

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO RESIDUAL DEL ANTECESOR TRIGO O CANOLA SOBRE EL  
RENDIMIENTO DE MAÍZ DE SEGUNDA**

**por**

**Camila FERRANDO BAUER  
Cecilia PATTARINO ETCHEVERRIGARAY  
Luciana REY AROCENA**

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

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2017**

Tesis aprobada por:

Director:

-----  
Ing. Agr. Oswaldo Ernst

-----  
Ing. Agr. Guillermo Siri Prieto

-----  
Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Fecha:

5 de setiembre de 2017

Autores:

-----  
Camila Ferrando Bauer

-----  
Cecilia Pattarino Etcheverrigaray

-----  
Luciana Rey Arocena

## AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, amigos, profesores y funcionarios de facultad que hicieron posible la realización de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
2.1 ROTACIONES.....	3
2.1.1 <u>Consecuencias de la rotación y la siembra directa sobre las propiedades edáficas</u> .....	4
2.1.2 <u>Consecuencias de la presencia de rastrojo sobre superficie en el crecimiento de los cultivos</u> .....	9
2.2 EFECTO RESIDUAL DEL CULTIVO ANTECESOR.....	10
2.2.1 <u>Trigo</u> .....	11
2.2.2 <u>Canola</u> .....	12
2.3 FACTORES CLIMÁTICOS A LOS QUE SE ENFRENTA EL MAÍZ COMO CULTIVO DE SEGUNDA.....	14
2.3.1 <u>Temperatura y radiación</u> .....	14
2.3.2 <u>Régimen hídrico</u> .....	16
2.3.3 <u>Humedad</u> .....	18
2.3.4 <u>Nutrientes del suelo</u> .....	18
2.3.5 <u>Requerimientos nutritivos</u> .....	19
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	23
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	23

3.1.1 <u>Localización espacial</u> .....	23
3.1.2 <u>Descripción del experimento</u> .....	23
3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	24
3.2.1 <u>Determinaciones realizadas</u> .....	24
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	27
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO.....	27
4.1.1 <u>Precipitaciones</u> .....	27
4.1.2 <u>Temperatura</u> .....	28
4.1.3 <u>Radiación solar</u> .....	28
4.2 DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES Y CONDICIÓN FÍSICA DEL SUELO A LA SIEMBRA .....	29
4.3 EFECTO SOBRE IMPLANTACIÓN, CRECIMIENTO Y NUTRICIÓN DEL CULTIVO.....	32
4.3.1 <u>Implantación y fenología a los 14 días pos siembra</u> .....	32
4.3.2 <u>Respuestas del cultivo a los 37 días pos siembra</u> .....	34
4.4 EFECTO SOBRE RENDIMIENTO Y COMPONENTES .....	38
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	41
6. <u>RESUMEN</u> .....	42
7. <u>SUMMARY</u> .....	43
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	44

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Fósforo (P), potasio (K) y nitrógeno (N-NO <sub>3</sub> ) disponibles en suelo a la siembra de maíz de segunda en los primeros 20 cm de suelo.....	29
2. Resistencia a la penetración (HPa) a la siembra de maíz de segunda promedio de la capa 0-40 cm, 0-10 cm y 10-20 cm de suelo. ....	31
3. Implantación (número de plantas por hectárea) y fenología a los 14 días pos siembra. ....	32
4. Efectos a 37 días pos siembra sobre biomasa, altura, y fenología.....	35
5. Efectos a 37 días pos siembra sobre color, SPAD, concentración y cantidad absorbida de nitrógeno y potasio en el cultivo de maíz en V <sub>4</sub> ....	36
6. Rendimiento según cultivo antecesor.....	39
Figura No.	
1. Calibración de muestras extraídas el 22 de febrero. ....	26
2. Precipitaciones (mm), radiación solar (MJ/m <sup>2</sup> ) y temperatura media (°C) ocurridas durante el crecimiento del cultivo. ....	27
3. Regresión lineal entre rendimiento de maíz según el rastrojo sobre el cual fue sembrado (trigo o canola) y la población. ....	39

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el sistema agrícola del litoral oeste de Uruguay se ha intensificado. Este proceso se produjo a raíz de la implementación de sistemas de agricultura continua sin laboreo. Como consecuencia, la superficie afectada a la producción de cultivos anuales alcanzó 1558 mil ha en el año 2013-2014.

Este aumento en la superficie se ha dado principalmente a partir del aumento del cultivo de soja, reconocido como el principal cultivo de verano ocupando 1140 mil ha. La superficie sembrada con maíz aumentó entre el 2010 y 2013, alcanzando un área sembrada de 131,1 mil ha y disminuyó a 83 mil ha en los años siguientes. A pesar de esta disminución, el maíz ha demostrado un aumento en su rendimiento promediando en los últimos cinco años los 5816 kg ha<sup>-1</sup> (MGAP. DIEA, 2017).

Este proceso que generó una alta proporción del cultivo de soja en la rotación, una baja relación cultivos de invierno / cultivos de verano y, una menor intensificación en el uso del suelo, ha generado la pérdida de calidad del suelo, afectando negativamente su fertilidad y comprometiendo el rendimiento de los cultivos anuales. Considerando esta situación, es necesario introducir una dimensión ambiental a la actividad para que sea sostenible. Esto implica mantener o aumentar la producción en actividades económicamente viables y socialmente aceptables, reduciendo el nivel de riesgo y protegiendo el potencial de los recursos naturales (Dumanski y Smyth, citados por Hill, 2008).

La incorporación de la canola en la rotación, es una alternativa que permite cortar el ciclo de las enfermedades de cereales de invierno favorecidas por el monocultivo de trigo o la siembra de trigo sobre cebada, ya que comparten enfermedades. A su vez, incorporar un cultivo no gramíneo como la canola permite disminuir las malezas invernales gramíneas en la rotación. Mazzilli et al. (2016) analizaron una base de datos de 1292 campos de trigo recopilados durante cuatro temporadas consecutivas (de 2008 a 2011), de los cuales 214 (17%) fueron sembrados con trigo el invierno anterior. En Uruguay es una práctica frecuente que conduce a una alta presión de inóculo de patógenos necrotróficos garantizando la inoculación de la enfermedad.

El área de cultivos de invierno en los últimos 10 años se multiplicó por tres, superando las 0,5 ha de cultivo de invierno por cada ha sembrada con cultivos de verano. Esto lleva a que el componente cultivos de segunda, sea elevado, aunque variable entre años (Hoffman, 2012). En particular para el cultivo de maíz, la relación del área de maíz de 1era./ maíz de 2da. fue 65/35, 63/37, 76/24 y 69/31 %, para las zafas 2013-14, 2014-15, 2015-16, 2016-17

respectivamente. Esta situación de elevada intensidad lleva a que el factor intensidad oscile entorno a 1,4 cultivos por ha agrícola por año (MGAP. DIEA, 2014, 2015, 2016, 2017).

La siembra de segunda atrasa la fecha de siembra, lo que confunde el efecto antecesor con el efecto fecha de siembra. Siembras tardías provocan disminuciones tanto en número como en peso de granos y, consecuentemente, en el rendimiento. A pesar de esto, el cultivo de canola admite una fecha de cosecha más temprana que el trigo, generando un rastrojo de mejor calidad para la siembra de maíz siguiente y un menor efecto residual.

El objetivo de este trabajo es evaluar los efectos residuales de dos cultivos de invierno antecesores (trigo y canola) sobre el maíz con diferentes historias de chacra cuando el efecto fecha de cosecha del cultivo de invierno/fecha de siembra de maíz no opera sobre el rendimiento del cultivo de maíz.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ROTACIONES

A fines de la década del 90 nuestro país comienza un proceso de sustitución de las prácticas de laboreo por la siembra directa, la cual logra consolidarse a mitad de la primera década del siglo XXI (Ernst y Siri Prieto, 2013). La importancia adquirida por la soja y los precios convenientes de la misma, trajeron consigo importantes cambios en la producción rural (Arbeletche et al., 2010), sustituyéndose el tradicional modelo de rotación con pasturas de objetivo ganadero, para introducirse en un período de agricultura continua (MGAP. DIEA, 2013).

El sistema de agricultura continua, en la mayor parte de la superficie integrado por un solo cultivo por año (en su mayoría soja), generó consecuencias negativas en los sistemas de producción, principalmente como consecuencia del alto riesgo de erosión.

En sistemas agrícolas dominados por monocultivo, se genera un período de barbecho pos cosecha en el cual el suelo tiende a encontrarse descubierto de los residuos necesarios para controlar la erosión. La incidencia solar directa sobre la superficie terrestre produce un incremento de la evaporación de agua del suelo, generando una salida improductiva de agua del sistema. El suelo desnudo genera una situación más propensa a la colonización de malezas, plagas y enfermedades y un importante aumento de la erosión del suelo por mayor escurrimiento del agua (Currie y Klocke, 2005).

La implementación de la siembra directa, busca solucionar los problemas anteriormente mencionados evitando en primer lugar que el suelo permanezca desnudo. Esta práctica busca aumentar la retención de humedad, promoviendo la infiltración de agua en el suelo y mejorando la eficiencia de uso de la misma por los cultivos de verano en períodos críticos (floración y llenado de grano). Otro objetivo es aumentar las reservas de carbono orgánico y nitrógeno en el sitio. De esta manera los cultivos de verano utilizan el agua que fue almacenada en los meses de invierno, lo que provoca a su vez, un efecto positivo en el manejo de nutrientes en esta época (Currie y Klocke, 2005).

En las condiciones agroecológicas de Uruguay es posible implementar la siembra de dos cultivos por año, esta práctica genera un aumento en la eficiencia de uso del agua que se encuentra en el suelo del cultivo subsiguiente, provocando un aumento en los kg de grano cosechado (Currie y Klocke, 2005).

En muchos países la incorporación de la siembra directa se ha visto rechazada debido a que el rendimiento obtenido en estos sistemas mostraba ser inferior al obtenido en sistemas de laboreo convencional. Estas pérdidas de rendimiento han sido eliminadas con la incorporación de otros cultivos de granos pequeños en la rotación, y en algunos casos han generado un aumento de los mismos.

En conclusión, llevar a cabo la práctica de siembra directa, utilizar cultivos de cobertura en la rotación y mantener el suelo cubierto todo el año, colaboran en el control de la erosión, ayudan a reducir la lixiviación de nutrientes y permiten la correcta fijación de nitrógeno. A su vez, protegen las plántulas, controlan malezas y posibilitan el aumento de la reserva de agua disponible en el suelo (Unger y Vigil, 1998a).

### 2.1.1 Consecuencias de la rotación y la siembra directa sobre las propiedades edáficas

#### 2.1.1.1 Estado hídrico del suelo

La cantidad de agua disponible en el suelo es uno de los factores más influyentes en la producción y en el rendimiento de los cultivos. Suelos donde esta cantidad puede verse limitada, requieren de prácticas de conservación de agua para lograr buenos rendimientos (Smika y Unger, 1986). Evitar que el suelo permanezca desnudo utilizando cultivos de cobertura invernal y mantener el rastrojo en suelo utilizando siembra directa al sembrar el próximo cultivo, son las prácticas más eficientes para generar un aumento en el agua almacenada en suelo (Unger et al., 1988b).

Mantener el rastrojo en superficie genera una mejora en el estado hídrico del suelo, incrementando la acumulación de precipitaciones en el perfil. Este aumento en las entradas de agua al suelo está explicado por varios motivos. En primer lugar, dada la protección de la superficie del suelo generada por el rastrojo, se reduce el impacto de la gota de lluvia, manteniendo la estructura de la superficie del suelo. Por otra parte, el rastrojo representa una barrera física en contra del escurrimiento superficial favoreciendo la infiltración. En segundo lugar, esta práctica también permite reducir la evaporación del agua que ya se encuentra almacenada en el suelo (Smika y Unger, 1986).

Es posible generalizar que la presencia de una alta cantidad de residuos del cultivo antecesor en superficie, genere un aumento en la relación

infiltración-escurrimiento en relación a siembras de cultivo de primera (Sawchik y Ceretta, 2005).

La magnitud de los efectos llevados a cabo por la permanencia del rastrojo en superficie, se encuentra muy relacionada a la elección de los cultivos que van a ser sembrados en la rotación. Esto último se explica por el hecho de que la mayor o la menor cantidad de rastrojo en superficie se encuentra definida por el tipo de cultivo antecesor. La selección de las especies cultivadas en una rotación debe basarse en la probabilidad de precipitaciones y en la cantidad de agua que se encuentra almacenada y disponible en el suelo, buscando obtener siempre un buen rendimiento (Unger et al., 1998b).

El cultivo de cobertura invernal genera en el sistema consecuencias positivas, como la cobertura del suelo por rastrojo y el reciclaje de nutrientes. Y consecuencias negativas, como la deficiencia de agua y nutrientes durante el cultivo de interés por un elevado consumo de los mismos por parte del cultivo antecesor (Ernst y Siri Prieto, 2006).

El agua disponible en el suelo al momento de sembrar el cultivo de verano, se ve restringida por el consumo realizado por el cultivo de invierno anterior y la cantidad y distribución de las precipitaciones durante el último mes de su estación de crecimiento (Ernst et al., 2009). Debido a esto, los efectos beneficiosos de las prácticas mencionadas, solo se efectúan en situaciones donde las precipitaciones son adecuadas, oportunas y generan una correcta infiltración.

Las precipitaciones son las responsables de reponer la cantidad de agua en el suelo suministrada a los cultivos de cobertura, lográndose evitar que los cultivos siguientes sufran estrés por falta de agua disponible en suelo (Unger y Vigil, 1998a). Las lluvias que recargan el suelo, son aquellas posteriores a la madurez fisiológica del cultivo invernal, las cuales, si no se producen, generan que el suelo solo pueda ofrecer como fuente de agua, el residuo hídrico del cultivo anterior (Ernst, 1998).

Esto último significa que aquellas prácticas que permitan mantener el suelo siempre cubierto, como lo es la producción de dos cultivos por año, solo serán adecuadas en zonas húmedas o semi húmedas, pero no lo serán en zonas semi áridas donde el rendimiento del cultivo de interés podría verse disminuido frente a una situación de estrés por baja cantidad de agua (Unger y Vigil, 1998a).

Uruguay se encuentra dentro de la zona donde estas prácticas resultan beneficiosas, por lo que, la cantidad de agua almacenada en suelos que

permanecen todo el año cubiertos por doble cultivo y rastrojo es generalmente mayor que en suelos que permanecen libres de estos. A pesar de esto, la distribución de las precipitaciones puede generar condiciones semi áridas, en las que el efecto es negativo.

#### 2.1.1.2 Propiedades físicas del suelo

La erosión generada por el escurrimiento de las precipitaciones es considerada una de las principales pérdidas de suelo en nuestro país. Los residuos vegetales que permanecen cubriendo el suelo, protegen al mismo del golpe de las gotas de lluvia sobre la superficie evitando el encostramiento. Esto, junto a un aumento en la infiltración, también generado por la presencia de rastrojo, resulta en un mayor control del escurrimiento. El mantener cubierto el suelo por rastrojo del cultivo anterior, genera menores pérdidas de suelo por erosión (Roth et al., 1988).

Dependiendo del tipo de suelo y de su pendiente, con tan solo 30 por ciento de la superficie cubierta por rastrojo, se reducen las pérdidas por erosión en un 60 por ciento en comparación con suelos que permanecen descubiertos (Marelli, 1995). La pérdida de suelo implica pérdida de fertilidad. Esto demuestra que cualquier práctica de manejo que busque controlar la erosión, está contribuyendo en el mantenimiento de la productividad del suelo (Ernst y Siri Prieto, 2008).

La reducción de la materia orgánica, es uno de los indicios que evidencian la degradación del suelo, lo cual resulta en agregados más débiles y de menor porosidad. A su vez, esta última implica una menor tasa de infiltración de agua y el conjunto de todas concluye en una reducción del rendimiento de los cultivos a lo largo del tiempo (Wall, 1995).

La cantidad de materia orgánica en sistemas que realizan siembra directa tiende a aumentar en la superficie con el tiempo. Esto se explica porque la tasa de descomposición de la misma es menor cuando no se encuentra mezclada con el suelo como consecuencia del laboreo (Thomas, 1995).

Otra de las consecuencias generadas por los distintos manejos del suelo para la agricultura, es la compactación del mismo. Cuando el rastrojo de los cultivos antecesores permanece en superficie, genera una importante fuente de alimento disponible para los organismos benéficos del suelo. Estos organismos, como consecuencia, tienden a aumentar su población y generan numerosos canales en el suelo al moverse. De esta manera, el desarrollo de las raíces de los cultivos de verano se ve favorecido y se logra un buen control de la compactación. Las raíces de los cultivos antecesores, también generan un

efecto similar en el suelo. El hecho de no laborear genera que las raíces se desintegren más lentamente, lo cual mantiene una continuidad en los canales, favoreciendo el pasaje de agua a lo largo del perfil y el enraizamiento de los siguientes cultivos (Wall, 1995).

Las raíces que permanecen en el suelo al realizar siembra directa estabilizan los agregados del suelo al atrapar partículas o al exudar compuestos mucilaginosos, lo que genera un cambio en la resistencia a la penetración y densidad aparente del suelo (Martins et al., 2009). Al descomponerse estas raíces, dejan en el suelo canales que generan un aumento en la conductividad hidráulica del suelo como consecuencia de un aumento de la porosidad total (Huang et al., 2012).

#### 2.1.1.3 Disponibilidad de nitrógeno

La cantidad de nitrógeno que se encuentra en el suelo depende del balance del mismo nutriente. Este balance es el resultado de las ganancias menos las pérdidas de nitrógeno que sufre el suelo por diversos procesos.

Las ganancias de nitrógeno resultan de los procesos de mineralización (a partir de restos vegetales o animales) y de la nitrificación posterior. Estos se ven influenciados por varias características ambientales entre las cuales se resalta: la humedad, la temperatura del suelo, las prácticas de manejo del mismo y en el caso de la nitrificación, únicamente, la presencia de oxígeno y la concentración de  $\text{NH}_4$  (Perdomo y Barbazán, 1999).

El proceso de inmovilización representa una de las posibles pérdidas de nitrógeno disponible para las plantas. Este proceso se lleva a cabo al mismo tiempo que la mineralización (ganancia) y la ocurrencia de uno u otro depende de varios factores. Algunos de estos son: calidad del rastrojo depositado en superficie (relación C/N), cantidad del residuo y prácticas de manejo (Perdomo y Barbazán, 1999).

Según Rice y Smith, citados por Martino (1995), aquellas prácticas que impliquen cero laboreo generan una reducción en la mineralización de la materia orgánica del suelo, junto a la cual, se ve incrementada la inmovilización del nitrógeno en la biomasa bacteriana. Esto justifica que en un principio, la disponibilidad de nitrógeno y fósforo sea menor en comparación a sistemas donde se practica laboreo (Dowdell et al., 1983). A pesar de esto, los niveles de nitrógeno en siembra directa aumentan constantemente en el tiempo como consecuencia del incremento de materia orgánica y de la actividad microbiana. Esto define, luego de ciertos años, niveles de nitrógeno en suelo superiores a los presentados en sistemas con laboreo.

Jansson y Persson, citados por Zagal et al. (2003) reconocen que la capacidad edáfica de capturar, almacenar y reciclar nutrientes depende de la presencia de materia orgánica (MOS), ya que esta constituye un lugar de almacenamiento temporal de energía y nutrientes. En el momento donde la energía almacenada pasa a ser utilizada por los microorganismos, los nutrientes liberados pueden ser absorbidos por las plantas.

Otros valores de nutrientes como el fósforo y potasio, también muestran ser superiores en siembra directa que en sistemas de laboreo convencional (Grant, 1995).

Además del proceso de inmovilización, las pérdidas de nitrógeno se explican generalmente por tres procesos: lixiviación o lavado, desnitrificación y volatilización. La presencia de rastrojo y el manejo del suelo juegan un rol fundamental debido a que los factores ambientales más influyentes en estos procesos son: la temperatura, el tipo de laboreo y la humedad del suelo (Perdomo y Barbazán, 1999).

La presencia de rastrojo en superficie aumenta la probabilidad de lixiviación del nitrógeno, debido a que este aumenta la cantidad de agua que infiltra en relación con la que escurre en el suelo. La realización de siembra directa genera que el suelo incremente el porcentaje de macroporos, lo que contribuye también a aumentar la lixiviación de  $\text{NO}_3$ , en relación con sistemas donde se realiza laboreo convencional (Perdomo y Barbazán, 1999).

A pesar de favorecer este tipo de pérdida, la producción agrícola en el Uruguay sigue optando por la realización de esta práctica, ya que el objetivo principal es mejorar la calidad del suelo y de esta forma, poder sustentar la fertilidad y la productividad.

Como se menciona en el subcapítulo anterior, la erosión edáfica implica una pérdida de fertilidad. Si estas pérdidas no presentaran un origen erosivo, las mismas desacelerarían con el paso del tiempo al ir quedando únicamente en el suelo las fracciones de materia orgánica más estable. A diferencia de esto, la realidad demuestra que, tanto las disminuciones de materia orgánica como de nitrógeno total, se muestran altas y constantes en sistemas de labranza convencional a través del tiempo. Por esta razón se evidencia el importante rol del proceso de erosión en la pérdida de nitrógeno total. Esta, no solo produce la pérdida del horizonte superficial más rico en nitrógeno y materia orgánica, sino que también, deteriora la condición física del suelo y su productividad, generando que la materia orgánica agregada por los cultivos posteriores sea cada vez menor (Díaz Roselló, 1992).

Los resultados publicados por Díaz Roselló (1992) sobre un experimento de larga duración iniciado en el año 1963, indican que sistemas arables de agricultura presentan pérdidas del 27% del contenido original del nitrógeno total, aumentando a un 36% en aquellos sistemas que no fueron fertilizados.

Otro experimento publicado por Ernst y Siri Prieto (2008) sobre el efecto medio del laboreo o no del suelo y efecto medio de la agricultura con o sin rotación con pasturas, demuestra que, a los nueve años de iniciado el experimento, el suelo presentó un 10% más de carbono orgánico, 10% más de nitrógeno total y 12% más de carbono total en los sistemas sin laboreo con respecto al laboreo convencional.

En sistemas de siembra directa, la siembra de un cultivo invernal permite una mejor cobertura del suelo, lo cual resulta en un mejor control de erosión. Por otro lado, la aplicación tardía del herbicida a este cultivo, puede resultar perjudicial para el cultivo de verano siguiente, el cual debe enfrentar una situación de menor disponibilidad de  $N-NO_3$  a la siembra, a diferencia de un suelo con barbecho invernal. La utilización de un cultivo de cobertura no leguminosa puede acentuar esta situación, trasladando esta deficiencia de nitrógeno a estadios más avanzados como  $V_6$  en maíz. Este efecto puede presentar la necesidad de estrategias de fertilización nitrogenada diferenciales (Ernst y Siri Prieto, 2008).

### 2.1.2 Consecuencias de la presencia de rastrojo sobre superficie en el crecimiento de los cultivos

La permanencia de rastrojo sobre el suelo no solo contribuye a mejorar las condiciones del mismo, sino que, además, genera en este menor temperatura y mayor humedad. Estas condiciones pueden reducir la absorción temprana de nutrientes y, por lo tanto, enlentecer el crecimiento vegetal inicial (Bermúdez, 1999).

Una baja temperatura del suelo reduce la división celular del ápice meristemático durante el período en que este se encuentra bajo tierra. Las bajas temperaturas de suelo además de reducir el crecimiento inicial del cultivo, como puede suceder en maíz, descienden la difusión de fósforo y potasio a las raíces lo que compromete el rendimiento futuro en grano (Fortín y Pierce, 1991).

Las prácticas de siembra directa y la ausencia de laboreo traen como consecuencia la compactación del horizonte superficial del suelo. Esto a su vez, genera una resistencia mecánica en la penetración de raíces debido a una

disminución en cantidad y tamaño de la porosidad del suelo. La compactación también dificulta la infiltración y vuelve a los suelos más propensos a la deficiencia de oxígeno (Formoso, 2007). Estas consecuencias en los primeros centímetros de suelo, pueden repercutir negativamente en la implantación de las especies vegetales, así como limitar su crecimiento.

Los frecuentes excesos de humedad, la resistencia mecánica y las posibles deficiencias de nutrientes generados por la falta de laboreo en el suelo, generan un contacto deficiente entre la semilla y el mismo, impidiendo un correcto crecimiento vegetal inicial. Estos efectos negativos tienden a desaparecer con el tiempo por los procesos de acumulación de materia orgánica, descomposición de raíces y por la actividad de los microorganismos benéficos del suelo (Martino, 2001). De esta manera, la presencia de rastrojo también implica una solución frente al problema de la compactación generada por la siembra directa, aunque esto puede llevar mucho tiempo.

Para que los rendimientos de maíz obtenidos en siembra directa igualen o superen a los obtenidos utilizando prácticas de laboreo, se necesitarían entre 3 a 6 años de siembra directa continua. Si bien, la siembra directa permite aumentar y estabilizar los niveles de nitrógeno y carbono orgánico en los primeros centímetros de suelo, el mismo se comporta como fuente de nutrientes solo cuando cuenta con la cantidad suficiente para formar más materia orgánica de la que logra fijar (Galarza, 2007).

A pesar de generar un retraso en el crecimiento inicial del cultivo, la presencia de rastrojo en superficie también proporciona características benéficas al suelo, como lo son la reducción de la evaporación de agua e incremento en la infiltración de la misma. Estas dos aumentan la cantidad de agua disponible en el suelo, provocando un aumento en el rendimiento del cultivo (Hoefler et al., citados por Wicks et al., 1994)

Según Rasmussen y Collins, citados por Zagal (2003), el mejoramiento estructural que generan los residuos vegetales en el suelo, permite en el mismo un buen desarrollo radicular por un aumento en la aireación, en la retención de agua y en la porosidad.

## 2.2 EFECTO RESIDUAL DEL CULTIVO ANTECESOR

La presencia de rastrojo en sistemas de siembra directa puede provocar inhibición en el crecimiento de plántulas por medio de varios efectos residuales:

- Barreras físicas generadas por los restos vegetales, sombreado asociado a los residuos y menor temperatura de suelos que permanecen cubiertos.
- Reducción de la perturbación del suelo.
- Inmovilización de nitrógeno.
- Compuestos alelopáticos.

Cada cultivo generará efectos residuales propios, los cuales se traducirán en consecuencias diferenciales entre ellos. De esta manera se obtendrán diferentes resultados en el cultivo de segunda, dependiendo del tipo de antecesor.

### 2.2.1 Trigo

Hoefler et al. (1981), en la localidad de Nebraska, encontraron que un mes después de la siembra de maíz sobre rastrojo de trigo, la altura del maíz fue significativamente menor que en parcelas donde el rastrojo de trigo había sido removido al momento de la siembra del cultivo de verano. Este menor crecimiento puede justificarse por menores temperaturas de suelo generadas por la presencia del rastrojo. Sin embargo, el rendimiento de maíz fue significativamente mayor en aquellas parcelas en que permaneció el rastrojo de trigo. Este incremento está dado por la cobertura ofrecida por el rastrojo de trigo que genera una reducción en la evaporación e incrementos en la infiltración del agua de lluvia, generando una mayor disponibilidad de agua.

Estos aumentos en rendimiento son dependientes del año y de sus variaciones en precipitaciones y temperatura, ya que, aquellas situaciones donde las primaveras se presentan húmedas y frías generan la necesidad de atrasar la siembra de maíz y por ende provocan una disminución en el rendimiento del mismo (Gaudin et al., 2015).

El trigo como antecesor al cultivo de maíz de segunda, provoca aumentos en la eficiencia de uso del nitrógeno en comparación con sistemas que no presentan doble cultivo. Estos efectos, son atribuidos a un aumento en la disponibilidad de nitrógeno en suelo para la planta generado por la mineralización de la biomasa de raíces y del rastrojo de trigo (Gaudin et al., 2015).

De todas maneras, la disponibilidad de este nutriente, así como su consumo, dependerán del nitrógeno residual del cultivo anterior y de la calidad del rastrojo del mismo. Los residuos vegetales con baja relación C/N permitirán una mayor mineralización del nitrógeno y por lo tanto un aporte para las plantas

en crecimiento. En cambio es probable que los residuos que presentan alta relación C/N, como es el caso del trigo, favorezcan la inmovilización del nitrógeno, lo que resultaría en una menor disponibilidad de este nutriente para el cultivo siguiente y por lo tanto en un menor rendimiento (Black, 1975).

La presencia de rastrojo de trigo en descomposición genera compuestos químicos (aleloquímicos) que pueden afectar la implantación del siguiente cultivo en la rotación. Estos compuestos son lixiviados al suelo provocando problemas de emergencia y muerte de plántulas del siguiente cultivo en la rotación (Vidal y Troncoso, 2003). En estos casos la sustancia llega al suelo por lavado. El tiempo entre cosecha del cultivo de invierno y la siembra del cultivo de segunda, así como la cantidad de precipitaciones ocurridas en este período, son las principales variables de manejo para el problema (Ernst y Siri Prieto, 1995).

Los compuestos alelopáticos potenciales identificados en tejidos vivos y en descomposición de cultivos de cobertura de grano pequeños incluyen ácidos fenólicos, ácidos hidroxámicos, otros ácidos orgánicos y sustancias volátiles. Entre estos, los ácidos fenólicos han sido identificados con mayor frecuencia como las fitotoxinas. En el campo las mezclas de ácidos fenólicos y otros compuestos orgánicos pueden causar efectos inhibitorios aunque las concentraciones de los compuestos individuales estén muy por debajo de sus niveles inhibitorios (Blum, 1996).

Dentro de los ácidos fenólicos se encuentran los derivados del ácido cinámico, tales como los ácidos ferúlico, sinápico, p-cumárico y cafeico, y los derivados del ácido benzoico, tales como los ácidos vanílico, siringal, p-hidroxibenzoico y protocatechúico, tienen una amplia gama de fitotoxicidades, pero todos tienen el mismo modo de acción. El efecto primario de estos ácidos fenólicos en las especies sensibles parece ser una reducción en la conductividad hidráulica y la absorción neta de nutrientes de las raíces y, por tanto, el crecimiento (Blum, 1996).

### 2.2.2 Canola

Si bien el cultivo de trigo es considerado el principal cultivo de invierno en la rotación, su utilización en la misma debe ser cuidadosa debido a que cuando el antecesor al trigo es el trigo del año anterior, la infección de varias enfermedades aparece desde estadios tempranos como tres hojas, dada la alta cantidad de inóculo en el rastrojo. Es por ello que desde el punto de vista tecnológico, la única alternativa es evitar la siembra de trigo sobre trigo (Miralles et al., 2014).

El cultivo de canola es una alternativa que reúne una serie de características que lo hacen atractivo desde el punto de vista agronómico como su fecha de siembra, la posibilidad de realizar una cosecha temprana y el dejar un rastrojo de fácil manejo que logra mejorar las características físicas del suelo (Martino y Ponce de León, 1999).

En nuestro país el ciclo emergencia-madurez es de 130 a 170 días, lo que permite que los cultivos sembrados en mayo puedan ser cosechados tempranamente a mediados de noviembre. Esta característica lo ubica como un buen antecesor de soja, maíz o sorgo, permitiendo una correcta ejecución de la rotación (Engler et al., 2008).

Un cultivo de canola promedio proporciona una menor cobertura por el rastrojo que un cultivo de cereal promedio porque genera una cantidad un poco menor de residuos y se descompone más rápidamente. Por lo tanto, los riesgos de erosión aumentan con la canola, especialmente cuando le sigue un barbecho largo (Sieling y Christen, 2009).

Su rastrojo se encuentra compuesto mayoritariamente por hojas, paredes de silicuas y tallos de fácil degradación por lo que es de fácil manejo, aunque es de baja inmovilización de nitrógeno mineral, debido a su baja relación C/N (Martino y Ponce de León, 1999).

Según Oleszek et al. (1996) *Brassica spp.*, presenta la capacidad de suprimir algunas malezas a través de su vigoroso crecimiento y liberación de sustancias aleloquímicas. Algunas especies de brassica tienen efectos nocivos sobre los cultivos de grano sembrados en el verano siguiente. Estos efectos involucran la disminución en la germinación y en el crecimiento inicial de los mismos. Los principales componentes de sustancias fenólicas en canola son: ácido sinápico y sinapina.

Según Haramoto y Galland, citados por Koide (2012), canola ejerce un efecto directo negativo en maíz a través de la producción de aleloquímicos y estos pueden reducir la absorción de nitrógeno (Choi y Daimon, 2008). Los productos químicos alelopáticos pueden derivar de las raíces y partes de tallos del cultivo de canola que queda en superficie luego de la cosecha. Además, la cantidad sustancial de semilla que queda en la superficie del suelo también puede contribuir a la carga alelopática.

Según Bouchereau et al. (1991), la composición de los ácidos fenólicos en las sinapinas está genéticamente controlada, pero su contenido es afectado por el cultivar y las condiciones de crecimiento. Los ácidos fenólicos están

presentes en las formas libres, esterificadas e insolubles, y son derivados de ácidos benzoico y cinámico al igual que el trigo.

Dentro de los ácidos fenólicos se encuentran el sinápico, phydroxybenzoico, vanillico, gentísico, protocatecuico, siríngico, p-cumárico, cis y trans ferúlico, cafeico y clorogénico en forma libre, también gálico. De todos estos, el sinápico constituye el 70-85% del total de los ácidos presentes (Naczk et al., 1998).

Según Mizutani, citado por Batish et al. (2008), el efecto inhibitorio del ácido cafeico sobre el crecimiento temprano no es sorprendente, ya que los ácidos fenólicos son potentes inhibidores de la germinación y el crecimiento, afectando a la raíz más que al brote. El ácido ferúlico afecta el crecimiento de las raíces de maíz (Devi y Prasad, 1996).

Los ácidos fenólicos son liberados al suelo por las plantas mediante diversos mecanismos tales como la exudación de las raíces, lixiviación y descomposición de los residuos. Al ser liberados, inhiben el crecimiento, alteran la absorción de los minerales, alteran la permeabilidad de membrana, causan el cierre estomático e inducen el estrés hídrico, afectan la fotosíntesis y la síntesis de proteína, y alteran las actividades enzimáticas (Batish et al., 2008).

Según Thompson, citado por Boswell (1998) hubo una reducción en la colonización de micorrizas y por ende en la concentración de fósforo en brotes de maíz con antecesor canola, como consecuencia de una reducción en el inóculo potencial. Esto podría explicarse porque la canola es incapaz de formar micorrizas funcionales debido a la producción de isotiocianatos anti-fúngicos, producto de la degradación tóxica del glucosinolato sinigrina. El maíz forma micorrizas y en muchas circunstancias depende del hongo para absorber una fracción considerable del fósforo requerido (Koide, 2012).

## 2.3 FACTORES CLIMÁTICOS A LOS QUE SE ENFRENTA EL MAÍZ COMO CULTIVO DE SEGUNDA

### 2.3.1 Temperatura y radiación

Si bien el maíz es originario de los trópicos, su crecimiento óptimo se da con temperaturas entre 24 y 30 °C. Su temperatura base es de 8 °C y la temperatura máxima, en la cual se detiene el desarrollo, es aproximadamente 44 °C. Las altas temperaturas nocturnas no ayudan al crecimiento del cultivo, sino que aumentan las tasas de respiración y disminuyen el peso seco acumulado en el día por la fotosíntesis (Fassio et al. 1998, Giménez 2001).

Producir maíz como cultivo de segunda, genera un atraso en la fecha de siembra del cultivo. Fechas de siembra tardías (fines de noviembre - principio de diciembre), enfrentan al maíz a cambios tanto en temperatura como en radiación incidente con respecto a las ocurridas durante el desarrollo de un cultivo de primera. Esto influye de manera diferencial sobre la fenología, desarrollo del área foliar y la acumulación de materia seca del maíz (Tollenaar y Bruulsema, 1988).

El cultivo de maíz requiere acumular una suma térmica determinada para emerger. El atrasar la fecha de siembra enfrenta al cultivo a una mayor temperatura, la cual no solo acorta la duración del período siembra-emergencia, sino que logra una mayor homogenización de esta última etapa. Siembras en el mes de setiembre requieren 15 días para que el cultivo emerja, mientras que siembras de diciembre requieren tan solo 5 días. Esto no solo se ve influenciado por la temperatura del aire, sino que el suelo también presenta un ascenso marcado de temperatura, por lo que la misma es mayor que en aquellos casos donde la siembras se realizan en fechas más tempranas (Sackmann, 2010).

El atraso en la fecha de siembra, genera un aumento de temperatura que favorece al maíz en sus etapas iniciales de crecimiento, acelerando su desarrollo fenológico y acortando el período emergencia-floración. La velocidad de aparición y despliegue de hojas, también se ve aumentada por los cambios de temperatura, lo que determina un rápido establecimiento del canopeo generando mayor eficiencia del cultivo al captar luz solar. Esto junto a los altos niveles de radiación solar, propios de esta época, permite que el maíz acumule una cantidad de radiación interceptada hasta floración semejante a la de siembras tempranas (Cirilo et al., 2012).

Según Bonelli et al. (2016), el retraso en la fecha de siembra redujo la cantidad de PAR incidente de la emergencia al cuajado de grano. Sin embargo, las diferencias en el PAR interceptado acumulado durante ese período fueron menores que las observadas para el PAR incidente debido a incrementos en la fracción PAR interceptada a medida que se retrasó la fecha de siembra.

La eficiencia de conversión de luz durante la fase vegetativa aumenta como consecuencia de las altas temperaturas. Esto permite que el cultivo logre acumular mayor biomasa al momento de floración, generando que las plantas sean más altas y pesadas. De igual modo, el panorama cambia en etapas posteriores a la floración, donde la radiación suele decaer progresivamente, causando una reducción en la producción de biomasa. En este momento, la radiación solar y la temperatura son consideradas desfavorables para la producción fotosintética de la planta, limitando la fuente de asimilados y

causando que la planta fije un menor número de granos de menor peso. Por lo tanto, el hecho de que el cultivo sembrado en etapas más tardías, perciba niveles más bajos de radiación y temperatura durante su etapa reproductiva, hace que el mismo presente menor potencial de producción (Otegui et al., 1995).

El maíz puede disminuir su rendimiento tanto por una reducción de número y tamaño como por una disminución de la producción de asimilados por fotosíntesis durante el período de llenado del grano (Andrade et al., citados por Cirilo et al., 2012).

La disminución progresiva de los cambios de temperatura y radiación durante el período reproductivo causa que el suministro de asimilados para grano (capacidad de fuente) se vuelva más limitante que la demanda de asimilados por el grano durante el período de llenado (capacidad de fosa). Esto posiciona a la fuente como factor más limitante para el crecimiento del cultivo, a pesar de que, en situaciones normales, es la fosa quien se muestra más limitante (Bonelli et al., 2016).

Cuando el cultivo se siembra en diciembre, el período floración-madurez fisiológica tiende a alargarse debido a que la temperatura media comienza a descender. Esto genera un aumento en el riesgo de heladas tempranas, lo cual puede afectar el llenado de grano, ya que la ocurrencia de estas en etapas avanzadas de crecimiento puede impedir la correcta maduración de los granos, impidiendo que estos lleguen a madurez fisiológica (Fassio et al., 1998).

### 2.3.2 Régimen hídrico

El desarrollo y en especial el rendimiento de maíz dependen exclusivamente del factor agua, y por lo tanto de las precipitaciones durante el período crítico del cultivo (Totis de Zeljkovich, 2012).

El maíz evapotranspira entre 450-600 mm de agua durante su estación de crecimiento, siendo la evapotranspiración máxima en promedio 650 mm. Por lo general, las precipitaciones efectuadas durante el ciclo del cultivo, sumado a la cantidad de agua acumulada en el suelo, no alcanzan la cantidad transpirada. A su vez, la cantidad de agua registrada por las precipitaciones, no siempre se encuentra disponible para el cultivo (Fassio et al. 1998, Totis de Zeljkovich 2012).

El atraso de la fecha de siembra puede visualizarse como una herramienta para diversificar la fecha del período crítico, buscando que este no

coincida con etapas de mayor déficit hídrico. Lo contrario sucede cuando nos enfrentamos a un maíz de segunda donde, si bien la fecha de siembra es más tardía, existe una alta probabilidad de que el suelo presente poca cantidad de agua disponible al efectuar la siembra, debido a la importante extracción del cultivo invernal anterior (Sackmann, 2010).

Uruguay presenta una distribución de lluvias uniforme a lo largo del año en un promedio histórico, pero presenta una muy alta irregularidad entre las precipitaciones mensuales entre años. Por otro lado, presenta una curva de evapotranspiración estable entre años, que es mínima en el invierno y máxima en el verano, momento en el cual se desarrolla el cultivo de maíz. La evapotranspiración del cultivo, junto a la irregularidad de las precipitaciones y la capacidad de almacenaje de agua útil de nuestros suelos originan que se produzcan en forma aleatoria períodos de déficit hídrico.

Esto demuestra que la elección de la fecha de siembra y de sembrar o no un cultivo anterior, sí va a influir en la cantidad de agua disponible que va a presentar el suelo para el cultivo de verano, ya que esta será el residuo del cultivo anterior, debido a que las probabilidades de recarga por precipitaciones en un barbecho que se ve acortado por la presencia de dos cultivos por año, disminuyen (Sackmann, 2010).

Cuando el contenido de agua en el suelo se ubica por debajo del 40-60% de la fracción de agua disponible para el cultivo, disminuye el consumo de agua y por ende el crecimiento de la planta (Andrade et al., citados por Cirilo et al., 2012).

El maíz es un cultivo muy sensible al déficit hídrico durante el período próximo a floración (Andrade y Sadras, citados por Álvarez y Micucci, 2003). Experimentos realizados por Giménez (2012) determinaron que las deficiencias hídricas durante el período crítico provocaron pérdidas de rendimiento aproximadas al 50% del potencial. El estrés hídrico durante el llenado de grano generó disminuciones del rendimiento cercanas a 30% y las deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el período crítico provocaron un descenso del rendimiento de 56%.

La demanda atmosférica se hace máxima hacia fin de diciembre y enero y luego desciende hasta llegar al nivel más bajo en los meses de junio y julio. Por lo que, el atrasar la fecha de siembra hacia fin de noviembre y diciembre, teniendo la misma probabilidad de lluvia todo el año, evita que tanto el período crítico del maíz como el del llenado de grano coincidan con los momentos de mayor déficit hídrico, por lo que la variabilidad de los rendimientos esperados es menor (Sackmann, 2010).

Considerar como mejor opción una fecha de siembra frente a la otra, resulta de equilibrar el mayor potencial de rendimiento de las siembras tempranas frente al menor riesgo de fracaso o de rendimiento deficiente de la fecha tardía (Madonni, 2012).

Los efectos causados por estrés durante el llenado de los granos, son menores que los producidos en el período de floración, aunque el índice de cosecha puede verse afectado si el peso del grano disminuye. Impedir que coincida la floración con la máxima demanda atmosférica se torna una táctica de escape al estrés adecuada para minimizar los efectos de la sequía (Cirilo et al., 2012).

### 2.3.3 Humedad

La humedad relativa del aire a la hora de la cosecha es otro de los factores ambientales que se ven influidos y variados según la fecha de siembra. Después de madurez fisiológica, el grano debe secarse hasta una humedad adecuada para la cosecha (menor a 19%). La tasa de secado es afectada por las condiciones climáticas y por las características de los cultivares (Fassio et al., 1998).

A medida que la fecha de siembra se ve atrasada, el secado del grano en la espiga se ve enlentecido debido a que este proceso es llevado a cabo durante los meses de abril, mayo y junio, donde la humedad relativa del aire es más alta. En consecuencia, el grano al momento de la cosecha presenta mayores valores de humedad, lo que prolonga la fecha de cosecha de este cultivo en comparación con los que fueron sembrados en una fecha más temprana (Sackmann, 2010).

Al sembrar un cultivar de ciclo intermedio, la fecha de cosecha puede verse retrasada aproximadamente tres meses debido a los niveles de humedad. Se deben evitar siembras posteriores al 15 de diciembre, ya que, luego de esta fecha, alcanzar los niveles de humedad necesarios para que el cultivo sea cosechado es prácticamente imposible. A partir de esta fecha de siembra se recomienda sembrar cultivares de ciclo corto, aunque deben ser descartadas siembras posteriores al 30 de diciembre (Fassio et al., 1998).

### 2.3.4 Nutrientes del suelo

La oferta de recursos en el suelo para un cultivo de segunda, puede verse disminuida por la anterior presencia de un cultivo de invierno. Esto genera en el cultivo de verano, una menor tolerancia a altas densidades, obligando a que la densidad óptima del maíz se vea disminuida. Se definen poblaciones en

torno a 65000 a 70000 plantas por ha a cosecha en siembras tempranas, descendiendo a 55000 a 60000 plantas por ha para cultivos de segunda (Sackmann, 2010).

En general los cultivos de verano sembrados en fechas tardías se encuentran con un panorama beneficioso en lo que a nutrientes se refiere. La alta disponibilidad de nitrógeno se justifica por una mayor mineralización de los barbechos más largos y por una mayor temperatura. Cuando el cultivo sembrado es un cultivo de segunda, la situación es distinta. Si el maíz sembrado presenta como antecesor un cultivo de invierno, no solo va a contar con un tiempo de barbecho más corto, lo cual puede no ser suficiente para una correcta mineralización del rastrojo, sino que además el cultivo de invierno anterior, al realizar una importante extracción de nutrientes, generará que el maíz de segunda requiera de una mayor fuente de nutrientes externa (Sackmann, 2010).

### 2.3.5 Requerimientos nutritivos

#### 2.3.5.1 Nitrógeno y azufre

Las plantas requieren nitrógeno en muy altas cantidades y el consumo de este macronutriente depende de la producción de materia seca del cultivo. Cuando el rendimiento del cultivo de maíz se duplica, la cantidad de nitrógeno que el mismo consume también aumenta (Perdomo y Barbazán, 1999).

Los contenidos de nitrógeno en planta representan entre 1 y 5% del peso seco total del mismo, siendo mayor en leguminosas que en gramíneas. La acumulación de este en función del tiempo sigue una curva sigmoide que muestra como la absorción de nitrógeno comienza siendo escasa (a inicios de desarrollo del cultivo), se vuelve máxima cuando el mismo se encuentra en activo crecimiento y finalmente se reduce (Perdomo y Barbazán, 1999).

Al fertilizar el cultivo de maíz en seco, existen dos momentos del ciclo donde la dosis debe ser ajustada según los requerimientos del mismo: a la siembra y en  $V_5$ - $V_6$ . La razón principal por la cual la fertilización nitrogenada se aplica fraccionada, es que el maíz presenta un bajo crecimiento inicial y el suministrarle otra dosis de nitrógeno en  $V_5$ - $V_6$ , permite asegurar la cantidad necesaria de este nutriente en aquella etapa donde más lo requiere.

Andrade et al., citados por Cirilo et al. (2012), encontraron que el cultivo de maíz presenta su tasa máxima de absorción en el período entre  $V_5$  y  $R_4$ - $R_5$  (25 y 120 días post-emergencia respectivamente).

Los rangos de suficiencia fueron definidos en varios trabajos experimentales llevados adelante por Campbell y Plank (2000), Jones, Malavolta et al., Voss, citados por Correndo y García (2014). Estos intervalos adquieren valores porcentuales de nitrógeno de 3 a 5 % cuando el cultivo se encuentra en fase vegetativa y de 2,75 a 4 % cuando el mismo se encuentra en floración.

El nitrógeno se presenta como el nutriente más relevante para el cultivo de maíz por ser el responsable en determinar su rendimiento (Andrade et al., 2002). Por otro lado, se reconoce también, que el azufre presenta una importancia creciente para este mismo cultivo, debido a que han sido encontradas importantes deficiencias del mismo en muchos sistemas agrícolas. Estas deficiencias se reportan más evidentes en sistemas bajo siembra directa que en aquellos bajo labranza convencional (Pagani et al., 2009).

Si bien no se cuenta con mucha información acerca de la interacción y la influencia de un nutriente sobre otro, algunos trabajos señalan que es probable que la adición de azufre cause una mejora en la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado y viceversa (Pagani et al., 2009). Es por esto que en situaciones donde el agregado de nitrógeno es alto (100 kg de N), es recomendable agregar azufre, aunque no existen para este último niveles críticos.

El hecho de no contar con un método de diagnóstico exacto, hace difícil calibrar y reconocer las necesidades de azufre que puede presentar el cultivo de maíz. Las respuestas al azufre se han observado fundamentalmente en suelos con bajo nivel de materia orgánica, prolongada historia agrícola, elevada respuesta al agregado de nitrógeno y con niveles de sulfatos menores de 5 ppm. La dosis de respuesta para el doble cultivo puede variar entre 10 y 20 kg ha<sup>-1</sup> de azufre (García et al., 2009).

#### 2.3.5.2 Fósforo

El nivel crítico de fósforo a la siembra para el cultivo de maíz es de 12 ppm P Bray-I y presenta un equivalente fertilizante 9-10 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Oudri et al., 1976).

La correcta aplicación de los fertilizantes fosfatados debe realizarse a la siembra o previo a la misma, provocando que este macronutriente se encuentre disponible para el maíz desde la implantación. Este nutriente presenta una reducida movilidad y puede ser retenido en el suelo, por lo que requiere de aplicaciones localizadas, especialmente en suelos de bajo contenido de fósforo disponible y en siembras tempranas (Randall y Hoefl, 1988).

Los suelos con niveles bajos de fósforo presentan una mayor respuesta a la fertilización. Muchas veces no se realiza fertilización ni muestreo cuando se siembran cultivos de segunda por la característica residualidad de este nutriente. Sin embargo, no siempre se cumple que el agregado de P por encima de las necesidades del cultivo de invierno previo, aseguren un nivel de P suficiente en suelo para el cultivo de segunda posterior.

Las causas de una baja disponibilidad de fósforo a la siembra de un cultivo de segunda pueden ser: que las aplicaciones de fósforo como fertilizante hayan sido cercanas a la extracción de fósforo en grano del cultivo de invierno; efectos climáticos y dinámica de la biomasa microbiana asociada (Abella y Nin, 2003) y dinámica del fósforo asociado a la actividad del  $Fe^{++}$  (Ferrando et al., 2002).

#### 2.3.5.3 Potasio

Los índices de cosecha (extraído/absorbido) del fósforo y el nitrógeno son elevados y representan un 65-75%, a diferencia del índice de potasio que es mucho menor y representa 20-25% (García et al., 2009).

Las deficiencias de fósforo generan una disminución en el crecimiento inicial del cultivo, a diferencia del potasio que al presentarse como limitante en el suelo, reduce el crecimiento hacia fines del ciclo, afectando en gran medida la senescencia y no tanto la expansión foliar (Arias, 2006).

Debido a que las deficiencias en fósforo pueden aumentar la relación raíz-tallo y las deficiencias de potasio disminuirla (Hermans et al., 2006), el hecho de que la planta se enfrente a deficiencias de fósforo no afecta la absorción de potasio, mientras que enfrentarse a deficiencias de potasio sí afectaría la absorción de fósforo (Arias, 2006).

Según Barbazán et al. (2011) aún no se ha percibido la existencia de problemas importantes de potasio en Uruguay, pero la presencia de síntomas visuales de deficiencia ha llevado a la realización de estudios más específicos. Estos fueron resumidos por Barbazán et al. (2010) quienes concluyeron que el nivel crítico orientativo del potasio en el suelo es de 0,34 meq/100g, sin discriminar por textura edáfica ni cultivo. Por encima de este valor, sin embargo algunos cultivos presentaron respuesta al agregado de potasio, mientras otros con valores menores, ya habían alcanzado un rendimiento superior al 90% del máximo.

Trabajos experimentales, citados por Correndo y García (2014), indicaron los rangos porcentuales de suficiencia para el maíz en sus distintas

etapas. Estos intervalos de suficiencia, cuando el cultivo se encuentra en su etapa vegetativa, adquieren valores de 2 a 5% y de 1,7 a 3% cuando el mismo se encuentra en etapa reproductiva.

Las hipótesis planteadas en el trabajo son dos. La primera de ellas es que la ventaja de canola sobre trigo es independiente de la fecha de siembra y resulta de la menor inmovilización de N. En segundo lugar, el posible efecto negativo de los compuestos alelopáticos específicos en canola se diluye cuando el manejo de suelo permite una buena oferta de nitrógeno y agua.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

##### 3.1.1 Localización espacial

El trabajo se desarrolló en el potrero No. 27 de la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni Facultad de Agronomía, en el departamento de Paysandú. Sobre un suelo Brunosol éutrico típico perteneciente a la unidad San Manuel de la Formación Fray Bentos según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay 1:1.000.000 (Altamirano et al., 1976).

##### 3.1.2 Descripción del experimento

El trabajo se realizó en un experimento de largo plazo, iniciado en 1993 en el que hasta el 2014 se evaluaron los siguientes tratamientos ubicados en 3 bloques al azar:

1. Agricultura continua con laboreo convencional (AC-LC), 2. Agricultura continua con siembra directa con C4 (AC-SD-C4), 3. Rotación cultivos - pastura con laboreo convencional (AP-LC), 4. Agricultura continua con soja en verano y barbecho invernal (AC-Soja-BQ.), 5. Agricultura - pasturas sin laboreo (AP-SD), 6. Agricultura continua en siembra directa con C3 (AC-SD-C3) y campo restablecido (Testigo).

Es importante remarcar que en los tratamientos de agricultura - pasturas hubo pocos años de pasturas, por lo que el efecto de las pasturas no tiene mucho peso. Por otro lado entre laboreo y siembra directa tampoco se diferencia el efecto, ya que a partir del 2015 se realizó SD en todos los tratamientos.

En el invierno del 2015 los bloques se dividieron en dos, sembrando trigo y canola con SD en todos los tratamientos. En ese año los tratamientos no presentaron diferencias significativas entre sí, ya sea en trigo o canola. El 7 de diciembre del 2015 se sembró maíz sobre ambos antecesores, a una densidad de 4 semillas viables/m lineal a 50 cm entre filas y a una profundidad de 4 cm. El cultivar utilizado fue 510PW. El 21 de abril del 2016 se realizó la cosecha manual colectando todas las mazorcas en 5 metros lineales de tres hileras consecutivas de cada sub parcela.

Con estas modificaciones el diseño experimental corresponde a bloque dividido, en el que los antecesores de invierno se ubicaron en la parcela mayor

y los tratamientos de manejo del suelo-rotación en la parcela menor. El tamaño de parcela menor es de 10\*25 m.

El maíz se fertilizó al estadio V<sub>1</sub>-V<sub>2</sub> (21 de diciembre) con 100 kg ha<sup>-1</sup> de urea azufrada.

En cuanto al control de malezas el 4 de diciembre se hizo una aplicación durante el barbecho de 1,5 L ha<sup>-1</sup> de glifosato más 1,4 L ha<sup>-1</sup> de metolaclor. El 13 de enero, con el cultivo de maíz en 4 hojas se aplicó 1 L ha<sup>-1</sup> de 2-4D para control de malezas de hoja ancha.

### 3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El modelo experimental utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_k + HC_i + \lambda_{ik}(a) + A_j + \delta_{jk}(b) + (HC.A)_{ij} + \varepsilon_{ijk}(c)$$

$Y_{ijk}$  = observación de la unidad experimental.  $\mu$  = media general del ensayo.  $\beta_k$  = efecto del k-ésimo bloque.  $HC_i$  = efecto del i-ésimo tratamiento de la parcela.  $\lambda_{ik}(a)$  = error de la parcela.  $A_j$  = efecto del tratamiento A de la sub parcela.  $\delta_{jk}(b)$  = error de la sub parcela.  $(HC.A)_{ij}$  = efecto de la interacción de los tratamientos de la parcela y sub parcela.  $\varepsilon_{ijk}$  = error experimental.

Siendo;  $i = 1,2,3,4,5,6,7$  (historia de chacra);  $j = 1,2$  (antecesor);  $k = 1,2,3$  (bloque).

#### 3.2.1 Determinaciones realizadas

##### 3.2.1.1 En suelo

Disponibilidad de nutrientes en el suelo: el día de la siembra, mediante un calador fueron tomadas 16 muestras por parcela de los primeros 20 cm de suelo, 8 sobre trigo y 8 sobre canola al azar. Las muestras fueron llevadas al laboratorio para ser secadas en la estufa a 60 °C. Posteriormente fueron molidas con un mortero primero y luego por un molino para efectuarse un análisis del valor nutricional del suelo (N, P, K) y pH. Para cuantificar el fósforo se utilizó el método de P-Bray I. Los resultados de N-NO<sub>3</sub> y P fueron expresados en ppm y los de K en meq/100g de suelo.

Velocidad de infiltración del agua: para su determinación se fijó un anillo en el suelo apenas 1 cm enterrado en la base. Luego se puso una bolsa de nylon dentro y se colocaron 450 mm de agua, los cuales fueron volcados al

mismo tiempo sobre el suelo y se contabilizó el tiempo que demoraron en infiltrar. Se hizo una repetición en cada anillo y midiendo el tiempo necesario para infiltrar toda el agua, en las situaciones en que se superó los 30 minutos se obtuvo la medida de la altura del agua dentro del anillo. Además de cada infiltración medida se apreció el diámetro de la circunferencia marcada de agua en el suelo. En total se realizaron a la siembra, 3 medidas en cada sub parcela al azar.

Resistencia del suelo a la penetración: se midió utilizando un penetrógrafo. Se realizaron 4 mediciones al azar por cada sub parcela y hasta una profundidad de 40 cm a velocidad constante. Esta medida se realizó a los 14 días pos siembra.

### 3.2.1.2 En planta

Implantación: se contó el número de plantas en 3 hileras en 5 metros al azar por cada sub parcela.

Fenología: a los 14, 37 y 77 días pos siembra se cuantificó el estadio predominante de cada sub parcela, utilizando la escala desarrollada por Ritchie y Hanway (1982). A su vez, para determinar el número de hojas, se utilizó la escala de Haun (1973), que añade la proporción de elongación de la última hoja con relación a la anterior. A los 37 y 77 dps. se determinó la altura de planta a la última hoja desarrollada.

Disponibilidad de N y K en planta: el 13 de enero de 2016, con el cultivo al estadio  $V_4$ , se cortaron al ras del suelo cinco plantas consecutivas por surco al azar y se midió la distancia entre la primer y última planta. Se determinó el peso fresco de cada muestra, las mismas se picaron obteniendo sub muestras de 300 a 400 gramos. Se secaron en estufa a 60 °C y una vez secas se pesaron, se molieron en el molino usando una malla de 2 mm y se enviaron a laboratorio.

Color: se midió el 13 de enero sobre la última hoja expandida en 10 plantas consecutivas tomadas al azar. La carta de colores de las hojas consiste de seis tonalidades de verde: desde el verde - amarillento (1) hasta el verde oscuro (6). Cuando el color de la hoja estaba entre dos tonalidades, se tomó el promedio de las dos lecturas como valor de la lectura.

Índice verde (SPAD): la medición se realizó en dos fechas. El 13 de enero sobre la última hoja expandida en 10 plantas consecutivas tomadas al azar y el 22 de febrero en la base de la hoja opuesta a la mazorca, en 20 plantas consecutivas al azar.

Una vez finalizadas las determinaciones se muestrearon hojas seleccionadas dentro del rango de SPAD cuantificado (20-25, 30-35 a 40-45 y 54-57). Una vez secas y molidas, se determinó su concentración de nitrógeno, de manera de calibrar la determinación realizada con el SPAD.

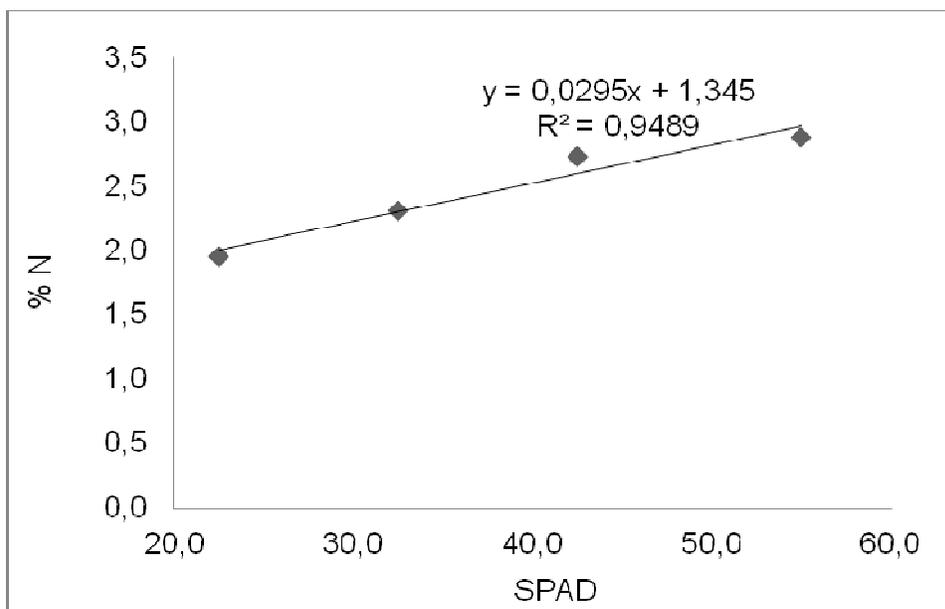


Figura 1. Calibración de muestras extraídas el 22 de febrero.

Esta ecuación fue utilizada para estimar la concentración media de N en hoja de cada tratamiento.

Componentes del rendimiento: el 21 de abril se cosecharon manualmente tres surcos consecutivos de cinco metros al azar por parcela. Se contó el número de plantas y de espigas cosechadas y el número de plantas estériles. Se pesó el grano cosechado (base 13% de humedad) y se cuantificó el peso de 100 granos por parcela. El número de granos por espiga y por unidad de superficie se estimó a partir de estas determinaciones.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO

En la figura 2 se presentan las precipitaciones (mm), temperatura media ( $^{\circ}\text{C}$ ) y radiación solar ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) cada 10 días durante el período experimental, obtenidos de la estación meteorológica automática de la Estación Experimental Mario A. Cassinoni.

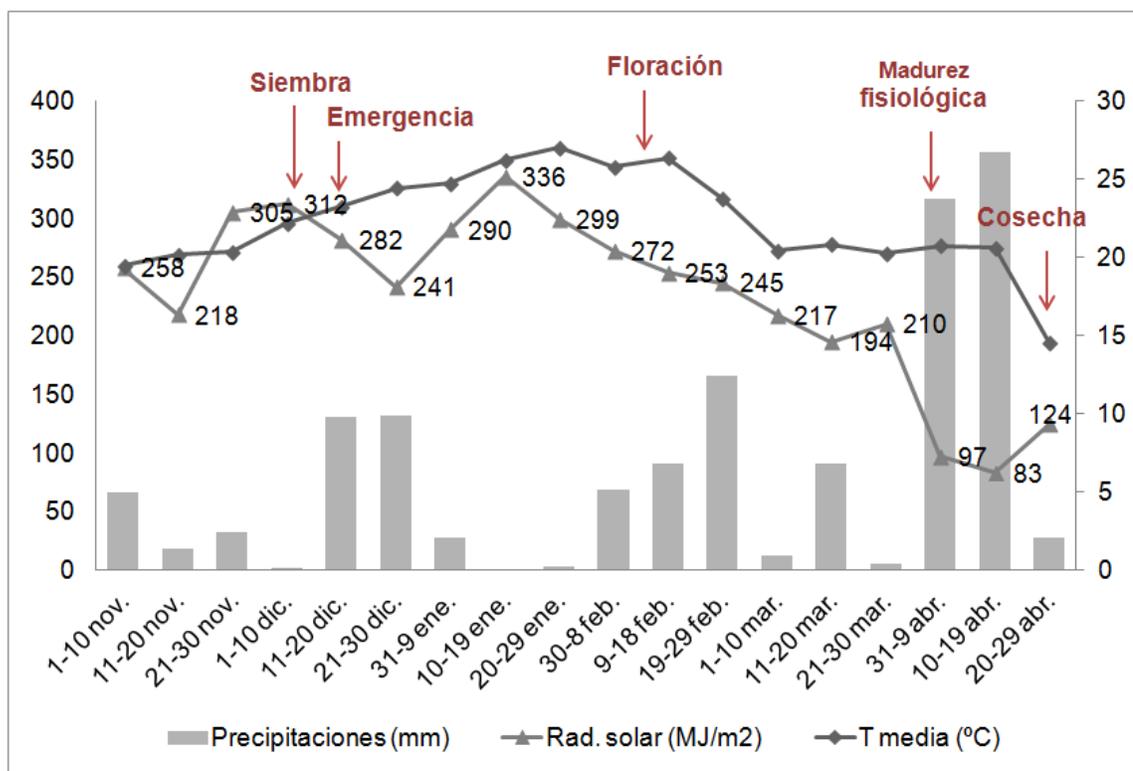


Figura 2. Precipitaciones (mm), radiación solar ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) y temperatura media ( $^{\circ}\text{C}$ ) ocurridas durante el crecimiento del cultivo.

#### 4.1.1 Precipitaciones

El ciclo del cultivo estuvo caracterizado por precipitaciones abundantes que duplicaron la media histórica correspondiente al período 1961-2009 (1543 vs. 733 mm). Los consumos totales del cultivo de maíz varían entre 450 a 600 mm y un 40% de eso se ubica en el período crítico y el restante 60% repartido en el llenado de grano y desde emergencia a inicios del período crítico.

Durante el mes anterior a la siembra del cultivo, las precipitaciones fueron escasas. Esto sumado a que el cultivo es de segunda genera un ambiente de baja disponibilidad de agua en el suelo.

De siembra a emergencia, se registraron precipitaciones de 27 mm y de siembra a  $V_1$  las precipitaciones fueron de 135 mm lo cual benefició el crecimiento inicial del cultivo.

En el mes de enero las precipitaciones ocurridas fueron casi nulas, afectando el crecimiento vegetativo del cultivo. Pero por la fecha de siembra el cultivo transcurrió en un estadio menos sensible al estrés hídrico y con el suelo recargado por las lluvias iniciales. Los efectos del estrés hídrico en la etapa vegetativa de maíz fueron evaluados por Cakir (2004) que obtuvo reducciones en la biomasa de 28 a 32%, pero sin diferencias en el rendimiento con el testigo regado todo el ciclo.

El período crítico abarca aproximadamente del 23 de enero al 22 de febrero y llovieron 273 mm, cantidad que supera el 40% del total de agua que debe consumir en esta etapa mencionado en párrafos anteriores.

En el llenado de grano que va de floración a madurez fisiológica (del 7 de febrero al 1 de abril) llovieron 476 mm. El exceso de precipitaciones impidió el ingreso a la chacra para cosechar y también pudo haber afectado la concreción del rendimiento, ya que de madurez fisiológica a cosecha llovieron 693 mm.

#### 4.1.2 Temperatura

La mejor producción del cultivo del maíz se logra en climas en donde las temperaturas medias en los meses calurosos varían entre 21-27 °C con un período libre de heladas en el ciclo agrícola variable de 120-180 días. El promedio de temperatura en el período crítico fue de 26 °C por lo tanto lo podemos definir como un año normal en lo que respecta al factor temperatura.

#### 4.1.3 Radiación solar

Según Aguirrezábal et al. (2000) el cultivo de maíz intercepta durante todo el ciclo 820  $\text{MJm}^{-2}$  de radiación fotosintéticamente activa (RFA).

Los períodos en los que la radiación solar fue menor, fueron consecuencia de las precipitaciones que fueron superiores a la media y determinaron una nubosidad elevada, generando menor radiación solar

incidente en el mes de febrero y también en la primera quincena de abril (luego de madurez fisiológica).

Como ya fue indicado, durante el período crítico (PC) se registraron precipitaciones de 273 mm lo cual provocó un descenso de los niveles de radiación solar. Esta condición no fue la más favorable para el cultivo, ya que existe una relación positiva entre la radiación fotosintéticamente activa y el número de granos fijados que es el componente principal del rendimiento (Otegui y Bonhomme, 1998). La media de radiación durante el PC fue  $267 \text{ MJm}^{-2}$ . De todos modos, los niveles de radiación registrados durante el ciclo del cultivo no significaron una limitante para obtener una fijación de granos adecuada.

#### 4.2 DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES Y CONDICIÓN FÍSICA DEL SUELO A LA SIEMBRA

En el cuadro 1 se presenta la disponibilidad de fósforo (ppm), potasio (meq/100 g de suelo) y nitrógeno como nitrato (ppm) en suelo a la siembra de maíz en función de la historia de manejo del suelo.

Cuadro 1. Fósforo (P), potasio (K) y nitrógeno (N-NO<sub>3</sub>) disponibles en suelo a la siembra de maíz de segunda en los primeros 20 cm de suelo.

Historia chacra	Antecesor	P (ppm)		K (meq/100g)		N-NO <sub>3</sub> (ppm)	
1	AC-LC	trigo	11 ab	13 a	0,43 ab	0,43 a	4,1 abc
2	AC-SD-C4		16 a		0,41 ab		4,8 ab
3	AP-LC		14 ab		0,42 ab		4,4 abc
4	AC-SJ-BQ		12 ab		0,44 ab		4 abc
5	AP-SD		15 ab		0,49 ab		5,2 a
6	AC-SD-C3		11 ab		0,41 ab		4,4 abc
Efecto promedio trigo							4 a
1	AC-LC	canola	15 ab	11 a	0,49 ab	0,44 a	3 bc
2	AC-SD-C4		13 ab		0,35 b		3,2 abc
3	AP-LC		10 ab		0,44 ab		2,6 c
4	AC-SJ-BQ		10 ab		0,44 ab		2,9 bc
5	AP-SD		8 b		0,55 a		2,5 c
6	AC-SD-C3		9 ab		0,38 b		3,2 abc
Efecto promedio canola							3 a

1. Agricultura continua con laboreo convencional (AC-LC), 2. Agricultura continua con siembra directa con C4 (AC-SD-C4), 3. Rotación cultivos - pastura con laboreo convencional (AP-LC), 4. Agricultura continua con soja en verano y barbecho invernal (AC-SJ-BQ), 5. Agricultura - pasturas sin laboreo (AP-SD), 6. Agricultura continua en siembra directa con C3 (AC-SD-C3). Valores seguidos por la misma letra dentro de columnas no difieren entre sí ( $p \leq 0,05$ ).

Considerando el nivel crítico para fósforo (Bray I) definido en 12 ppm en los primeros 20 cm del suelo (Oudri et al., 1976), el antecesor canola dejó menor fósforo disponible a la siembra (11 contra 13 ppm para canola y trigo respectivamente). Los tratamientos de historia de chacra se encontraron dentro del nivel crítico considerado para definir la necesidad de fertilizar el maíz, excepto agricultura - pasturas sin laboreo (AP-SD) con antecesor canola que mostró una concentración de fósforo significativamente inferior a la de los demás tratamientos. Estrictamente el único que tuvo alto nivel de fósforo fue agricultura continua con siembra directa con C4 (AC-SD-C4) con antecesor trigo. El valor medio para el resto de los tratamientos (12 ppm) determinó la decisión de no fertilizar.

La disponibilidad de  $N-NO_3$  a la siembra fue muy baja sobre ambos antecesores, sin diferencias significativas entre sí y todos los valores registrados para historia de chacra resultaron en una condición de alta deficiencia. Aunque los tratamientos de la combinación de antecesor por historia de chacra presentan diferencias significativas, estos valores se encontraron muy por debajo del nivel crítico considerado para definir la necesidad de fertilizar que es de 15 ppm.<sup>1</sup>

Canola como cultivo antecesor presentó interacción con historia de chacra, con menores concentraciones de  $N-NO_3$  que el antecesor trigo aunque con valores muy bajos. Se puede decir que como consecuencia del doble cultivo hubo baja disponibilidad de  $N-NO_3$  en suelo al momento de la siembra. Este efecto se puede observar en estudios realizados en girasol de segunda donde el efecto del doble cultivo a la siembra deja al suelo con niveles muy bajos de  $N-NO_3$  sea cual sea el cultivo antecesor (Ernst et al., 2004).

El K intercambiable a la siembra no presentó diferencias significativas entre antecesores ni entre historias de manejo. Estudios resumidos por Barbazán et al. (2011) concluyeron que el nivel crítico del K en el suelo es de 0,34 meq/100g, sin discriminar por textura ni cultivo. García Lamothe et al. (2009) afirman que la extracción de nutrientes producida por la intensificación de la producción determinó que suelos de texturas medias, inicialmente ricos en K, en la actualidad presentan valores significativamente más bajos, aunque aún mayores al nivel crítico. Nuestros resultados indican que se sembró el cultivo de

---

<sup>1</sup> Hoffman, E. M. 2015. Com. personal.

maíz en un ambiente con baja disponibilidad de nitrógeno, como sucede en la mayoría de los dobles cultivos, y con un nivel de K intercambiable superior al crítico de referencia para fertilizar.

Cuadro 2. Resistencia del suelo a la penetración (HPa) a la siembra de maíz de segunda, promedios de la capa 0-40 cm, 0-10 cm y 10-20 cm de suelo.

Historia de chacra		Antecesor	Resistencia a la penetración (HPa)					
			0-40 cm		0-10 cm		10-20 cm	
1	AC-LC	trigo	853 a		604 a		1070 ab	
2	AC-SD-C4		815 a		542 a		925 ab	
3	AP-LC		890 a		587 a		999 ab	
4	AC-SJ-BQ		850 a		596 a		1006 ab	
5	AP-SD		954 a		685 a		1101 ab	
6	AC-SD-C3		950 a		632 a		1151 ab	
Efecto promedio trigo			887 a		608 a		1040 a	
1	AC-LC	canola	931 a		644 a		1113 ab	
2	AC-SD-C4		977 a		667 a		1048 ab	
3	AP-LC		1001 a		629 a		1225 b	
4	AC-SJ-BQ		817 a		607 a		911 a	
5	AP-SD		975 a		679 a		1129 ab	
6	AC-SD-C3		959 a		654 a		1027 ab	
Efecto promedio canola			944 b		647 b		1073 a	

1. Agricultura continua con laboreo convencional (AC-LC), 2. Agricultura continua con siembra directa con C4 (AC-SD-C4), 3. Rotación cultivos - pastura con laboreo convencional (AP-LC), 4. Agricultura continua con soja en verano y barbecho invernal (AC-SJ-BQ), 5. Agricultura - pasturas sin laboreo (AP-SD), 6. Agricultura continua en siembra directa con C3 (AC-SD-C3). Valores seguidos por la misma letra dentro de columnas no difieren entre sí ( $p \leq 0,05$ ).

En el cuadro 2 se presenta la resistencia a la penetración del suelo a la siembra de maíz, donde el antecesor canola generó valores significativamente mayores que antecesor trigo. Suelos con rastrojo de canola presentaron valores mayores en la media de los primeros 10 cm (608 y 647 HPa para trigo y canola respectivamente) y para el promedio del perfil 0-40cm.

No se encontraron valores de referencia que permitan valorar el posible efecto de esta mayor compactación de la capa superficial del suelo sobre la implantación de maíz. Los valores cuantificados fueron bajos, inferiores a los

establecidos como críticos para el crecimiento radicular de los cultivos (Horn y Fleige, 2009). Tampoco se asociaron a cambios en velocidad de infiltración del agua al momento de la siembra, aquellas que no presentaron diferencias significativas entre tratamientos (datos no presentados).

#### 4.3 EFECTO SOBRE IMPLANTACIÓN, CRECIMIENTO Y NUTRICIÓN DEL CULTIVO

##### 4.3.1 Implantación y fenología a los 14 días pos siembra

La población del cultivo de maíz sembrado sobre rastrojo de trigo fue significativamente mayor a la población del mismo cultivo sembrado sobre canola (64314 contra 52392 plantas ha<sup>-1</sup> para trigo y canola respectivamente). Esto demuestra un efecto antecesor diferencial.

Cuadro 3. Implantación (número de plantas por hectárea) y fenología (número de hojas) a los 14 días pos siembra.

Historia de chacra	Antecesor	Implantación (pl. ha <sup>-1</sup> )	Fenología (no. hojas)	
2	AC-SD-C4	trigo	64445 a	1,93 ab
3	AP-LC		67111 a	1,83 ab
4	AC-SJ-BQ		70222 a	2,27 ab
5	AP-SD		63556 a	1,67 ab
6	AC-SD-C3		64444 a	2,5 a
1	AC-LC		52000 ab	1,85 ab
Efecto promedio trigo		64314 a		2,02 a
2	AC-SD-C4	canola	48889 ab	1,47 b
3	AP-LC		53778 ab	1,47 b
4	AC-SJ-BQ		56444 ab	1,53 b
5	AP-SD		59555 ab	1,57 ab
6	AC-SD-C3		52445 ab	1,57 ab
1	AC-LC		38667 b	1,5 b
Efecto promedio canola		52392 b		1,52 a

1. Agricultura continua con laboreo convencional (AC-LC), 2. Agricultura continua con siembra directa con C4 (AC-SD-C4), 3. Rotación cultivos - pastura con laboreo convencional (AP-LC), 4. Agricultura continua con soja en verano y barbecho invernal (AC-SJ-BQ), 5. Agricultura - pasturas sin laboreo (AP-SD), 6. Agricultura continua en siembra directa con C3 (AC-SD-C3). Valores seguidos por la misma letra dentro de columnas no difieren entre sí (p≤0,05).

Considerando un objetivo de 55000 a 60000 plantas  $\text{ha}^{-1}$  para siembras de diciembre, se obtuvo una densidad óptima de maíz sembrado sobre rastrojo de trigo y sub óptima para maíz sembrado sobre canola.

Los menores valores de implantación de maíz se obtuvieron en la historia de chacra agricultura continua con laboreo convencional, independientemente del antecesor utilizado.

Una de las posibles explicaciones para el efecto negativo de canola, podría ser la mayor compactación superficial ( $p \leq 0,05$ ), aunque los valores absolutos cuantificados fueron bajos. No obstante los valores de referencia son para crecimiento radicular y rendimiento de grano, no para implantación.

El rastrojo de trigo genera una mayor cobertura que el rastrojo de canola. Esto favorece la infiltración de agua en el suelo y reduce la evaporación de la misma, mejorando las condiciones hídricas a las cuales se enfrenta el maíz por ser un cultivo de segunda. Si bien esto podría haber justificado una mayor implantación del maíz, que presentó el trigo como antecesor, las precipitaciones cercanas al período de implantación, si bien escasas (27 mm), deberían haber logrado solucionar las posibles diferencias.

El análisis de suelo realizado previo a la siembra, demostró que tanto el efecto antecesor trigo, como el de antecesor canola, no mostraron diferencias significativas en la cantidad de nitrógeno, por lo que esto tampoco explicó las diferencias de población en maíz.

El descenso en implantación de los cultivos sembrados pos canola también ha sido cuantificado en otros trabajos de investigación (Oleszec 1996, Haramoto y Galland, citados por Koide 2012). Estos atribuyen este descenso a la fitotoxicidad generada por compuestos alelopáticos exudados por los restos vegetales de este cultivo. Esta fitotoxicidad dependerá, no solo de que los compuestos presentes en el rastrojo alcancen las concentraciones requeridas, sino de su velocidad de descomposición y de su posible lavado por lluvia. Las escasas precipitaciones ocurridas en el período de implantación podrían demostrar la ocurrencia de alelopatía.

En el cuadro 3 se observa que el antecesor canola también generó retraso en el desarrollo fenológico del cultivo de maíz en 0,5 hojas por planta a los 14 días pos siembra ( $p \leq 0,11$ ), existiendo interacciones significativas entre antecesores e historias de chacra.

No es posible discriminar si el efecto sobre la fenología es resultado de un retraso en la implantación (causado por cantidad de rastrojo, barreras físicas

o efectos alelopáticos) o de un efecto adicional directo sobre el desarrollo (temperatura). Las cuatro interacciones (historia de chacra por antecesor) que mostraron un atraso significativo en el desarrollo fenológico, presentaron como antecesor al cultivo de canola. La única de las cuatro que podría justificar este atraso fenológico por una menor implantación significativa y un mayor valor de compactación de suelo, es aquella que presenta historia de chacra con agricultura continua y laboreo convencional. El resto de las interacciones no pueden explicar su atraso en desarrollo por estas razones.

La combinación de mayor desarrollo presenta al trigo como cultivo antecesor y es la misma interacción que había presentado el mayor valor de implantación. Otra de las razones que podría justificar la diferencia en desarrollo fenológico es la mayor cobertura ofrecida por el rastrojo de trigo en comparación con el de canola. Las precipitaciones ocurridas entre siembra y  $V_1$  representan 135 mm, lo cual, sumado a la mayor cobertura de suelo por rastrojo de trigo, puede generar una menor salida del agua por evaporación, aumentando la oferta hídrica para el cultivo de maíz.

Por último, la alelopatía también puede estar generando atraso en el desarrollo fenológico del maíz, ya que los ácidos fenólicos son potentes inhibidores de la germinación y el crecimiento (Devi y Prasad, 1996).

#### 4.3.2 Respuestas del cultivo a los 37 días pos siembra

La tasa de crecimiento del cultivo está relacionada directamente con la cantidad diaria de radiación interceptada (Fischer y Palmer, 1984). Estudiar el tamaño de las plantas es un dato de mucha importancia debido a su influencia sobre la duración del período de llenado de grano, por lo cual se convierte, en una de las determinantes del rendimiento de maíz.

Cuadro 4. Efectos a 37 días pos siembra sobre biomasa, altura, y fenología.

Historia de chacra		Antecesor	Biomasa (kg MS ha <sup>-1</sup> )	Altura (cm)	Fenología (no. hojas)
1	AC-LC	trigo	1094b	49a	4,5a
2	AC-SD-C4		1648ab	54a	4,5a
3	AP-LC		1472ab	51a	4,7a
4	AC-SJ-BQ		2157ab	55a	4,8a
5	AP-SD		2503a	58a	4,6a
6	AC-SD-C3		1839ab	52a	4,6a
1	AC-LC	canola	1072b	47a	4,2a
2	AC-SD-C4		1493ab	51a	4,4a
3	AP-LC		883b	42a	4,2a
4	AC-SJ-BQ		1515ab	49a	4,2a
5	AP-SD		1465ab	55a	4,5a
6	AC-SD-C3		1531ab	48a	4,5a
Efecto promedio trigo			1826a	53a	4,6a
Efecto promedio canola			1342a	49b	4,3b

1. Agricultura continua con laboreo convencional (AC-LC), 2. Agricultura continua con siembra directa con C4 (AC-SD-C4), 3. Rotación cultivos - pastura con laboreo convencional (AP-LC), 4. Agricultura continua con soja en verano y barbecho invernal (AC-SJ-BQ), 5. Agricultura - pasturas sin laboreo (AP-SD), 6. Agricultura continua en siembra directa con C3 (AC-SD-C3). Valores seguidos por la misma letra dentro de columnas no difieren entre sí ( $p \leq 0,05$ ).

Las mediciones de altura en maíz, obtenidas 37 días pos siembra, no demostraron efectos significativos de interacción entre antecesor e historia de chacra, pero sí lo hicieron al comparar los efectos promedio de ambos antecesores ( $p \leq 0,05$ ). En este último caso, el maíz sembrado sobre rastrojo de trigo presentó una altura significativamente mayor a la del maíz sembrado sobre canola. Esto puede deberse a que dada la mayor cobertura de rastrojo de trigo, las plantas de maíz tienden a elongarse buscando la luz y, crecen con mayor altura.

Cuadro 5. Efectos a 37 días pos siembra sobre color, SPAD, concentración y cantidad absorbida de nitrógeno y potasio en el cultivo de maíz en V<sub>4</sub>.

Historia de chacra		Ant.	Color	SPAD	N (%)	N abs. (kg MS ha <sup>-1</sup> )	K (%)	K abs. (kg MS ha <sup>-1</sup> )
1	AC-LC	trigo	2,5a	46,5a	3,4ab	37,6ab	3,6a	36,9b
2	AC-SD-C4		3,3a	47,6a	3,2ab	52,5ab	3,4a	56,1ab
3	AP-LC		3,3a	47,3a	3,5ab	50,9ab	3,7a	53,8ab
4	AC-SJ-BQ		3 a	45,8a	2,6b	57,7ab	3,9a	83,9a
5	AP-SD		3 a	48,8a	3,3ab	81,1a	3,5a	87,1a
6	AC-SD-C3		3,7a	48 a	3 ab	52,7ab	3,4a	61,2ab
1	AC-LC	canola	3,5a	47 a	3 ab	32,1b	3,9a	42,2b
2	AC-SD-C4		3,7a	48,7a	3,7a	54,5ab	2,9a	44,2b
3	AP-LC		3 a	47,5a	3,7a	31,6b	4,2a	36,9b
4	AC-SJ-BQ		3 a	45,4a	3 ab	45,3ab	3,9a	60 ab
5	AP-SD		3,3a	49,7a	3,1ab	46,4ab	3,9a	56,1ab
6	AC-SD-C3		3,7a	48,8a	3,1ab	48,1ab	3,6a	55,7ab
Efecto promedio trigo			3,2a	47,4a	3,1a	56,5a	3,6a	64,7a
Efecto promedio canola			3,4a	47,9a	3,3a	43,6a	3,8a	49,6a

1. Agricultura continua con laboreo convencional (AC-LC), 2. Agricultura continua con siembra directa con C4 (AC-SD-C4), 3. Rotación cultivos - pastura con laboreo convencional (AP-LC), 4. Agricultura continua con soja en verano y barbecho invernal (AC-SJ-BQ), 5. Agricultura - pasturas sin laboreo (AP-SD), 6. Agricultura continua en siembra directa con C3 (AC-SD-C3). Valores seguidos por la misma letra dentro de columnas no difieren entre sí ( $p \leq 0,05$ ).

A diferencia de la altura, la característica biomasa (kg MS ha<sup>-1</sup>), no presentó diferencias significativas entre antecesores y sí lo hizo en la interacción entre antecesor e historia de chacra. El mayor valor de biomasa se obtuvo de la interacción entre agricultura-pastura sin laboreo y antecesor trigo. El tratamiento agricultura continua con laboreo convencional generó los valores más bajos de biomasa sobre ambos antecesores, mientras que la rotación cultivo-pastura con laboreo convencional generó una baja producción de biomasa únicamente con antecesor canola.

A la misma fecha se cuantificó efecto significativo entre antecesores sobre la fenología de maíz, siendo mayor en plantas de maíz sobre trigo como antecesor (4,6 y 4,3 para trigo y canola respectivamente).

Por tanto, el maíz sobre trigo no solo presentó mejor implantación, sino mayor altura y desarrollo fenológico más adelantado que el maíz sobre canola. Considerando la producción de biomasa y la implantación, el peso medio de planta fue de 28 g sobre antecesor trigo y 25 g sobre antecesor canola, indicando que la mayor producción de biomasa no solo resultó de mayor población, sino también del peso individual de plantas.

En cuanto al color y concentración de N en planta, si bien las diferencias entre antecesores no fueron significativas ( $p \leq 0,05$ ), las plantas de maíz sembradas sobre rastrojo de canola presentaban un valor de 47,91 de SPAD, mientras que aquellas sembradas sobre trigo presentaron un valor de 47,4, diferencia significativa con un  $p$ -valor=0.051 y el porcentaje de nitrógeno en planta entera de maíz sembrado sobre canola fue de 3.27%, mientras que el porcentaje sobre trigo fue de 3,12% ( $p=0,078$ ).

El efecto antecesor sobre el color y concentración de N en tejidos de maíz se asocia a la menor población sobre antecesor canola. Si bien a la siembra, el cultivo de segunda se enfrenta de manera natural a una oferta de nitrógeno limitada por el consumo del cultivo invernal anterior, el aporte posterior depende de la calidad del rastrojo y raíces que quedan en el campo, aunque en este caso, la absorción diferencial estuvo definida por la diferencia en población.

Adicionalmente, el antecesor interactuó significativamente con la historia de chacra. La rotación cultivos-pastura con laboreo convencional como agricultura continua en siembra directa con cultivo  $C_4$ , mostraron concentraciones de nitrógeno absorbido significativamente mayores que el resto de los manejos cuando su antecesor fue canola. La menor concentración de nitrógeno absorbido significativa, se obtuvo de la interacción agricultura continua en siembra directa con soja en verano y antecesor trigo.

Según Correndo y García (2012), el rango de suficiencia para nitrógeno en maíz en estadio vegetativo debajo del cual la producción decrece fuertemente, presenta un valor crítico de 3 a 5% de la biomasa vegetal acumulada. Al comparar todas las posibles interacciones entre los tratamientos y los dos posibles antecesores, se observó que solo agricultura continua con soja en verano y antecesor trigo presentó valores significativamente inferiores al rango de suficiencia teórico.

Si bien la mayoría de las interacciones mostraron porcentajes de absorción superiores al valor de referencia de suficiencia, es importante resaltar que el cultivo de maíz presenta su tasa máxima de absorción de nitrógeno en el período entre  $V_5$  y  $R_4-R_5$  (Andrade et al., citados por Cirilo et al., 2012). Esto, junto al hecho de no haber realizado un segundo ajuste de fertilización, abre la posibilidad de que el cultivo se haya visto comprometido en la absorción de este nutriente en aquel período donde más lo requería, sobre todo sobre antecesor trigo, donde los porcentajes de nitrógeno en planta se mostraron inferiores a este rango.

No hubo efecto antecesor significativo en la cantidad de nitrógeno absorbido (kgMS/ha), por lo que lo que se cuantificó refiere al estado nutricional de cada planta. Por tanto, sus efectos se manifestarían sobre el rendimiento de cada planta con mayor importancia que sobre la población.

La concentración de potasio en planta fue modificada por el cultivo antecesor, pero no por la interacción con historia de chacra. El maíz sembrado sobre rastrojo de canola tuvo 3,8% de K en planta entera al estadio  $V_4-V_5$  y sobre trigo 3,6% ( $p= 0,079$ ). Ambos están dentro del rango de suficiencia definido para el potasio absorbido por el maíz en estado vegetativo (entre 2 y 5%, Correndo y García, 2012). No obstante, el maíz sembrado sobre trigo en la rotación agricultura - pastura con siembra directa y agricultura continua en siembra directa con soja en verano logró una cantidad absorbida de potasio significativamente mayor que en el resto.

#### 4.4 EFECTO SOBRE RENDIMIENTO Y COMPONENTES

El rendimiento de maíz fue significativamente mayor sobre antecesor canola que sobre antecesor trigo, sin interacciones significativas con historia de chacra.

El mayor rendimiento se asoció al rendimiento por planta, el que compensó las diferencias generadas en población en favor del antecesor trigo. La diferencia en rendimiento de  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$  aproximadamente, responde a un mayor número de granos por metro cuadrado (definido por una mayor tasa de crecimiento en el período crítico), que se debe a un mayor número de granos por espiga, ya que ni el peso de mil granos, ni el número de espigas por planta difirió entre antecesores.

Cuadro 6. Rendimiento según cultivo antecesor.

Ant.	Rend. (kg ha <sup>-1</sup> )	No. granos/m <sup>2</sup>	Rend./espiga (kg)	PMG (gramos)	No. espiga/pl.
canola	6642 a	1788 a	0,14 a	374,0a	0,94 a
trigo	5637 b	1516 b	0,11 b	373,5a	0,96 a

Valores seguidos por la misma letra dentro de columnas no difieren entre sí ( $p \leq 0,05$ ).

En la figura 3 se presenta la relación entre rendimiento de maíz y población lograda, indicando el antecesor que le dio origen a cada observación.

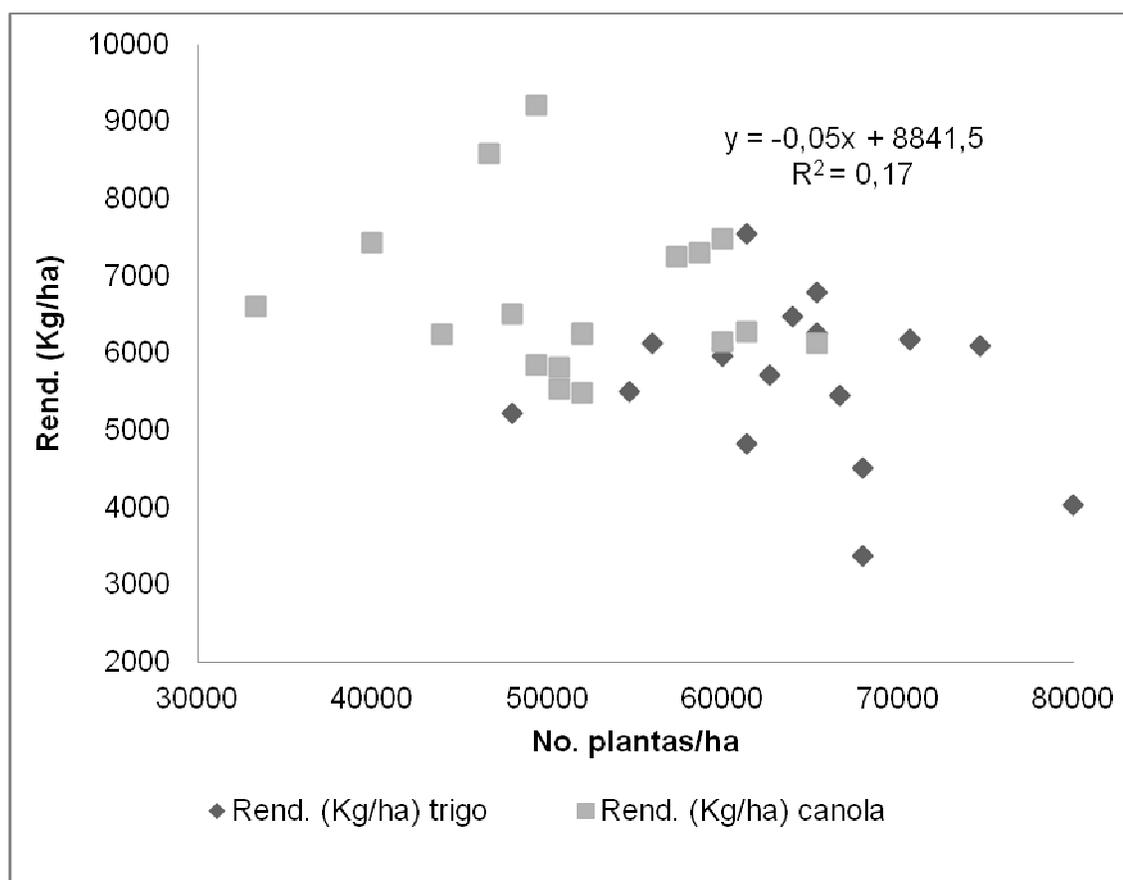


Figura 3. Regresión lineal entre rendimiento de maíz según el rastrojo sobre el cual fue sembrado (trigo o canola) y la población.

Existió una respuesta lineal negativa a la población, pero confundida con el efecto antecesor. No se sabe si la diferencia es debida a un efecto

antecesor o efecto población, lo que sí está claro es que el antecesor canola afectó la población.

Las condiciones de radiación pos floración pueden condicionar la respuesta a la población de siembras tardías (Cirilo et al., 2001) lo que sumado a la mejor nutrición de plantas de maíz sembrado sobre canola, explicarían la compensación de población por rendimiento por planta.

El rendimiento promedio del cultivo de 6 Mg ha<sup>-1</sup> fue acorde al rango de radiación interceptada y temperatura durante el ciclo del cultivo. En el período crítico se obtuvo una temperatura de 26 °C promedio, óptima para obtener altas tasas de crecimiento. Durante el llenado de grano, la temperatura promedio fue de 22 °C, llegándose a 742 grados día, lo cual coincide con la cantidad requerida para esta etapa, entre 700 y 900 grados día. A su vez, el rango de población logrado en el cultivo, entre 40 y 60 mil plantas ha<sup>-1</sup> se encuentra dentro del rango que genera alta respuesta en maíz.

## 5. CONCLUSIONES

Frente a un ambiente similar, definido por un sistema de doble cultivo, los rastrojos tanto de trigo como canola generaron baja disponibilidad de nitratos. En suelos donde había rastrojo de canola, la resistencia a la penetración fue mayor y el maíz sembrado sobre este presentó menor población, desarrollo fenológico y altura de planta.

El efecto antecesor influyó sobre la implantación afectando la nutrición individual de plantas. La oferta de nitrógeno fue baja para ambos antecesores pero debido al menor número de plantas sobre canola fue que las plantas se nutrieron mejor generando un mayor rendimiento individual. En contraposición, hubo mayor cantidad de plantas mal nutridas sobre el antecesor trigo, que al comienzo del ciclo obtuvieron mejores resultados pero en la etapa de mayores requerimientos compitieron por un recurso que fue limitante y terminó comprometiendo el rendimiento.

El maíz sobre antecesor canola rindió  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$  más que sobre trigo, explicado por un mayor rendimiento por espigas, número de granos por  $\text{m}^2$  y, por tanto, un incremento de rendimiento de 18%. Igualmente no se pudo comprobar la hipótesis de la menor inmovilización del rastrojo de canola. Queda abierta la posibilidad de que frente a una mayor fertilización, el maíz sobre trigo hubiera solucionado el problema del menor rendimiento y superado al maíz sobre canola, dada la mayor población.

Se debe profundizar en las causas de la menor implantación y crecimiento inicial sobre el antecesor canola, las que resultarían como consecuencia de la manifestación de efectos alelopáticos en un ambiente de bajas precipitaciones durante la fase inicial de la instalación del cultivo.

## 6. RESUMEN

El manejo del suelo bajo siembra directa y el doble cultivo con la finalidad de mantener el suelo cubierto todo el año, colaboran en el control de la erosión, ayudan a reducir la lixiviación de nutrientes y permiten la correcta fijación de nitrógeno. A su vez, protegen las plántulas, controlan malezas y posibilitan el aumento de la reserva de agua disponible en el suelo. La presencia de rastrojo en sistemas de siembra directa puede provocar inhibición en el crecimiento de plántulas por medio de varios efectos residuales: barreras físicas generadas por los restos vegetales, reducción de la perturbación del suelo, inmovilización de nitrógeno y compuestos alelopáticos fitotóxicos. Cada cultivo generará efectos residuales propios, los cuales se traducirán en consecuencias diferenciales entre ellos. De esta manera se obtendrán diferentes resultados en el cultivo de segunda, dependiendo del tipo de antecesor. El experimento fue realizado en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni, perteneciente a la Facultad de Agronomía, en el departamento de Paysandú, Uruguay. El objetivo fue cuantificar el efecto residual de dos cultivos de invierno antecesores (trigo y canola) sobre el maíz con diferentes historias de chacra cuando el efecto fecha de cosecha del cultivo de invierno/fecha de siembra de maíz no opera sobre el rendimiento del cultivo de maíz. Los mejores rendimientos se observaron en aquellos tratamientos que tenían como antecesor al cultivo de canola. El mayor rendimiento fue explicado por una mayor disponibilidad de N por planta, dada la menor población. Esto se tradujo en una mayor tasa de crecimiento en el período crítico, lo cual generó un mayor número de granos por espiga.

Palabras clave: Siembra directa; Laboreo convencional; Cultivo antecesor; Doble cultivo; Maíz de 2da.; Trigo; Canola; Rotación.

## 7. SUMMARY

Soil management under direct seeding and double cropping in order to keep the soil covered all year long, support erosion control, help reduce nutrient leaching and allow a correct nitrogen fixation. Moreover, it protects the seedlings, controls weeds and makes it possible to increase the available water reserve in the soil. The presence of stubble in direct seeding systems may lead to inhibition of seedling growth through several residual effects: physical barriers generated by plant debris, reduction of soil disturbance, nitrogen immobilization and allelopathic compounds. Each crop will generate its own residual effects, which will unleash in differential consequences between them. In this way, different results will be obtained in the second culture, depending on the type of the preceding crop. The experiment was carried out at the Experimental Station Dr. Mario A. Cassinoni, which belongs to the Faculty of Agronomy, in the department of Paysandú, Uruguay. The objective was to quantify the residual effect of two winter preceding crops (wheat and canola) on maize with different soil managements, when the harvesting date of the winter crop and maize sowing date have no effect on maize yield. The best yields were observed in the treatments that had canola as the preceding crop. The higher yield was explained by a higher availability of nitrogen per plant, given the lower population. This resulted in a higher growth rate in the critical period, which generated a greater number of grains per spike.

Keywords: No-tillage; Conventional-tillage; Previous crop; Double cropping; Second corn; Wheat; Canola; Rotation.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Abella, F. M.; Nin, A. 2003. Evolución en las formas y contenidos de fósforo del suelo bajo sistemas de rotaciones de pasturas y cultivos con laboreo convencional y siembra directa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 65 p.
2. Aguirrezábal, L.; Andrade, F.; Rizzalli, R. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarce, INTA. pp. 61-96.
3. Albrecht, R.; Vivas, H.; Fontanetto, H. 2000. Residualidad del fósforo y del azufre en soja sobre dos secuencias de cultivos. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Informaciones Agronómicas no. 35. pp. 11-16.
4. Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echeverría, A.; Panario, D.; Puentes, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay; clasificación de suelos. Montevideo, MAP. DSF. t.1, 96 p.
5. Álvarez, C.; Micucci, F. 2003. El agua en la producción de cultivos extensivos; III. Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. Archivo Agronómico. no. 8: 1-4.
6. Andrade, F. H.; Sadras, V. 2000. Bases para el manejo del maíz, el girasol y soja; densidad de plantas y espaciamiento entre hileras. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 97-126.
7. \_\_\_\_\_; Echeverría, H. E.; González, N. S.; Uhart, S. A. 2002. Requerimientos de nutrientes minerales. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 211-237.
8. Arbeletche, P.; Ernst, O.; Hoffman, E. 2010. La agricultura en Uruguay y su evolución. In: García Préchac, F. ed. Intensificación agrícola;

oportunidades y amenazas para un país productivo y natural. Montevideo, UdelaR. CSIC/UdelaR. FAGRO. pp. 13-28.

9. Barbazán, M.; Bordoli, J.; Califra, A.; del Pino, A.; Ernst, O.; Mazzilli, S. 2011. La problemática del K en Uruguay; situación actual y perspectivas de corto y mediano plazo. In: Simposio Nacional de Agricultura (2º., 2011, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Hemisferio Sur. pp. 21-33.
10. Batish, D. R.; Singh, H. P.; Kaur, S.; Kohli, R. K.; Yadav, S. S. 2008. Caffeic acid affects early growth, and morphogenetic response of hypocotyl cuttings of mung bean (*Phaseolus aureus*). Journal of Plant Physiology. 165 (3): 297–305.
11. Bermúdez, M. 1999. Yield and early growth responses to starter fertilizer in no-till corn. Thesis MSc. Ames, Iowa. Iowa State University. 48 p.
12. Black, C. 1975. Relaciones suelo - planta. Montevideo, Hemisferio Sur. t.2, pp. 466-470.
13. Blum, U. 1996. Allelopathic interactions involving phenolic acids. Journal of Nematology. 28(3): 259–267.
14. Bonelli, L. E.; Monzon, J. P.; Cerrudo, A.; Rizzalli, R. H.; Andrade, F. H. 2016. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date. Field Crops Research. 198: 215-225.
15. Boswell, E.; Koide, R.; Shumway, D. 1998. Winter wheat cover cropping, a mycorrhizal fungi and maize growth and yield. Agriculture, Ecosystems and Environment. 67: 55-65.
16. Bouchereau, A.; Hamelin, J.; Lamour, L.; Renard, M.; Larher, F. 1991. Distribution of sinapine and related compounds in seeds of Brassica and allied genera. Phytochemistry. 30(6): 183-188.
17. Cakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. Field Crops Research. 89: 1-16.
18. Campbell, C. R.; Plank, C. O. 2000. Foundation for practical application of plant analysis. (en línea). Raleigh, North Carolina. NCAGR

(North Carolina Agriculture). Department of Agriculture and Consumer Services. 122 p. Consultado 4 ene. 2017. Disponible en <http://www.ncagr.gov/agronomi>

19. Choi, B.; Daimon, H. 2008. Effect of hairy vetch incorporated as green manure on growth and N uptake of sorghum crop. *Plant Production Science*. 11: 211-216.
20. Cirilo, A. G. 2001. Llenado del grano y rendimiento en maíz. *In*: Congreso Nacional de Maíz (7º., 2001, Pergamino). Trabajos presentados. Pergamino, AIANBA. s.p.
21. \_\_\_\_\_.; Andrade, F.; Otegui, M.; Maddonni, G.; Vega, C.; Valentinuz, O. 2012. Ecofisiología del cultivo de maíz. *In*: Eyherabide, G. H. ed. Bases para el manejo del cultivo de maíz. Buenos Aires, INTA. pp. 25-52.
22. Correndo, A. A.; García, F. O. 2014. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico; cultivos extensivos. *IPNI. Archivo Agronómico*. no. 14: 1-8.
23. Currie, R. S.; Klocke, N. L. 2005. Impact of a terminated wheat cover crop in irrigated corn on atrazine rates and water use efficiency. *Weed Science*. 53(5): 709–716.
24. Devi, S. R.; Prasad, M. N. V. 1996. Ferulic acid mediated changes in oxidative enzymes of maize seedlings; implications in growth. *Biología Plantarum Journal*. 38: 387-395.
25. Díaz Roselló, R. M. 1992. Evolución de la materia orgánica en rotación de cultivos y pasturas. *Revista INIA. Investigaciones Agronómicas*. no. 1: 103-110.
26. Dowdell, J. W.; Crees, R.; Cannell, R. Q. 1983. A field study of effects of contrasting methods of cultivation on soil nitrate content during autumn, winter and spring. *European Journal of Soil Science*. 34: 367-379.
27. Engler, P. L.; Vicente, G. R.; Cancio, R. A. 2008. La colza en los sistemas agrícolas entrerrianos; una oportunidad como cultivo de invierno. (en línea). Paraná, INTA. 8 p. Consultado mar. 2017. Disponible en <http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-colza-en-sistemas-agricolas-entrerrianos-una-opo.pdf>

28. Ernst, O.; Siri Prieto, G. 1995. Rastrojo en superficie; entre ventajas y problemas. *Cangüé*. no. 4: 15-19.
29. \_\_\_\_\_. 1998. Siembra sin laboreo de cultivos de verano. *In*: Ernst, O.; García Préchac, F.; Martino, D. eds. Siembra sin laboreo de cultivos y pasturas. Montevideo, PROCISUR. 1 disco compacto.
30. \_\_\_\_\_.; Villalba, J.; Castiglioni, E.; Pérez, C. 2004. Girasol; modelos de producción en la República Oriental del Uruguay. *In*: Duarte, G.; Díaz-Zorita, M. eds. El cultivo de girasol en siembra directa. Buenos Aires, SEMA. pp. 199-208.
31. \_\_\_\_\_.; Siri Prieto, G. 2006. Soil organic carbon and total nitrogen in relation to tillage and crop-pasture rotation. *In*: Horn, R.; Fleige, H.; Peth, S.; Peng, X. eds. Soil management for sustainability. *Advances in GeoEcology*. 38: 132-139.
32. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2008. Sistema de laboreo y rotación de cultivos en Uruguay; resumen de resultados. *Cangüé*. no. 30: 2-8.
33. \_\_\_\_\_.; Mazzilli, S.; Siri Prieto, G. 2009. Manejo de la reserva de agua de suelo para situaciones de estrés hídrico. *In*: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1°, 2009, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Hemisferio Sur. pp. 33-48.
34. \_\_\_\_\_.; Siri Prieto, G. 2013. La agricultura en Uruguay; su trayectoria y consecuencias. *In*: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (2°, 2011, Paysandú). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 149-163.
35. Fassio, A.; Carriquiry, A. I.; Tojo, C.; Romero, R. 1998. Maíz; aspectos sobre fenología. Montevideo, INIA. 51 p. (Serie Técnica no. 101).
36. Ferrando, M.; Mercado, G.; Hernández, J. 2002. Dinámica del hierro y disponibilidad de fósforo durante periodos cortos de anaerobiosis en los suelos. *Agrociencia* (Montevideo). 6(1): 1-9.
37. Fortin, M. C.; Pierce, F. J. 1991. Timing and nature of mulch retardation of corn vegetative development. *Agronomy Journal*. 83: 258-263.
38. Galarza, C. 2007. Indicadores biológicos. Balances de carbono en suelos agrícolas pampeanos con manejos contrastantes como

indicadores de sustentabilidad. *In*: Díaz Roselló, R. M. ed. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 31-38.

39. García, F. O.; Fontanetto, H.; Vivas, H. 2012. La fertilización del doble cultivo trigo-soja. Rafaela, INTA. 5 p.
40. García Lamothe, A.; Morón, A.; Quinke, A. 2009. Requerimientos de fertilización en soja. *In*: Jornada de Cultivos de Verano (2009, Colonia). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 9-12.
41. Gaudin, A.; Janovicek, K.; Deen, B.; Hooker, D. C. 2015. Wheat improves nitrogen use efficiency of maize and soybean-based cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 210: 1-10.
42. Giménez, L. 2001. Maíz. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 1-76.
43. \_\_\_\_\_. 2012. Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas del desarrollo. *Agrociencia (Montevideo)*. 16(2):92-102.
44. Hilbert, J. A. 2013. El planteo agronómico del uso de los residuos de origen vegetal en la generación de energía. (en línea). s.n.t. s.p. Consultado 28 may. 2014. Disponible en <http://inta.gob.ar/documentos/sustentabilidad-de-los-biocombustibles/>
45. Hill, M. 2008. Incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en el modelo USLE/RUSLE para estimar erosión en Uruguay. Tesis de Maestría. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 63 p.
46. Hoffman, E. 2012. Criterios y estrategias de fertilización que apunten a asegurar el suministro de fósforo en cultivos de soja segunda. (en línea). *In*: ISTRO Conference (19th., 2012, Montevideo). Proceedings. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 1-11. Consultado 13 may. 2017. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/5BCEF63CDD65DAA785257BE1005290E2/\\$FILE/2.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/5BCEF63CDD65DAA785257BE1005290E2/$FILE/2.pdf)
47. Horn, R.; Fleige, H. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research*. 102: 201-208.

48. Huang, G.; Chai, Q.; Feng, F.; Yu, A. 2012. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Arid Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture*. 11(8): 1286-1296.
49. Koide, R. T.; People, M. S. 2012. On the nature of temporary yield loss in maize following canola. *Plant and Soil*. 360(1-2): 259-269.
50. Madonni, G. A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina. *Theoretical and Applied Climatology*. 107: 325-345.
51. Marelli, H. J. 1995. Siembra directa en la Argentina. *In*: Puignau, J. P. ed. *Avances en siembra directa*. Montevideo, IICA. PROCISUR. pp. 47-56.
52. Martino, D. L. 1995. Restricciones tecnológicas para la siembra directa en Uruguay. *In*: Puignau, J. P. ed. *Avances en siembra directa*. Montevideo, IICA. PROCISUR. pp. 117-124.
53. \_\_\_\_\_; Ponce de León, M. 1999. Canola; una alternativa promisorio. Montevideo, INIA. 98 p. (Serie Técnica no. 105).
54. \_\_\_\_\_. 2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. *In*: Díaz Roselló, R. M. ed. *Siembra directa en el cono Sur*. Montevideo, PROCISUR. pp. 225-257.
55. Martins, M.; Cora, J. E.; Flaqueto, R.; Valente, A. 2009. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil and Tillage Research*. 104(1): 22-29.
56. Mazzilli, S. R; Ernst, O. R; Pereira de Mello, V.; Pérez, C. A. 2016. Yield losses on wheat crops associated to the previous winter crop; impact of agronomic practices based on farm analysis. *European Journal Agronomy*. 75: 99-104.
57. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2013. Anuario 2013. Montevideo. pp. 84-99.
58. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2014. Encuesta agrícola invierno 2014. Montevideo. 17 p.

59. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2015. Encuesta agrícola invierno 2015. Montevideo. 19 p.
60. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2016. Encuesta agrícola invierno 2016. Montevideo. 19 p.
61. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2017. Encuesta agrícola invierno 2017. Montevideo. 5 p.
62. Miralles, D. J.; González, F. G.; Abeledo, L. G.; Serrago, R. A.; Alzueta, I.; García, G. A.; de San Caledonio, R. P.; Lo Valvo, P. 2014. Manual de trigo y cebada para el cono Sur; procesos fisiológicos y bases de manejo. Buenos Aires, CYTED. 29 p.
63. Naczek, M.; Amarowicz, R.; Shahidi, F. 1998. Role of phenolics in flavor of rapeseed protein products. *Development in Food Science*. 40: 597-613.
64. Oleszek, W.; Ascard, J.; Johansson, H. 1996. Brassicaceae as alternative plants for weed control in sustainable agriculture. Jodhpur, India, Scientific. pp. 3-22.
65. Opoku, G.; Vyn, T. J. 1996. Wheat residue management options for no-till corn. Guelph, Ontario, Canada, University of Guelph. 7 p.
66. Otegui, M. E.; Nicolini, M. G.; Ruiz, R. A.; Dodds, P. A. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agronomy Journal*. 87: 29-33.
67. \_\_\_\_\_.; Bonhomme, R. 1998. Grain yield components in maize. I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Research*. 56: 247-256.
68. Oudri, N.; Castro, J. L.; Doti, R.; Sedondi de Carbonell, A. 1976. Guía para fertilización de cultivos. Montevideo, MAP. 46 p.
69. Pagani, A.; Echeverría, H. E.; Sainz Roza, H. 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la Provincia de Buenos Aires. *Ciencias del Suelo*. 27: 21-29.
70. Perdomo, C.; Barbazán, M. 1999. Nitrógeno. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 68 p.

71. Randall, G.; Hoelt, R. 1988. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers; a review. *Journal of Production Agriculture*. 1: 70-79.
72. Ritchie, S. W.; Hanway, J. J. 1982. How a corn plant develops. Ames, Iowa, Iowa State University of Science and Technology. s.p. (Special Report no. 48).
73. Roth, C. M.; Meyer, B.; Frede, H. G.; Derpsch, R. 1988. Effect of mulch rates and tillage systems on infiltrability and other soil physical properties of an oxisol in Parana, Brazil. *Soil and Tillage Research*. 11: 81-91.
74. Sackmann, M. 2010. Maíz tardío y de segunda. (en línea). DEKALB Boletín técnico. no. 14. 12 p. Consultado 18 ene. 20127. Disponible en [http://www.agroterra.com.uy/archivos/novedad\\_35\\_24\\_Boletin%20Maiz%20Tardio%20y%20de%20Segunda.pdf](http://www.agroterra.com.uy/archivos/novedad_35_24_Boletin%20Maiz%20Tardio%20y%20de%20Segunda.pdf)
75. Sangoi, L.; Gracietti, M. A.; Rampazzo, C.; Bianchetti, P. 2002. Response of brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. *Field Crops Research*. 79: 39-51.
76. Sawchik, J; Ceretta, S. 2005. Consumo de agua por soja de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. In: Jornada Técnica de Cultivos de Verano (2005, Mercedes). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 41-51.
77. Shaw, R. H. 1988. Climatic requirement. In: Sprague, G. F.; Dudley, J. W. eds. *Corn and corn improvement*. 3rd. ed. Madison, ASA. pp. 609-638 (Agronomy no. 18).
78. Sieling, K.; Christen, O. 2009. CANOLA growers manual; soil preparation. (en línea). Winnipeg, CANOLA Council of Canada. 71 p. Consultado mar. 2017. Disponible en <http://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/field-characteristics/cropping-sequence/>
79. Silva, P. 2007. Cero labranza; alelopatía del rastrojo de trigo sobre lupino. Tesis PhD. Santiago de Chile, Chile, Universidad de Chile. 99 p.

80. Smika, D. E; Unger, P. W. 1986. Effect of surface residues on soil water storage. In: Stewart, B. A. ed. Advances in soil science. New York, Springer-Verlag. pp. 111-113.
81. Thomas, G. W. 1995. Análisis de la sustentabilidad del sistema de siembra directa en comparación con la labranza convencional. In: Puignau, J. P. ed. Avances en siembra directa. Montevideo, IICA. PROCISUR. pp. 15-46.
82. Tollenaar, M.; Bruulsema, T. W. 1988. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. *Agronomy Journal*. 80(4): 580-585.
83. Totis de Zeljkovich, L. E. 2012. Requerimientos agroclimáticos del cultivo de maíz. In: Eyhérbide, G. H. ed. Bases para el manejo del cultivo de maíz. Buenos Aires, INTA. pp. 7-24.
84. Unger, P. W.; Vigil, M. F. 1998a. Cover crop effects on soil water relationships. *Journal of Soil and Water Conservation*. 53: 200-206.
85. \_\_\_\_\_; Sharpley, A. N; Steiner, J. L; Papendick, R. I; Edwards, W. M. 1998b. Soil management research for water conservation and quality. In: Pierce, E. J.; Frye, W. W. eds. Advances in soil and water conservation. Chelsea, Sleeping Bear Press. pp. 69-78.
86. Vidal, I.; Troncoso, H. 2003. Manejo de rastrojos en cultivos bajo cero labranza. In: Acevedo, E. ed. Sustentabilidad en cultivos anuales; cero labranza, manejo de rastrojos. Santiago, Chile, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. pp. 57-82 (Serie Ciencias Agronómicas no. 8).
87. Wall, P. C. 1995. Siembra directa; perspectivas en áreas tropicales y subtropicales. In: Puignau, J. P. ed. Avances en siembra directa. Montevideo, IICA. PROCISUR. pp. 5-13.
88. Wicks, G. A.; Crutchfield, D. A.; Burnside, O. C. 1994. Influence of wheat (*Triticum aestivum*) straw mulch and metolachlor on corn (*Zea mays*) growth and yield. *Weed Science*. 42 (1): 141-147.
89. Yu, X.; Bals, O.; Grimi, N.; Vorobiev, E. 2015. A new way for the oil plant biomass valorization; polyphenols and proteins extraction from

rapeseed stems and leaves assisted by pulsed electric fields.  
Industrial Crops and Products. 74: 309-318.

90. Zagal, E.; Rodríguez, N.; Vidal, I.; Hofmann, G. 2003. Eficiencia de uso y dinámica del nitrógeno en una rotación con y sin uso de residuos. Agricultura Técnica. 63: 298-310.