecha hay una pérdida en el peso de los órganos vegetativos debido a una removilización de reservas y a la translocación de N hacia los granos. Por tanto, no se generan aumentos significativos en la acumulación de la MS durante esta etapa. Por consecuencia, al no haber encontrado diferencias en la acumulación de MS para los diferentes niveles de fraccionamiento toma importancia cuantificar de esa MS acumulada por el crecimiento de los granos.

4.3. RENDIMIENTO Y PRINCIPALES COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

En el Cuadro 3, podemos observar el rendimiento, el NG y el PG obtenidos, para los diferentes niveles de fraccionamiento de las dosis de N bajo condiciones de riego y seco.

Cuadro 3. Rendimiento (kg ha^{-1}), número de granos por metro cuadrado (NG) y el peso de mil granos (PG, g), para los diferentes niveles de fraccionamiento de la dosis de N y para dos condiciones hídricas.

Tratamientos		Rendimiento (kg ha^{-1})	NG	PG (g)
Riego	Frac.DN 1	12871 b	4808	278 b
	Frac.DN 2	13492 ab	4455	291 ab
	Frac.DN 3	15062 a	4822	312 a
Secano	Frac.DN 1	12701 b	4138	278 b
	Frac.DN 2	12927 b	4383	285 b
	Frac.DN 3	12738 b	4082	286 b

PG: Peso de mil granos. NG: Número de granos por metro cuadrado.

Frac.DN 1: Fraccionamiento de la dosis de N en 2 momentos.

Frac.DN 2: Fraccionamiento de la dosis de N en 5 momentos.

Frac.DN 3: Fraccionamiento de la dosis de N en 8 momentos.

Las letras diferentes en cada condición hídrica presentan diferencias significativas (p -valor $< 0,05$).

Los resultados en rendimiento presentados en Cuadro 3 muestran una clara interacción entre el riego y fraccionamiento de la dosis de N, donde en condiciones de riego al implementar el Frac.DN 3 se obtuvieron incrementos significativos en rendimiento en granos. Las diferencias en rendimiento en condiciones de riego entre el Frac.DN 1 y el Frac.DN 3, se fundamentan en que puede suceder que una fertilización en el estadio V6 no permita cubrir los requerimientos de N del cultivo. Esto se debe a que entre la aplicación de N a V6 y el final del ciclo del cultivo transcurre un periodo de 90 días, en los cuales ese N aplicado en forma de urea puede sufrir pérdidas. Las pérdidas de N, provenientes de la urea en verano, están ligadas principalmente al proceso de volatilización, el cual depende de la humedad del suelo y de la demanda atmosférica. En cultivos bajo riego, es posible manejar el volumen y el momento

que se debe aplicar la lámina de riego, a través de la implementación de un balance hídrico de suelos y utilizando como criterio de riego el porcentaje de AD del suelo. Sin embargo, lo que no podemos manejar es el volumen y el momento en que ocurren las PP. Si tenemos en consideración que en los 90 días hasta el final del ciclo del cultivo se aplicaron 283 mm a través de riego y sucedieron 15 eventos de PP con un volumen total de 294 mm, de los cuales cinco eventos, provocaron la saturación del suelo y dos de estos sucedieron antes de los 20 días posteriores a aplicación de N en V6. Se puede afirmar que, durante el transcurso del ensayo, sucedieron condiciones de elevada humedad del suelo. En conjunto, a las altas demandas atmosféricas del verano, se interpretó que ocurrieron condiciones favorables para que hubieran pérdidas de N por volatilización. Esto sumado a la baja capacidad de absorción de N que presenta el cultivo en V6 y a la ausencia de otro momento de corrección de la fertilización nitrogenada, es muy probable que el cultivo haya sufrido deficiencias de N, provocando por este motivo la disminución del rendimiento. En cambio, un fraccionamiento que consista en aplicaciones sucesivas de N durante el periodo V6 a VT permite acompañar mejor los requerimientos de N durante el ciclo del cultivo, minimizando la probabilidad de que este nutriente quede expuesto a pérdidas y pueda ser absorbido en mayor cantidad evitando deficiencias.

Por otro lado, en condiciones de secano, no se encontraron diferencias en rendimiento para los diferentes niveles de fraccionamiento. Esto se explica en base a lo expuesto en la Figura 5, donde se constató que en condiciones de secano la ET del cultivo estuvo muy por debajo de los tratamientos bajo riego en los que el cultivo se encontró con bienestar hídrico y mostró una diferencia

en la ET en el ciclo de 170 mm a favor de los tratamientos regados. Claramente los tratamientos en secano mostraron deficiencias hídricas las que les limitaron alcanzar rendimientos más altos, dejando sin efecto al fraccionamiento de la dosis el cual incide solo sobre la disponibilidad de N.

En relación a los componentes principales del rendimiento, el NG bajo condiciones de riego no presentó diferencias frente a las estrategias de fraccionamientos de N evaluadas. Este comportamiento, se atribuye a que las diferentes alternativas de fraccionamiento, permitieron satisfacer las necesidades de N del cultivo, antes y durante el PC de determinación del rendimiento. En ese sentido, se evitó la ocurrencia de deficiencias de N previas y durante el PC, necesarias para alcanzar el mayor NG. Mientras que bajo condiciones de secano al igual que en condiciones de riego, no se encontraron diferencias entre los niveles de fraccionamiento evaluados. Pero en este caso, no podemos afirmar que el cultivo alcanzó el mayor NG por cubrir sus requerimientos de N durante el PC. Esto se debe, a lo mostrado en la Figura 7, donde se observa que durante dos tercios del PC el cultivo sufrió deficiencias hídricas. Por lo tanto, la ausencia de diferencias en el NG en condiciones de secano se debió a que se encontró limitado por la disponibilidad de agua, esto deja sin efecto el fraccionamiento el cual actúa sobre la disponibilidad de N.

En relación al componente de rendimiento PG, se detectaron diferencias entre el Frac.DN 1 y el Frac.DN 3 en condiciones de riego. Las diferencias encontradas se fundamentan en que la fertilización en el estadio V6 permitió cubrir los requerimientos de N hasta el PC, pero no fue suficiente para cubrir los requerimientos durante el llenado de granos. Esto se debió a que

entre la aplicación de N que se realizó en V6 y el comienzo del llenado de granos transcurrió un periodo de 50 días, en los cuales sucedieron 9 eventos de PP con un volumen total de 202 mm. Esto se interpreta que provocó que ese N aplicado haya quedado expuesto a pérdidas. Por otra parte, si se considera que el cultivo procede de su período de mayor absorción de N y al no haber otro momento de corrección de la fertilización, es muy probable que el contenido de N en el suelo, no haya sido suficiente para cubrir los requerimientos durante el llenado de granos, por tanto, se presentaron deficiencias de este nutriente. Por lo tanto, se concluye que las deficiencias de N durante el llenado de granos son las responsables de las diferencias entre tratamientos en el PG en condiciones de riego. Las diferencias en PG entre Frac.DN 1 y el Frac.DN 3 fueron superiores a los 30 g, se interpretan que fueron causadas por las deficiencias de N durante la fase de llenado efectivo de granos, fase en la cual el grano acumula la mayor parte de su peso seco. En esta etapa, el efecto de una deficiencia de N sobre el PG se da a través de su influencia sobre la producción de fotoasimilados. En este trabajo, la ocurrencia de una deficiencia de N durante el llenado de granos se interpreta que provocó una mayor traslocación de N de los órganos vegetativos hacia los granos. Al reducirse el contenido de N en las hojas se produce una disminución de la actividad fotosintética que causa una senescencia anticipada, coincidente con lo reportado por Rajcan y Tollenaar (1999a). La disminución de la actividad fotosintética del cultivo y una senescencia anticipada, serían las responsables de la producción de fotoasimilados menor. Pero se debe considerar que el PG durante la fase de llenado efectivo de granos depende de la duración y de la tasa de llenado de granos. Esto fue desarrollado por Rivelli et al. 2016 y Maddonni et al. (1998) quienes reportan que una disminución en la capacidad

de producción de fotoasimilados provoca un acortamiento en el periodo de llenados de granos, sin afectar la tasa de llenado causando la reducción del PG. Por otra parte, reducciones en el PG a causa del acortamiento del periodo efectivo de llenado de granos ante disminuciones en la disponibilidad de N han sido reportadas por Cordi et al. (1997), Fernández y Ciampitti (2018), Mayer et al. (2012) y Muchow (1988). Por lo tanto, en este trabajo se interpretó que las deficiencias de N durante el llenado de granos, principalmente durante la fase de llenado efectivo, afectaron tanto la actividad fotosintética como la duración del área foliar generando una disminución en producción de fotoasimilados. La cual se interpretó como la causante de una reducción del periodo efectivo de llenados de granos provocando un menor PG. En cambio, en aquellos tratamientos en condiciones de riego en los que se aplicó un fraccionamiento que consistió en siete aplicaciones de N durante el periodo entre V6 y VT, permitió acompañar los requerimientos de N durante el ciclo del cultivo, consiguiendo que el N aplicado no haya quedado expuesto a pérdidas y sea absorbido por el cultivo. Esto sumado a la aplicación de N, hasta estadios avanzados del ciclo, permitió satisfacer las necesidades de N durante el llenado de granos. De esta manera, se superaron las restricciones impuestas por el agotamiento del N del suelo y una menor capacidad del cultivo para capturar nutrientes debido a un menor crecimiento radicular. Al aumentar la disponibilidad de N para el cultivo, una mayor proporción del N demandado por los granos fue cubierta por el N absorbido, disminuyendo la translocación del N de las hojas a los granos. De esta manera, se logró aumentar el área foliar del cultivo, prolongar su duración y mantener la actividad fotosintética, aumentando la producción de fotoasimilados. Esto permitió que en los tratamientos en los

que se aplicó el Frac. DN 3 se logró alcanzar un PG mayor a 300 g, asegurando un aumento en rendimiento superior a 2000 kg ha⁻¹.

En segundo lugar, se puede observar la ausencia de diferencias en el PG para los diferentes niveles de fraccionamiento de la dosis de N bajo condiciones de secano. En la Figura 7, se aprecia que durante el llenado de granos los tratamientos bajo condiciones de secano sufrieron deficiencias hídricas durante este periodo, presentando valores de disponibilidades hídricas inferiores a 20 % AD. En simultáneo a lo anterior, en la Figura 5 se puede observar una diferencia en la ET del secano en comparación a la ET del regado durante el llenado de granos de 110 mm, reafirmando las deficiencias hídricas ocurridas en el cultivo durante este periodo. Esto explica, como ya se indicó la falta de respuesta en PG a los diferentes niveles de fraccionamiento de la dosis de N bajo secano.

Por lo tanto, en condiciones de secano la respuesta al fraccionamiento es dependiente del volumen y momento de ocurrencia de las PP. En este trabajo, las PP no permitieron cubrir los requerimientos hídricos del cultivo, por lo tanto el rendimiento se encontró limitado por la disponibilidad de agua, dejando sin efecto al fraccionamiento. Pero se interpreta que en situaciones en las que el volumen y el momento de ocurrencia de las PP permitan satisfacer la demanda hídrica del cultivo y el N sea una limitante del rendimiento, el fraccionamiento de las dosis de N provocaría incremento en rendimiento. En cambio, en condiciones de riego, la disponibilidad de N es una limitante de importancia y por tanto, es más relevante el fraccionamiento de las dosis. Esto se debe a que en condiciones de riego podemos controlar el agua que

aplicamos a través de la lámina de riego, pero no podemos controlar el volumen y el momento de ocurrencia de las PP. Las cuales provocan habitualmente excesos de agua en el suelo que sumado a las condiciones de altas temperaturas y demandas atmosféricas elevadas en verano pueden provocar incrementos en las pérdidas de N, generando una menor disponibilidad para el cultivo. Por lo tanto, es favorable la implementación de una práctica como el fraccionamiento que permita acompañar con la fertilización el consumo de N y los requerimientos del cultivo a lo largo de su ciclo, de tal forma que se incremente la eficiencia de absorción y se minimicen las pérdidas de N.

4.3.1. Subcomponentes numéricos del rendimiento

En el Cuadro 4, se presentan los sub-componentes numéricos del rendimiento de maíz, para los tres niveles de fraccionamiento evaluados, en condiciones de riego y secano.

Cuadro 4. Sub-componentes del rendimiento: número de espigas por planta (NEP), número de hileras por espiga (NH ESP.), número de granos por hilera (NGH) y número de granos por espiga (NG ESP.), para los distintos tratamientos.

Sub-componentes numéricos del rendimiento					
Tratamientos		NEP	NH Esp.	NGH	NG Esp.
Riego	Frac.DN 1	1	16	29	491
	Frac.DN 2	1	16	27	445
	Frac.DN 3	1	16	29	467
Secano	Frac.DN 1	1	17	27	418
	Frac.DN 2	1	17	27	438
	Frac.DN 3	1	16	27	408

NEP: Número de espigas por planta. NH Esp.: Número de hileras por espiga.

NGH: Número de granos por hilera. NG Esp: Número de granos por espiga.

Frac.DN 1: Fraccionamiento de la dosis de N en 2 momentos.

Frac.DN 2: Fraccionamiento de la dosis de N en 5 momentos.

Frac.DN 3: Fraccionamiento de la dosis de N en 8 momentos.

Las letras diferentes en cada condición hídrica presentan diferencias significativas (p -valor < 0,05).

La ausencia de diferencias en el número de espigas por planta (NEP) era esperable debido a que comienzan a desarrollarse temprano en el ciclo del cultivo, aproximadamente entre V7 y V9, a partir de las yemas axilares de la quinta y séptima hoja por debajo de la panoja (Cárcova et al., 2003). La ausencia de deficiencias hídricas tanto en condiciones de riego y secano durante este periodo sumando a una fertilización nitrogenada temprana en el ciclo del maíz, permite alcanzar el mayor número de espigas. Esto se debe a que al satisfacer las necesidades de N el cultivo maximiza la tasa de

crecimiento y se mantiene la partición de MS hacia las espigas (Uhart y Andrade, 1995b).

En relación al número de hileras por espiga (NH ESP.), no se detectaron diferencias, esto era predecible, ya que se trata de una característica que se determina durante la etapa vegetativa, alrededor de V9. Esto sucede, porque todos los tratamientos tanto en condiciones de riego y secano no presentaron deficiencias hídricas durante esta etapa sumando a que presentaron una fertilización en el estado V6 lo que permite satisfacer los requerimientos crecientes de N del cultivo (García y Espinosa, 2009). Por lo tanto, el número de granos por hilera (NGH) en los distintos tratamientos será el sub-componente del rendimiento principal en determinar el número de granos por espiga (NG Esp) y este es el principal determinante del NG. En el caso del NGH y el NG Esp en condiciones de riego, la ausencia de diferencias en estos subcomponentes queda fundamentada, al igual que el NG, en que los diferentes niveles de fraccionamiento los que permitieron satisfacer las necesidades de N hasta el final del PC evitando caídas en la TCP y permitiendo maximizar el NG. Mientras que en condiciones de secano, la ausencia de diferencias en NGH y el NG Esp, se debió a que se encontraron limitados por la disponibilidad de agua, lo que dejaría sin efecto al fraccionamiento el cual actúa sobre la disponibilidad de N.

4.3.2. Relación entre el rendimiento y componentes principales

En la Figura 9, se observa la relación entre el rendimiento y el NG, para los tres niveles de fraccionamiento bajo riego y seco.

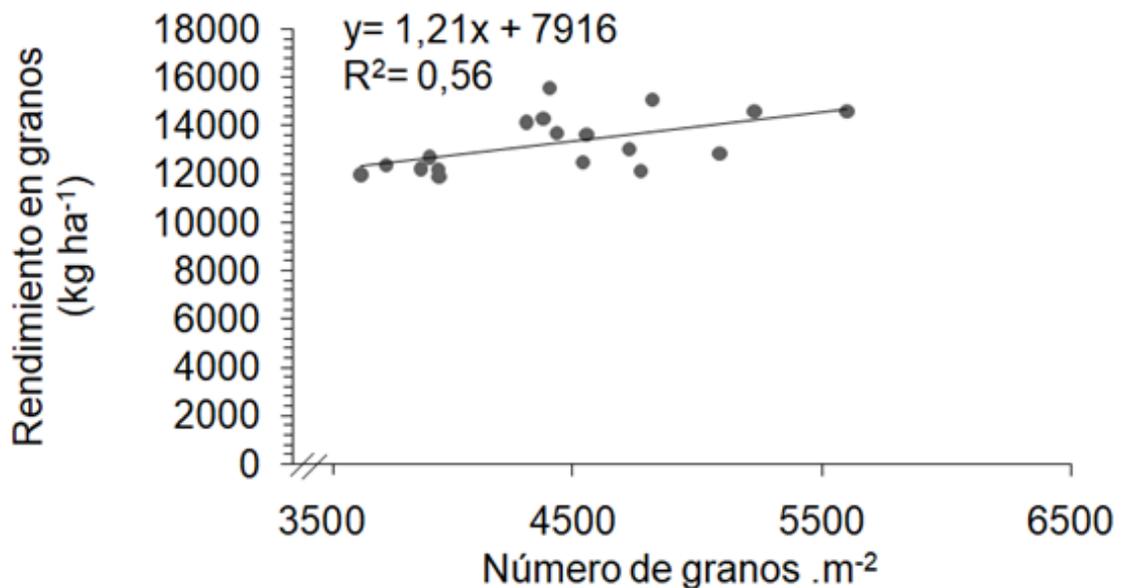


Figura 9. Relación entre el rendimiento (kg ha⁻¹) y el número de granos por metro cuadrado (NG), para los tres niveles de fraccionamiento bajo riego y seco.

La correlación analizada fue lineal y positiva, indicando que un aumento en el NG se traduce en mayores rendimientos al igual que lo reportado por Cirilo y Andrade (1994), Andrade et al. (1996) y Cárcova et al. (2003). En contradicción con estos autores se obtuvo un coeficiente de correlación con un

valor moderado de 0,56, por lo tanto, el incremento en el NG por superficie no se tradujo directamente en aumentos del rendimiento. Esto se debió a que en los tratamientos bajo condiciones de secano el NG y el rendimiento se encontraron limitando por la falta de agua. Mientras que los tratamientos bajo condiciones de riego, los recursos fueron suficientes para alcanzar el máximo NG, pero de igual manera se encontraron diferencias en rendimiento.

En la Figura 10, se muestra la relación entre el rendimiento y el PG para los diferentes niveles de fraccionamiento de la dosis de N en condiciones riego y secano.

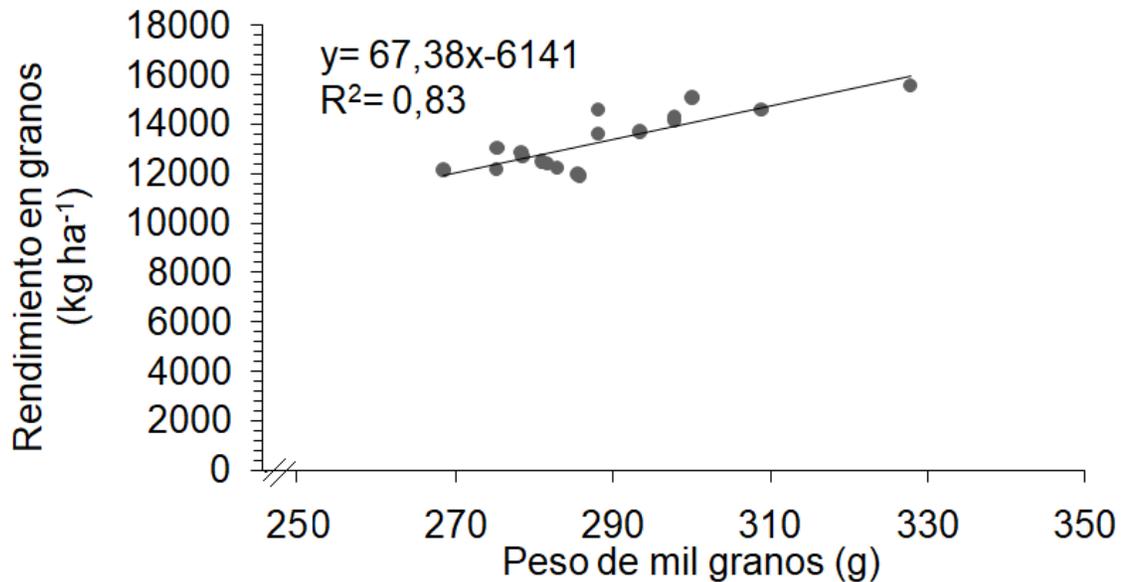


Figura 10. Relación entre el rendimiento (kg ha⁻¹) y el peso de mil granos (PG), para los tres niveles de fraccionamiento bajo riego y secano.

En la Figura 10, se evidencia una clara relación entre el PG y el rendimiento. El coeficiente de correlación de 0,83 muestra que incrementos en el PG generaron aumentos en el rendimiento de maíz, siendo en este caso la principal determinante del rendimiento. Esto se debe, a que en condiciones de secano el NG, el PG y el rendimiento se encontraron limitados por la falta de agua. En cambio, bajo condiciones de riego si se encontraron diferencias en rendimientos a causa de las diferencias analizadas en el PG. Esto se debe, a que una vez que logró el NG máximo el rendimiento pasa a depender del PG, el cual dependerá principalmente de la disponibilidad de recursos durante el llenado de granos. En concordancia, Borrás et al. (2004), exponen que el maíz muestra una reducción drástica del PG frente a una reducción de la disponibilidad de asimilados durante el llenado de granos. En igual forma Dreccer et al. (2003), detallan que durante la fase de llenado efectivo de granos el principal efecto de la disponibilidad de N ocurre a través de su influencia sobre la producción de fotoasimilados. Mientras que Hisse et al. (2019) y Mayer et al. (2012) describen que para aumentar el PG se debe aumentar la tasa de crecimiento del cultivo durante el llenado de granos. Esto explica porque en aquellos tratamientos bajo riego y con un nivel de fraccionamiento elevado como en Frac.DN3 se alcanzó los PG mayores que permitieron lograr rendimientos más altos, ya que en estas condiciones es posible maximizar la producción de fotoasimilados y la tasa de crecimiento del cultivo durante el llenado de granos.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el riego y el fraccionamiento de la dosis de N presentaron una clara interacción. Donde en condiciones de riego al implementar el mayor de los fraccionamientos se obtienen incrementos significativos en rendimiento.

En condiciones de riego, el maíz presentó aumentos significativos en el rendimiento en respuesta al fraccionamiento de la dosis de N. Por lo tanto, se acepta la hipótesis biológica de que el fraccionamiento de las dosis de N provoca incrementos significativos del rendimiento en condiciones de riego.

El fraccionamiento del N no presentó efectos sobre el NG, dejando en evidencia que en condiciones de riego una estrategia de fertilización que consiste en la aplicación de N en los estadios V2 y V6 permitió satisfacer las necesidades de N por parte del cultivo hasta el final del PC, logrando alcanzar el mayor NG sin la necesidad de otro momento de fertilización, siempre que se utilicen dosis que permitan cubrir los requerimientos del cultivo.

El aumento del rendimiento en condiciones de riego provocado con el mayor fraccionamiento de la dosis de N evaluada fue consecuencia del aumento en el PG que presentó el maíz. Se demostró, la necesidad bajo riego de la implementación del fraccionamiento del N para permitir acompañar los requerimientos del cultivo a lo largo de su ciclo. De esta forma, se consiguió cubrir los requerimientos de N durante el llenado de granos y lograr incrementos en el PG.

En este trabajo, el componente que afectó en mayor medida el rendimiento fue el PG. Por tanto, se demostró que en situaciones en las que el cultivo posee la disponibilidad hídrica suficiente para definir el NG máximo, las diferencias en rendimiento dependen de la disponibilidad de recursos durante la etapa de llenado granos en las que se define mayoritariamente el PG. En consecuencia, el fraccionamiento del N permitió cubrir los requerimientos del nutriente hasta el final del ciclo.

Los resultados obtenidos en condiciones de secano muestran que el fraccionamiento de la dosis de N no presentó efectos sobre el rendimiento. Este comportamiento conduce al rechazo de la hipótesis biológica de que el fraccionamiento de las dosis de N provoca incrementos significativos del rendimiento en condiciones de secano.

En condiciones de secano, el fraccionamiento no mostró efectos sobre el NG, ni sobre el PG. En condiciones en que las PP no permiten satisfacer la demanda hídrica del cultivo durante el PC y el llenado de granos los principales componentes del rendimiento se ven limitados por la falta de agua, dejando sin efecto al fraccionamiento el cual actúa solo sobre la disponibilidad de N.

Por lo tanto, en secano, la respuesta en rendimiento al fraccionamiento es dependiente del volumen y el momento de ocurrencia de las PP. Para conocer la respuesta al fraccionamiento en condiciones de PP diferentes a las del presente trabajo, se deberá continuar generando información en condiciones de déficit de agua controlada.

6. RESUMEN

Este experimento busca generar información sobre estrategias de fertilización con nitrógeno (N) en maíz regado. El experimento se realizó en la estación experimental “Dr. M. A. Cassinoni” en Paysandú, Uruguay, en la primavera-verano 2019-2020. Se evaluó el efecto de cuatro niveles de fraccionamiento de la dosis de N, bajo condiciones hídricas de riego y seco. Dicho experimento consistió en seis tratamientos: T1: 150 kg N ha⁻¹ fraccionados 41kg N ha⁻¹ en dos hojas (V2) y 109 kg N ha⁻¹ en seis hojas (V6) bajo riego, T2: 150kg N ha⁻¹ fraccionados 21 kg N ha⁻¹ en V2 y cuatro aplicaciones de 33kg N ha⁻¹ entre V6 y panojamiento (VT) bajo riego, T3: 150kg N ha⁻¹ fraccionados en 21 kg N ha⁻¹ en V2 y siete aplicaciones de 19 kg N ha⁻¹ entre entre V6 y panojamiento (VT) bajo riego, T4: 150 kg N ha⁻¹ fraccionados 41kg N ha⁻¹ en dos hojas (V2) y 109 kg N ha⁻¹ en seis hojas (V6) bajo condición de seco, T5: 150kg N ha⁻¹ fraccionados 21 kg N ha⁻¹ en V2 y cuatro aplicaciones 33kg N ha⁻¹ entre V6 y panojamiento (VT) bajo condición de seco, T6: 150kg N ha⁻¹ fraccionados en 21 kg N ha⁻¹ en V2 y siete aplicaciones 19 kg N ha⁻¹ entre V6 y panojamiento (VT) bajo condición de seco. El arreglo factorial utilizado fue parcelas divididas, con tres bloques donde la parcela mayor fue la disponibilidad hídrica y la menos el fraccionamiento de N. Al realizar el análisis estadístico se encontró una interacción entre el fraccionamiento de la dosis de N y la disponibilidad hídrica para el rendimiento. Donde en condiciones de riego se encontraron diferencias significativas en rendimiento para los diferentes niveles de fraccionamiento, habiendo obtenido un rendimiento mayor donde se aplicó el T4. EL fraccionamiento tuvo efecto sobre el PG, lo cual explica las diferencias en rendimiento a favor del T4. Con respecto al NG no se detectaron diferencias

significativas entre los diferentes niveles de fraccionamiento. El PG fue el componente con mayor correlación con el rendimiento ($R^2:0,83$), siendo el efecto del NG menos importante ($R^2: 0,56$). Los resultados indican que en condiciones riego el fraccionamiento de la dosis de N permite satisfacer las necesidades de N durante el llenado de grano lo que permite un aumento en el PG, el cual significa un aumento en el rendimiento en granos.

Palabras clave: Maíz; Nitrógeno; Fraccionamiento; Riego.

7. SUMMARY

This experiment seeks to generate information on fertilization strategies with nitrogen (N) in irrigated maize. The experiment was carried out in the experimental station "De. L. A. Cassinoni" in Paysandú, Uruguay, in the spring-summer 2019-2020. The effect of four levels of fractionation of the N dose was evaluated, under irrigation and rainfed conditions. This experiment consisted of six treatments: T1: 150 kg N ha⁻¹ fractionated 41 kg N ha⁻¹ in two leaves (V2) and 109 kg N ha⁻¹ in six leaves (V6) under irrigation, T2: 150 kg N ha⁻¹ fractionated 21 kg N ha⁻¹ in V2 and four applications of 33 kg N ha⁻¹ between V6 and tasseling (VT) under irrigation, T3: 150 kg N ha⁻¹ divided into 21 kg N ha⁻¹ in V2 and seven applications of 19 kg N ha⁻¹ between V6 and tasseling (VT) under irrigation, T4: 150 kg N ha⁻¹ fractionated 41 kg N ha⁻¹ in two leaves (V2) and 109 kg N ha⁻¹ in six leaves (V6) under rainfed conditions, T5: 150 kg N ha⁻¹ fractionated 21 kg N ha⁻¹ in V2 and four applications 33 kg N ha⁻¹ between V6 and tasseling (VT) under rainfed conditions, T6: 150 kg N ha⁻¹ divided into 21 kg N ha⁻¹ in V2 and seven applications 19 kg N ha⁻¹ between V6 and tasseling (VT) under rainfed conditions. The factorial arrangement used was divided plots, with three blocks where the largest plot was the water availability and the least was the fractionation of N. When performing the statistical analysis, an interaction was found between the fractionation of the N dose and the water availability for the yield. Where under irrigation conditions significant differences in yield were found for the different levels of fractionation, having obtained a higher yield where T4 was applied. Fractionation had an effect on PG, which explains the differences in performance in favor of the T4. Regarding the NG, no significant differences were detected between the different levels of fractionation. The PG

by surface was the component that had more correlation with the yield (R^2 : 0,83), the effect of NG being the least important (R^2 : 0,56). The results indicate that under irrigation conditions or abundant PP, the fractionation of the N dose allows satisfying the needs of N during grain filling, which allows an increase in the PG, which means an increase in grain yield.

Keywords: Corn; Nitrogen; Fractionation; Irrigation.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Abebe, Z.; Feyisa, H. 2017. Effects of nitrogen rates and time of application on yield of maize: rainfall variability influenced time of N application. (en línea). International Journal of Agronomy. 2017:1545280. Consultado 3 ene. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1155/2017/1545280>.
2. 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. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 58 p.
3. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. 298 p. (Estudio FAO Riego y drenaje no. 56).
4. Altamirano, A.; Da Silva, H.; Duran, A.; Echeverría, A.; Panario, D.; Puentes, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo, MAP. DSF. v.1, 96 p.
5. Anderson, E. L.; Kamprath, E. J.; Moll, R. H.; Jackson, W. A. 1984. Effect of N fertilization on silk synchrony, ear number, and growth of semi-prolific maize genotypes. Crop Science. 24(4): 663 – 666.

6. Andrade, F. H.; Cirilo, A.; Uhart, S.; Otegui, M. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Buenos Aires, La Barrosa. 292 p.
7. _____.; Sadras, V. O. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Médica Panamericana. pp. 173 – 206.
8. _____.; Vega, C.; Uhart, S. A.; Cirilo, A. G.; Cantarero, M. G.; Valentinuz, O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science*. 39(2): 453 – 459.
9. _____.; Aguirrezábal, L. A. N.; Rizzalli, R. H. 2000a. Crecimiento y rendimiento comparados. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Médica Panamericana. pp. 61 – 96.
10. _____.; Echeverría, H. E.; Gonzáles, N. S.; Gonzáles, S. A. 2000b. Requerimientos de nutrientes minerales. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Médica Panamericana. pp. 207 – 232.
11. Aparicio, V.; Costa, J. L.; Zamora, M. 2008. Nitrate leaching assessment in a long-term experiment under supplementary irrigation in humid Argentina. *Agricultural Water Management*. 95(12): 1361 – 1372.

12. Armand Ugon, M. D. P.; Ferrari, G. A. 2018. Respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz bajo riego. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 65 p.
13. Baethgen, W. E. 1996. El nitrógeno en los sistemas agrícola-ganaderos. (en línea). In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 9 – 22. (Serie Técnica no. 76). Consultado jun. 2021. Disponible en <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807135249.pdf>.
14. Bar-Yosef, B. 1991. Fertilization under drip irrigation. In: Palgrave, D. A. ed. Fluid fertilizer science and technology. New York, Marcel Dekker. pp. 285 – 329.
15. Barraco, M.; Scianca, C.; Lardone, A. 2011. Fertilización con nitrógeno en maíces y sorgo tardío. (en línea). In: INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, AR). Memoria anual 2010-2011. General Villegas, INTA. pp. 22 – 23. Consultado jun. 2021. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp_mt2011_barraco_fertilizacion_n_maices.pdf.
16. Beegle, D. B.; Durst, P. T. 2003. Nitrogen fertilization of corn. Pennsylvania, Pennsylvania State University. 6 p.

17. Below, F. E. 1995. Nitrogen metabolism and crop productivity. In: Pressarakili, M. ed. Handbook of plant and crop physiology. New York, Marcel Dekkar. pp. 275 – 301.
18. _____. 2004. Fisiología, nutrición y fertilización nitrogenada del maíz. *Informaciones Agronómicas*. no. 54: 3 – 9.
19. Bonelli, L. E.; Sainz, H. S.; Echeverría, E. H.; Barbieri, P. A. 2018. Fuente y momento de aplicación de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en Balcarce. *Ciencia del Suelo*. 36(1): 199 – 212.
20. Borrás, L.; Slafer, G. A.; Otegui, M. E. 2004. Seed dry weight response to source–sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Research*. 86(2-3): 131 – 146.
21. Bu, L.; Liu, J.; Zhu, L.; Luo, S.; Chen, X.; Li, S. 2014. Attainable yield achieved for plastic film-mulched maize in response to nitrogen deficit. *European Journal of Agronomy*. 55: 53 – 62.
22. Cakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*. 89(1): 1 – 16.
23. Cárcova, J.; Borrás, L.; Otegui, M. E. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y calidad en maíz. In: Satorre, E. H.; Benech, R. L.; Slafer, G. A.; De la Fuente, E.; Miralles, D. J.;

Otegui, M. A.; Savin, R. eds. Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, UBA. pp. 133 – 163.

24. Cardoso, D. M.; Soratto, R. P.; Da Silva, A. H.; De Mendonça, C. G. 2011. Fontes e parcelamento do nitrogênio em cobertura, na cultura do milho sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. 6(1): 23 – 28.
25. Casanova, O.; Barbazán, M. 2008. Fertilizantes. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.
26. Castaño, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J.; Aunchayna, R.; Bidegain, M. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Montevideo, INIA. 34 p. (Serie Técnica no. 193).
27. Cazabán, M.; Rubio, D. N. 2014. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 84 p.
28. Chaudhary, R.; Singh, D.; Nepalia, V. 2013. Productivity and economics of quality protein maize (*Zea mays*) as influenced by nitrogen levels, its scheduling and sulphur application. *Indian Journal of Agronomy*. 58(3): 340 – 343.

29. Chauhdary, J. N.; Bakhsh, A.; Engel, B. A.; Ragab, R. 2019. Improving corn production by adopting efficient fertigation practices: experimental and modeling approach. *Agricultural Water Management*. 211: 449 – 461.
30. Chura, J.; Mendoza-Cortez, J. W.; de la Cruz, J. C. 2019. Doses and splitting of nitrogen in two sowing densities of the Flint yellow maize hybrid. *Scientia Agropecuaria*. 10(2): 241 – 248.
31. Ceriani, M.; Innella, J. A. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y seco. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 66 p.
32. Ciampitti, I. A.; Boxler, M.; García, F. O. 2010. Nutrición de maíz: requerimientos y absorción de nutrientes. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 48: 14 – 18.
33. _____; Vyn, T. J. 2011. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Research*. 121(1):2 – 8.
34. Cirilo, A. G.; Andrade, F. H. 1994. Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Science*. 34(4): 1044 – 1046.
35. Cordi, M.; Uhart, S.; Echeverría, H.; Sainz Rozas, H. 1997. Efecto de la disponibilidad de nitrógeno sobre la tasa y duración del llenado de

granos en maíz. In: Congreso Nacional de Maíz y Reunión Suramericana de Maiceros (6°, 1997, Balcarce, Argentina). Trabajos presentados. Balcarce, Argentina, INTA. p. 7.

36. Corsi, W. C. 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. (en línea). Colonia, CIAAB. (Miscelánea no. 40). 29 p. Consultado jun. 2021. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6079/1/CIAAB-Miscelanea-40-1982.pdf>.
37. Dreccer, M.; Ruiz, R. A.; Maddonni, G. A.; Satorre, E. H. 2003. Bases ecofisiológicas de la nutrición en los cultivos de grano. In: Satorre, E. H.; Benech, R. L.; Slafer, G. A.; De la Fuente, E.; Miralles, D. J.; Otegui, M. A.; Savin, R. eds. Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, UBA. pp. 479 – 497.
38. Ernst, J. M.; Beretta, A.; Barbazán, M. M.; Puppo, L. 2021. Nitrogen fertilization strategies for center-pivot irrigated maize crop. (en línea). Agrociencia Uruguay. 25(2): e412. Consultado 4 ene. 2021. Disponible en <http://agrocienciauruguay.uy/ojs/index.php/agrociencia/article/view/412/1045>.
39. Eyhéride, G. H. 2015. Bases para el manejo del cultivo de maíz. (en línea). Pergamino, INTA. 297 p. Consultado may. 2021. Disponible en

https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_bases_para_el_manejo_de_maiz_reglon_100-2_2.pdf.

40. Fan, J.; Lu, X.; Gu, S.; Guo, X. 2020. Improving nutrient and water use efficiencies using water-drip irrigation and fertilization technology in Northeast China. (en línea). *Agricultural Water Management*. 241: 106352. Consultado 3 ene. 2022. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377420308027>.
41. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 2019. Food and agricultural commodities production: world statistics. (en línea). Roma, FAO. s.p. Consultado jun. 2021. Disponible en <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
42. Fassio, A.; Carriquiry, A. I.; Tojo, C.; Romero, R. 1998. Maíz: aspectos sobre fenología. (en línea). Montevideo, INIA. 51 p. (Serie Técnica no. 101). Consultado may. 2021. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2844/1/111219240807135855.pdf>.
43. Fernández, J. A.; Ciampitti, I. A. 2018. Effect of late nitrogen applications on grain filling in corn. *Kansas Field Research*. 4(7): 12 – 18.
44. Fernández, F. G.; Nafziger, E. D.; Ebelhar, S. A.; Hoefl, R. G. 2009. Managing nitrogen. In: University of Illinois Urbana-Champaign.

Cooperative Extension Service, USA eds. Illinois agronomy handbook. Urbana, University of Illinois Urbana-Champaign. pp. 113 – 132.

45. Ferraris, G. N.; Couretot, L. A.; Toribio, M. 2009. 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*. no. 43: 19 – 23.
46. Gambín, B. L.; Borrás, L.; Otegui, M. E. 2006. Source–sink relations and kernel weight differences in maize temperate hybrids. *Field Crops Research*. 95(2-3): 316 – 326.
47. García, J. P.; Espinosa, J. 2009. Efecto del fraccionamiento de nitrógeno en la productividad y en la eficiencia agronómica de macronutrientes en maíz. *Informaciones Agronómicas*. no. 72: 1 – 5.
48. Giménez, L. 2001. Maíz. Montevideo, Facultad de Agronomía. 76 p.
49. _____. 2010. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1°, 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 19 – 28.
50. _____. 2012a. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? (en línea). In: Seminario Internacional (2°, 2012, Paysandú,

Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 33 – 41. Consultado jun. 2021. Disponible en <http://inia.uy/en/Publicaciones/Documentos%20compartidos/18429080413094411.pdf>.

51. _____. 2012b. Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)*. 16(2): 92 – 102.
52. _____. 2019. Rendimientos de maíz y soja: un desafío que provoca... La información experimental y la producción comercial. *Cangüé*. no. 42: 7 – 12.
53. _____.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 15(2): 100 – 108.
54. Guardia, G.; Cangani, M.; Andreu, G.; Sanz, A.; García, S.; Álvarez, J.; Recio, J.; Vallejo, A. 2017. Effect of inhibitors and fertigation strategies on GHG emissions, NO fluxes and yield in irrigated maize. *Field Crops Research*. 204: 135 – 145.
55. Hall, A. J.; Vilella, F.; Trapani, N.; Chimenti, C. A. 1982. The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research*. 5: 349 – 363.

56. Hammad, H. M.; Ahmad, A.; Wajid, A.; Akhter, J. 2011. Maize response to time and rate of nitrogen application. *Pakistan Journal of Botany*. 43(4): 1935 – 1942.
57. Hisse, I. R.; D'Andrea, K. E.; Otegui, M. E. 2019. Source-sink relations and kernel weight in maize inbred lines and hybrids: responses to contrasting nitrogen supply levels. *Field Crops Research*. 230: 151 – 159.
58. Hoffman, E.; Mazzilli, S. 2008. Fuentes de N alternativas a la urea: ¿en qué situaciones pueden marcar la diferencia en los cultivos de invierno en Uruguay? *Cangüé*. no. 30: 45 – 48.
59. _____; Siri, G.; Ernst, O. 1996. Posibles manejos para minimizar pérdidas de nitrógeno. *Cangüé*. no. 8: 13 – 16.
60. IPNI (International Plant Nutrition Institute, CA). 2016. Cálculo de requerimientos nutricionales. (en línea). Canadá. Consultado jun. 2021. Disponible en <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>.
61. Kafkafi, U.; Kant, S. 2005. Fertigation. In: Hillel, D. eds. *Encyclopedia of soils in the environment*. Oxford, Elsevier. v. 2, pp. 1 – 9.
62. _____; Tarchitzky, J. 2012. Fertirrigación: una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua. (en línea). París, IFA. 149 p.

Consultado jun. 2021. Disponible en https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2012_ifa_fertigation_spanish.pdf.

63. Kumar, M.; Rajput, T.; Kumar, R.; Patel, N. 2016. Water and nitrate dynamics in baby corn (*Zea mays* L.) under different fertigation frequencies and operating pressures in semi-arid region of India. *Agricultural Water Management*. 163: 263 – 274.
64. Li, H.; Mei, X.; Nangia, V.; Guo, R.; Liu, Y.; Hao, H.; Wang, J. 2021. Effects of different nitrogen fertilizers on the yield, water- and nitrogen-use efficiencies of drip-fertigated wheat and maize in the North China Plain. (en línea). *Agricultural Water Management*. 243: 106474. Consultado 4 ene. 2022. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037837741932342X>.
65. Maddonni, G. A.; Otegui, M. E.; Bonhomme, R. 1998. Grain yield components in maize: II. postsilking growth and kernel weight. *Field Crops Research*. 56(3): 257 – 264.
66. _____; Ruíz, R. A.; Vilariño, P.; García, I. 2003. Fertilización en los cultivos de grano. In: Satorre, E. H.; Benech, R. L.; Slafer, G. A.; De la Fuente, E.; Miralles, D. J.; Otegui, M. A.; Savin, R. eds. *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, UBA. pp. 499 – 557.

67. _____.; Cirilo, A. G.; Otegui, M. E. 2006. Row width and maize grain yield. *Agronomy Journal*.98(6): 1532 – 1543.
68. Mayer, L. I.; Rossini, M. A.; Maddonni, G. A. 2012. Inter-plant variation of grain yield components and kernel composition of maize crops grown under contrasting nitrogen supply. *Field Crops Research*. 125: 98 – 108.
69. Melchiori, R. J. M.; Barbagelata, P. A.; Albarenque, S. M.; Faccendini, N. 2007. Momento de aplicación y fuentes de nitrógeno en maíz. *In: Actualización técnica maíz, girasol y sorgo*. Paraná, INTA. pp. 74 – 79. (Serie de Extensión no. 44).
70. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2020. Resultados de la encuesta agrícola invierno 2020. (en línea). Montevideo, MGAP. DIEA. s.p. Consultado jun. 2021. Disponible en https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-07/comunicado_prensa_inv_2020vf_0.pdf.
71. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible de las tierras de Uruguay: segunda aproximación. (en línea). Montevideo, MGAP. 12 p. Consultado jun. 2021. Disponible en

<http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219220807174344.pdf>.

72. Muchow, R. C. 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.
73. _____.; Sinclair, T. R. 1991. Water deficit effects on maize yields modeled under current and "greenhouse" climates. *Crop Science*. 83: 1052 – 1059.
74. NeSmith, D. S.; Ritchie, J. T. 1992. Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soil water-deficit during grain-filling. *Field Crops Research*. 29(1): 23 – 35.
75. Okumura, R. S.; Mariano, D. C.; Zaccheo, P. V. C. 2011. Use of nitrogen fertilizer in corn: a review. *Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science*. 4(2): 226 – 244.
76. Otegui, M. E.; Andrade, F. H.; Suero, E. E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*. 40(2): 87 – 94.
77. Oyarzun, M. A. 2010. Respuesta productiva de un cultivo de maíz (*Zea mays* L. Var. DRACMA) a distintas dosis de nitrógeno con dos tipos

de riego (aspersión e inundación) y efectos sobre la lixiviación de nitratos. Navarra, Universidad Pública de Navarra. 100 p.

78. Paliwal, R. L.; Granados, G.; Lafitte, H. R.; Violic, A. D. 2001. El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción. (en línea). Roma, FAO. 392 p. Consultado may. 2021. Disponible en <http://www.fao.org/3/x7650s/x7650s00.htm#toc>
79. Panison, F.; Sangoi, L.; Durli, M. M.; Leolato, L. S.; Coelho, A. E.; Kuneski, H. F.; Liz, V. O. D. 2019. Timing and splitting of nitrogen side-dress fertilization of early corn hybrids for high grain yield. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 43: 1 – 13.
80. Pedrol, H. M.; Castellarín, J. M.; Ferraguti, F.; Rosso, O. 2008. Respuesta a la fertilización nitrogenada y eficiencia en el uso del agua en el cultivo de maíz según nivel hídrico. *Informaciones Agronómicas Cono Sur* no. 40: 17 – 20.
81. Perdomo, C.; Barbazán, M.; Durán Monzoni, J. M. 2008. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.
82. Peterson, G. A.; Frye, W. W. 1989. Fertilizer nitrogen management. In: Follett, R. F. ed. *Nitrogen management and ground water protection*. Amsterdam, Elsevier. pp. 183 – 219.
83. Pico, L. B. O.; Zhang, C.; Vyn, T. J. 2021. The central role of ear nitrogen uptake in maize endosperm cell and kernel weight determination

during the lag period. (en línea). Field Crops Research. 273: 108285. Consultado 4 ene. 2022. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429021002318>.

84. Quincke, A.; García Lamothe, A.; Morón, A. 2008. Manejo de la fertilización en cultivos de verano. In: Jornada INIA La Estanzuela: Cultivos de Verano (2008, Young, Río Negro). Resúmenes. Montevideo, INIA. pp. 1 – 3. (Actividades de Difusión no. 550).
85. Rajcan, I.; Tollenaar, M. 1999a. Source:sink ratio and leaf senescence in maize: I. dry matter accumulation and partitioning during grain filling. Field Crops Research. 60(3): 245 – 253.
86. Rajcan, I.; Tollenaar, M. 1999b. Source:sink ratio and leaf senescence in maize: II. Nitrogen metabolism during grain filling. Field Crops Research. 60(3): 255 – 265.
87. Reay, D.; Davidson, E.; Smith, K.; Smith, P.; Melillo, J.; Dentener, F.; Crutzen, P. 2012. Global agriculture and nitrous oxide emissions. Nature Climate Change. 2: 410 – 416.
88. Rimski-Korsakov, H.; Rubio, G.; Pino, I.; Lavado, R. S. 2008. Destino del nitrógeno del fertilizante en un cultivo de maíz. (en línea). Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 39: 1 – 5. Consultado 16 jul. 2021. Disponible en

[http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/E753B6895A8029FC8525799500775BBC/\\$FILE/1.pdf](http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/E753B6895A8029FC8525799500775BBC/$FILE/1.pdf).

89. Rinaldi, M.; Di Paolo, E. 2008. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*. 105(3): 202 – 210.
90. Ritchie, S. W.; Hanway, J. J. 1982. How a corn plant develops. Ames, Iowa State University. 24 p. (Special Report no. 48)
91. Rivelli, G. M.; Sánchez, R. A. N.; Maddonni, G. A. 2016. Impacto de un estrés térmico pre-floración sobre el peso y la calidad de los granos de maíz (*Zea mays* L.) ante cambios en la relación fuente-destino post-floración. *Agronomía y Ambiente*. 36(2): 79 – 90.
92. Salvagiotti, F.; Castellarín, J. M.; Ferraguti, F. J.; Pedrol, H. M. 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del suelo*. 29(2): 199 – 212.
93. Sawchik, J.; Mas, C.; Pérez Gomar, E.; Bermúdez, R.; Pravia, V.; Giorello, D.; Ayala, W. 2010. Riego suplementario en pasturas: antecedentes de investigación nacional. (en línea). In: Seminario Internacional (1º, 2010, Paysandú). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 141 – 153. Consultado jun. 2021. Disponible en 94

<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4514/1/Libro-1-Seminario-Internacional-de-Riego-en-Cultivos-y-Pasturas.pdf>.

94. Scharf, P. C.; Wiebold, W. J.; Lory, J. A. 2002. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. *Agronomy Journal*. 94: 435 – 441.
95. Silva, P. R. F. D.; Strieder, M. L.; Silva, R. P. D.; Rambo, L.; Sangoi, L.; Argenta, G.; Forsthofer, E. L.; Silva, A. A. D. 2005. Grain yield and kernel crude protein content increases of maize hybrids with late nitrogen side-dressing. *Scientia Agricola*. 62: 487 – 492.
96. Uhart, A. S.; Andrade, F. H. 1995a. Nitrogen deficiency in maize: I. effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. *Crop Science*. 35(5): 1376 – 1383.
97. _____.; _____. 1995b. Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source/sink ratios. *Crop Science*. 35(1): 183 – 190.
98. vanIttersum, M. K.; Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*. 52(3): 197 – 208.
99. Wang, D.; Mo, Y.; Li, G.; Wilkerson, C. J.; Hoogenboom, G. 2021. Improving maize production and decreasing nitrogen residue in soil

using mulched drip fertigation. (en línea). *Agricultural Water Management*. 251: 106871. Consultado 4 ene. 2022. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377421001360>.

100. Wu, D.; Xu, X.; Chen, Y.; Shao, H.; Sokolowski, E.; Mi, G. 2019. Effect of different drip fertigation methods on maize yield, nutrient and water productivity in two-soils in Northeast China. *Agricultural Water Management*. 213: 200 – 211.
101. Zhang, X.; Meng, F.; Li, H.; Wang, L.; Wu, S.; Xiao, G.; Wu, W. 2019. Optimized fertigation maintains high yield and mitigates N₂O and NO emissions in an intensified wheat–maize cropping system. *Agricultural Water Management*. 211: 26 – 36.