

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EVALUACIÓN DEL LABOREO REDUCIDO Y EL USO DE ABONOS VERDES
EN MAÍZ DULCE, EFECTO EN ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO Y EN EL
RENDIMIENTO DEL CULTIVO

por

Magdalena RIEPPI ESPASANDÍN

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniera Agrónoma

MONTEVIDEO
URUGUAY
2019

Tesis aprobada por:

Directora:

Ing. Agr. Dra. Florencia Alliaume Molfino

Ing. Agr. MSc. Juan Carlos Gilsanz Martínez

Ing. Agr. PhD. Mario Pérez Bidegain

Fecha: 18 de diciembre de 2019

Autora:

Magdalena Rieppi Espasandín

AGRADECIMIENTOS

Gracias especialmente a Florencia, por su apoyo constante en este trabajo;
a los funcionarios del CRS que colaboraron con el ensayo;
a los docentes y funcionarios del Laboratorio de Suelos de la FAgro
que me ayudaron a realizar los análisis químicos;
a Oscar Bentancur por su apoyo en la parte estadística de la tesis.
Gracias a Patricia, por ayudarme a crecer todos los martes;
a Agustín, genio como el coatí;
a mi madre que tuvo el gusto de leerla;
a mi familia por estar siempre,
y a todos los amigos que me han acompañado en estas etapas de mi vida.
Gracias a Camilo, mi compañero y amigo;
a la inspiración divina,
y en último lugar, ¡gracias a mí!

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. <u>Objetivo general</u>	2
1.1.2. <u>Objetivos específicos</u>	2
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. <u>DEGRADACIÓN Y EROSIÓN DEL SUELO</u>	4
2.1.1. <u>Estado de los suelos hortícolas del Sur del país</u>	4
2.1.2. <u>Modelo USLE/RUSLE: estimaciones del factor C y erosión en sistemas hortícolas</u>	5
2.2. <u>SISTEMAS DE MANEJO DEL SUELO EN HORTICULTURA A CAMPO</u>	7
2.2.1. <u>Laboreo convencional</u>	7
2.2.2. <u>Uso de enmiendas orgánicas</u>	8
2.2.3. <u>Uso de coberturas verdes</u>	10
2.2.4. <u>Laboreo reducido</u>	12
2.3. <u>PRINCIPALES PROPIEDADES DEL SUELO AFECTADAS SEGÚN EL SISTEMA DE LABOREO</u>	13
2.3.1. <u>Materia orgánica y nutrientes</u>	13
2.3.2. <u>Agua en el suelo</u>	15
2.3.3. <u>Propiedades físicas afectadas por el manejo</u>	16
2.4. <u>CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL MAÍZ Y SU RESPUESTA A CONDICIONES EDÁFICAS</u>	17
2.5. <u>HIPÓTESIS</u>	18
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	19
3.1. <u>UBICACIÓN DEL ENSAYO</u>	19
3.2. <u>TRATAMIENTOS</u>	20
3.3. <u>DISEÑO EXPERIMENTAL</u>	20

3.4. MANEJO DEL ABONO VERDE Y DEL CULTIVO COMERCIAL.....	21
3.5. OBSERVACIONES Y MEDICIONES	23
3.5.1. <u>Muestreo de cama de pollo, abonos verdes y malezas</u>	23
3.5.2. <u>Muestreo de suelos</u>	24
3.5.3. <u>Humedad del suelo</u>	25
3.5.3.1. Humedad superficial	25
3.5.3.2. Humedad en profundidad.....	25
3.5.4. <u>Densidad aparente</u>	26
3.5.5. <u>Resistencia a la penetración</u>	26
3.5.6. <u>Crecimiento de las plantas de maíz dulce</u>	26
3.5.7. <u>Análisis foliar</u>	26
3.5.8. <u>Rendimiento</u>	26
3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	27
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	29
4.1. DATOS AGROCLIMÁTICOS	29
4.1.1. <u>Precipitaciones</u>	29
4.2. MATERIALES ORGÁNICOS	30
4.3. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO	32
4.3.1. <u>pH en H₂O y en KCl</u>	32
4.3.2. <u>Carbono orgánico del suelo</u>	34
4.3.3. <u>NO₃ y P</u>	36
4.3.4. <u>Bases intercambiables</u>	38
4.4. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	41
4.4.1. <u>Humedad superficial</u>	41
4.4.2. <u>Humedad en profundidad</u>	43
4.4.3. <u>Densidad aparente</u>	45
4.4.4. <u>Resistencia a la penetración</u>	46
4.5. CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS DE MAÍZ DULCE	49
4.5.1. <u>Análisis foliar</u>	49
4.5.2. <u>Altura de la planta y diámetro del tallo a cosecha</u>	50
4.6. RENDIMIENTO DEL CULTIVO	52
5. <u>CONCLUSIONES</u>	55

6. <u>RESUMEN</u>	58
7. <u>SUMMARY</u>	59
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	60
9. <u>ANEXOS</u>	70

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Abonos verdes y cultivos comerciales realizados desde 2010 a 2015 en la parcela del experimento.....	19
2. Contrastes.....	28
3. Comparación de datos históricos promedio de precipitaciones para la zona y precipitaciones ocurridas durante el periodo en estudio.....	29
4. Materia seca de los materiales orgánicos incorporados.....	30
5. Composición química de los materiales orgánicos utilizados en el ensayo.....	31
6. Valores medios de pH en agua (pH H ₂ O) y en cloruro de potasio (pH KCl) para cada fecha de muestreo, según el tratamiento.....	32
7. Valores medios de % carbono orgánico del suelo para todas las fechas de muestreo, según el tratamiento.....	34
8. Valores promedios de nitrato en el suelo para dos fechas de muestreo, según el tratamiento.....	36
9. Valores promedios de P disponible en el suelo al final del cultivo de maíz, según el tratamiento.....	37
10. Valores promedio de las tres fechas de la suma de bases intercambiables, calcio, magnesio, potasio y sodio.....	38
11. Valores promedios de las concentraciones de bases intercambiables para las tres fechas de muestreo según el tratamiento.....	39
12. Valores promedios de humedad gravimétrica (% HP) en los primeros 10 cm del suelo, para los distintos tratamientos y en las 9 fechas de muestreo.....	41
13. Contrastes para variable % humedad superficial.....	43
14. Valores promedios de mm da agua en el perfil del suelo (10-100cm) para los distintos tratamientos y las 10 fechas de muestreo.....	44
15. Valores medios de DA _p del suelo para la profundidad 1 (5-10 cm) y la profundidad 2 (15-20 cm)	46

16. Valores promedios de la altura de las plantas y del diámetro del tallo al momento de cosecha, según el tratamiento.....	50
17. Valores promedios del % N foliar según el tratamiento.....	51
18. Rendimiento promedio de maíz dulce en toneladas por hectárea y en número de choclos por hectárea según el tratamiento.....	52
19. Contrastes para variables relativas al rendimiento.....	53
Figura No.	
1. Esquema del ensayo.....	21
2. Multiarado, herramienta utilizada para la siembra de maíz dulce en los tratamientos con laboreo reducido.....	22
3. Valores promedios de % de materia orgánica del suelo para 3 fechas de muestreo según el tratamiento.....	35
4. Evolución del % humedad gravimétrica de 0 - 10 cm del perfil del suelo según el tratamiento.....	42
5. Valores promedios de densidad aparente del suelo (DA_p) para la profundidad 1 (a) y la profundidad 2 (b).....	45
6. Valores medios de resistencia a la penetración para cada profundidad (7.5 a 45 cm), según el tratamiento.....	47
7. Valores medios de resistencia a la penetración (línea anaranjada) y valores medios de humedad (barras azules) para la zona entre 15 y 35 cm. del perfil del suelo.....	49
8. Diámetro del tallo, altura promedio de las plantas al momento de cosecha y N foliar.....	51

1. INTRODUCCIÓN

El deterioro de la calidad y la fertilidad del suelo es un problema importante en los predios hortícolas del Sur de Uruguay, ya que afecta la productividad y la sostenibilidad de los sistemas. Esto se debe principalmente a la intensificación de la producción, al laboreo frecuente y a la producción sin agregado de materia orgánica al suelo.

Los cultivos hortícolas dejan pocos residuos aéreos y raíces, por lo que la entrada de materia orgánica al sistema generalmente es baja. En general son cultivos anuales, muchos de ellos de baja cobertura y ciclos cortos, dejando el suelo descubierto por largos períodos. Para la preparación del suelo se realizan varias intervenciones y laboreos por año lo que, sumado a las características antes mencionadas, determina que sea un rubro con alto riesgo de erosión.

En los últimos años la especialización e intensificación de la producción hortícola ha acelerado los procesos de degradación del suelo debido a un aumento en la intensidad del laboreo, menor cobertura del suelo durante el año y mayor frecuencia de los mismos cultivos. También han aumentado los eventos extremos como ser sequías prolongadas y lluvias intensas, lo que lleva a que el riesgo de erosión y la deficiencia hídrica de los cultivos (principalmente los de primavera-verano), sean factores a tener en cuenta.

Mediante el uso de tecnologías apropiadas es posible recuperar o mantener la calidad del suelo bajo explotación agrícola. En horticultura se han propuesto prácticas promisorias para mejorar o atenuar su impacto como ser: la rotación de los cultivos, en algunos casos con pradera cuando la superficie del predio lo permite, el uso de canteros con largos y pendientes adecuadas, la incorporación de enmiendas orgánicas y el uso de abonos verdes. La implementación de estas prácticas por parte de los productores, fomentadas en muchos casos por proyectos institucionales, logró aumentar los niveles de materia orgánica de los suelos y reducir la erosión, pero la pérdida de suelo continúa siendo mayor que la tolerable para estos suelos.

Estudios previos han demostrado que el laboreo reducido junto con el uso de abonos verdes sembrados sobre camellones, logra reducir el escurrimiento y la pérdida de suelo por erosión, además de aumentar la infiltración y la humedad del suelo. Esta tecnología se ha comenzado a estudiar para las condiciones edáficas y climáticas de Uruguay, y aparece como una buena alternativa para el manejo de suelos en horticultura, pero presenta aún poca apropiación por parte de los productores debido a algunas dificultades prácticas. Uno de los problemas que se observa es la deficiencia de N y una posible compactación de los suelos, lo que muchas veces resulta en un menor rendimiento de los cultivos con este manejo de suelo que los que tuvieron laboreo convencional y agregado de materia orgánica. Entonces la pregunta es cómo levantar

estas limitantes, para qué cultivos, cómo ajustar la fertilización, qué combinaciones de abonos verdes y cómo manejarlos para mejorar las condiciones físicas, hídricas y químicas del suelo para el cultivo comercial siguiente.

En este trabajo se plantea avanzar en el conocimiento de los efectos del laboreo reducido en la producción hortícola, en cultivos realizados sobre camellones y con suelos de textura fina, mediante el uso de abonos verdes y el agregado de cama de pollo. En el experimento se incluye el uso de coberturas verdes mixtas, incluyendo el nabo forrajero, con el objetivo de disminuir la compactación del suelo mediante el laboreo natural de las raíces de esta especie; logrando una adecuada implantación, desarrollo y rendimiento de un cultivo de maíz dulce mediante esta tecnología de manejo del suelo.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

El presente trabajo tuvo como objetivo general evaluar los efectos del laboreo reducido, el uso de abonos verdes (trigo y nabo forrajero) y el agregado de cama de pollo, en algunas propiedades físicas y fisicoquímicas del suelo, y en el rendimiento del cultivo de maíz dulce.

1.1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de esta tesis fueron los siguientes:

- Evaluar el efecto de diferentes manejos de suelo en algunas propiedades físicas (humedad en superficie, humedad en profundidad, densidad aparente y resistencia a la penetración) y fisicoquímicas (concentración y contenido de carbono, pH, concentración de nitratos, fósforo y bases) del suelo.

- Estudiar si la incorporación del nabo forrajero como abono verde tiene efecto en la reducción de la compactación del suelo.

- Reconocer el efecto de los distintos tratamientos en el crecimiento de las plantas de maíz dulce: diámetro y altura de las plantas a cosecha, y nitrógeno foliar.

- Determinar el efecto de diferentes manejos de suelo en el rendimiento comercial del cultivo de maíz dulce (toneladas y no. de choclos por hectárea).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La producción hortícola en Uruguay tiene una relevancia social, económica y ambiental importante, ya que es el principal abastecedor de verduras del mercado interno y el tercer rubro en número de productores familiares, después de la ganadería de carne y de leche (Sganga et al., 2014). Según el Censo general agropecuario del año 2011, el 86% de los productores que tienen como ingreso principal la horticultura son de tipo familiar (Sganga et al., 2014). La superficie anual de cultivos hortícolas (sin incluir papa) comprende alrededor de 10 mil hectáreas y los principales cultivos según superficie son cebolla, zapallos, zanahoria y boniato. Se producen en torno a 200 mil toneladas de hortalizas por año (MGAP. DIEA, 2017).

En Uruguay el cultivo de maíz dulce (*Zea mays* (L.), var. *sacharata* o var. *indentata*) ocupa un total de 204 hectáreas, y se siembran 120 hectáreas en la zona Sur y 84 hectáreas en la zona Norte del país (MGAP. DIEA, 2017). Es un cultivo que demanda mucha mano de obra y es cultivado principalmente por productores familiares. El maíz dulce es considerado una hortaliza, cuya mazorca o choclo de granos inmaduros, tiernos y con alto contenido de azúcar (principalmente sacarosa), se destina al consumo en fresco o industrializado (enlatado o congelado). Actualmente en Uruguay el único destino de los choclos es el consumo en fresco, ya que las plantas industriales que elaboraban choclo congelado han desaparecido. Es un cultivo de verano que se realiza a campo, generalmente en seco, el cual produce uno o dos choclos por tallo según el cultivar. Para la preparación del suelo comúnmente se realiza laboreo convencional y se siembra sobre surcos o canteros levantados entre 10 y 20 cm del nivel del suelo. La siembra se realiza en fila simple en el caso de surcos y fila doble sobre canteros, sembrándose entre 4 y 6 plantas por metro lineal según el destino del choclo (Paullier et al., 2014). El rendimiento promedio nacional es de 5,7 Mg/ha (MGAP. DIEA, 2017) y se producen en torno a 2 mil toneladas de choclo por año (IMM. CAMM, 2019).

En las últimas décadas el sector hortícola uruguayo ha seguido un camino de intensificación y especialización de los sistemas productivos. Entre los años 2000 y 2011 el número de explotaciones especializadas en horticultura pasó de 6950 a 3155, y la superficie dedicada al rubro disminuyó a la mitad (MGAP. DIEA 2001, 2013). Esto llevó a que los productores que continuaron en la producción de hortalizas debieran producir más para adaptarse a un contexto socioeconómico desfavorable. Lograron esto mediante un aumento del área de hortalizas por predio, pero sin aumentar el área total de los predios; y una mejora en los rendimientos de los cultivos, basada fundamentalmente en un incremento del uso de insumos externos y del riego. La estrategia de intensificación aumentó la presión sobre suelos con calidad física y biológica ya deteriorada, comprometiendo la sostenibilidad de los sistemas (Dogliotti et al., 2012).

Si bien en el país se han evaluado diferentes prácticas de manejo para revertir la situación descrita, es necesario profundizar en la investigación para el desarrollo e

implementación de tecnologías de manejo de suelos que permitan mejorar su calidad bajo estos sistemas productivos. En este sentido, se deben tener presente los tres principios en los cuales se basa la agricultura de conservación (CA): laboreo reducido o mínima alteración mecánica del suelo, cobertura orgánica permanente del suelo (cultivo o residuos muertos) y rotaciones de cultivos diversificadas (FAO, 2008).

En esta sección se presenta una revisión de la magnitud de la erosión y degradación de los suelos dedicados a la producción hortícola en Uruguay; una herramienta o modelo utilizado para estimar la erosión; y diferentes sistemas o manejos del suelo en horticultura, incluyendo cultivos de cobertura, enmiendas orgánicas y laboreo reducido; finalizando con una revisión del impacto que tienen estas prácticas conservacionistas en diferentes propiedades y funciones del suelo.

2.1. DEGRADACIÓN Y EROSIÓN DEL SUELO

2.1.1. Estado de los suelos hortícolas del Sur del país

Algunos de los aspectos más relevantes para la sostenibilidad de los predios hortícolas son las prácticas de manejo vinculadas al mantenimiento de la calidad física, química y biológica del suelo; y a la reducción de la erosión. La mayor producción de hortalizas en Uruguay se localiza en la zona Sur del país, sobre suelos con una larga trayectoria en la producción agrícola, lo que sumado a la falta de medidas de manejo conservacionistas, ha llevado al desgaste y pérdida de calidad de los suelos. Según la carta de erosión de suelos, Montevideo y Canelones son los departamentos que presentan mayor incidencia y severidad de erosión hídrica del país (MGAP. RENARE, 2005).

En un relevamiento realizado entre los años 2004 y 2007 a 16 productores hortícolas del departamento de Canelones (Proyecto EULACIAS) se encontró que la mayoría de los predios presentaban problemas graves de sistematización: surcos y canteros en dirección de pendientes fuertes y muy largas, escurrimiento de agua de un cuadro a otro, y desde y hacia predios vecinos; y acumulación de excesos de agua en áreas deprimidas o finales de canteros. En ningún caso se constató que los productores tuvieran una planificación de la secuencia de cultivos, repitiendo generalmente el mismo cultivo en el mismo cuadro durante un número variable de años, sin realizar rotaciones. En los predios hortícolas ganaderos el área con pasturas no rotaba con la producción hortícola. Solo el 12,5% de los predios en estudio utilizaban abonos verdes y el 31 % incorporaba enmiendas orgánicas al suelo, usualmente cama de pollo, y lo hacían antes de los cultivos más demandantes del predio como ser el tomate (Dogliotti et al., 2012).

Dentro del Proyecto EULACIAS se evaluó el estado del recurso suelo utilizando como indicador el contenido de carbono del horizonte superficial. Se evaluaron 61 cuadros de 16 predios hortícolas y hortícolas-ganaderos de Canelones. Del

total de muestreos realizados, solamente el 5% (3 cuadros) presentaron un contenido de C mineralizable actual (CMA) mayor al 50% del C mineralizable original (CMO) del suelo. En el 15% de los cuadros (9) el CMA estaba entre 1/3 y la mitad del CMO, mientras que en el 80 % de los cuadros (49) los suelos presentaban un contenido de CMA menor al 33% del CMO (Dogliotti et al., 2012).

La estabilidad estructural medida como el diámetro medio geométrico (DMG) de los agregados fue 18% menor en cuadros productivos que en sitios imperturbados de referencia en predios hortícolas de Canelones, participantes del Proyecto EULACIAS. Para el tipo de suelo Vertisoles esta diferencia fue mayor, siendo el DMG 28% menor en los cuadros productivos que en los sitios imperturbados. Esta reducción en la estabilidad estructural, debida fundamentalmente a una alta intensidad de laboreo, implica un deterioro de la calidad física del suelo (mayor compactación y menor capacidad de infiltración del agua) y una menor resistencia a la erosión. La capacidad de agua disponible del suelo fue en promedio 11% menor en los cuadros productivos que en los sitios de referencia para todos los tipos de suelo evaluados. Se encontró una correlación positiva entre el contenido de carbono orgánico del suelo y su capacidad de agua disponible (Alliaume et al., 2013).

La situación del estado del recurso suelo en cuanto al contenido de C orgánico en la zona rural de Montevideo es similar. Gómez et al. (2013) muestrearon 96 cuadros en 38 predios hortícolas de Montevideo, donde sólo el 22% de los cuadros presentaban un contenido de CMA mayor al 50% del CMO, el 19% tuvo un contenido de CMA que se encontraba entre el 25 y 50% del CMO, y el resto de los cuadros (59%) presentaron un contenido de CMA por debajo del 25% del CMO.

2.1.2. Modelo USLE/RUSLE: estimaciones del factor C y erosión en sistemas hortícolas

El modelo USLE/RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo/Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada) permite estimar cuantitativamente la tasa de erosión que ocurriría con un determinado uso y manejo del suelo. Este modelo ha sido calibrado y validado para sistemas agrícolas extensivos, forestales y agrícolas pastoriles en Uruguay (Durán y García Préchac 2007, Hill et al. 2008). El programa EROSIÓN 6.0 es la herramienta utilizada para planificar el uso del suelo y cumplir con la reglamentación vigente en términos de conservación de suelos en Uruguay. Para el uso de esta herramienta en horticultura es necesario determinar localmente valores del factor C estimados mediante la ecuación de la versión revisada RUSLE (Renard et al., 1997).

Los cultivos hortícolas en Uruguay presentan algunas particularidades: son plantados sobre surcos o canteros, en algunos casos bajo riego, existe una gran diversidad de especies con diferente capacidad de cobertura del suelo y con distinto largo de ciclo, y generalmente son realizados sobre suelos ya degradados. Para obtener

valores locales del factor C para sistemas hortícolas fue necesario estimar la Relación de Pérdida de Suelo (RPS) para diferentes cultivos hortícolas y con diferentes manejos de suelo, mediante las mediciones de los siguientes subfactores: cobertura vegetal, cobertura por residuos y rugosidad superficial.

Según estimaciones realizadas utilizando el modelo RUSLE, la tasa de erosión puede bajar a la mitad o a la tercera parte con medidas de control de erosión y aumento de la cobertura del suelo; pero en horticultura continua y con laboreo convencional en Canelones, la tasa de erosión estimada es mayor a la tolerable para esos suelos, aún con buena sistematización y uso de abonos verdes (Dogliotti et al., 2012).

En un trabajo presentado por Hill et al. (2015) se calculó el factor C para 3 predios hortícolas con diferente uso y manejo del suelo: rotación hortícola-ganadera (cultivos hortícolas y pasturas), rotación hortícola (con uso de abonos verdes entre cultivos) y hortícola convencional (solo cultivos hortícolas). El predio con rotación hortícola-ganadera presentó el factor C más bajo (0,106), ya que durante las pasturas el suelo permanecía cubierto y sin laboreo. La rotación hortícola presentó un valor de factor C dos veces mayor (0,214) y la hortícola convencional 3 veces mayor (0,310). Esto se explica debido a que las rotaciones hortícolas realizan laboreo de suelo todos los años y la cobertura del suelo es baja durante gran parte del año. La rotación hortícola tiene un valor de factor C intermedio ya que el uso de abonos verdes entre los cultivos, además de mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo, permitió mantener el suelo cubierto durante los períodos sin cultivo comercial. La pérdida de suelo estimada para el manejo hortícola convencional (sin abonos verdes) fue mayor a la tolerable para todas las situaciones de pendiente analizadas (1%, 3% y 5%). En los sistemas que incorporaron abonos verdes (rotación hortícola) y en los que incluyeron pasturas (rotación hortícola ganadera) se redujo la tasa de erosión estimada en 30% y 60% respectivamente, para todas las pendientes.

De acuerdo a resultados en horticultura de Alliaume et al. (2014) los valores de RPS varían según los diferentes manejos del suelo, En este ensayo el tratamiento de laboreo reducido con abono verde y agregado de cama de pollo tuvo un valor de RPS cercano a 0 durante todo el año. El manejo de suelo con laboreo convencional y con uso de abono verde y cama de pollo tuvo un RPS entre 0 y 0,4; y los manejos de laboreo convencional sin abono verde variaron entre 0 y 1, pero con altos valores de RPS en los períodos de invierno, donde no estaba presente el cultivo comercial. A partir de los valores de RPS se estimó el factor C anual para cada tratamiento. Los tratamientos con abonos verdes tuvieron un valor de factor C considerablemente menor (0,04-0,13), independientemente del tipo de laboreo, que los tratamientos que no tuvieron abonos verdes (0,38-0,43). La erosión anual estimada mediante el modelo RUSLE fue más de 10 veces menor en los tratamientos con laboreo reducido que en los de laboreo convencional sin agregado de estiércol ni abonos verdes, para todas las pendientes y largos de canteros analizados. Solamente los tratamientos con laboreo reducido tuvieron

valores de erosión de suelo menores que el límite de tolerancia de 7 toneladas por hectárea por año.

Mancassola et al. (2016) presentaron valores de RPS para 16 cultivos hortícolas, en los distintos períodos del cultivo. Los valores más altos de RPS se encontraron en los períodos de preparación del suelo con valores entre 0,3 y 0,5. En el período de siembra e instalación de los cultivos las RPS son más variables dependiendo del cultivo, pero en general también fueron altas: valores de 0,1 en aquellos cultivos que cubren el cantero rápidamente y de 0,5 para cultivos con crecimiento inicial muy lento (cebolla y ajo). Los valores más bajos estuvieron en los períodos de pleno crecimiento hasta fin de cosecha, pero en los casos de los cultivos de lento crecimiento donde la arquitectura de la planta no cubre el surco ni el entresurco, los valores de RPS fueron altos durante todo el ciclo. Las RPS de los cultivos hortícolas están ligadas a las particularidades de cada cultivo y la utilidad de estos valores está en considerar estas características (Mancassola et al., 2016).

Los valores de RPS calculados en estos trabajos pueden ser utilizados para estimar el factor C de los distintos sistemas hortícolas mediante el uso del programa EROSIÓN 6.0. Esta herramienta permite disponer de información para apoyar la toma de decisiones en los predios hortícolas, mediante las estimaciones de erosión que ocurrirían para los distintos cultivos, con diferentes coberturas del suelo y sistemas de laboreo.

2.2. SISTEMAS DE MANEJO DEL SUELO EN HORTICULTURA A CAMPO

2.2.1. Laboreo convencional

El laboreo convencional se basa en el trabajo mecánico del suelo hasta lograr que la superficie del mismo se encuentre apta para ser plantada. Este manejo es el que predomina en los predios hortícolas de Uruguay y tiene como objetivos generales el control de malezas, el incremento de la disponibilidad de nutrientes, la descompactación a corto plazo del suelo y la preparación de la cama de siembra.

El laboreo de suelos en los predios hortícolas incluye el uso de excéntrica, cincel, arados de disco y de reja, rotovador, encanterador, etc.; implementos que causan un gran deterioro de las propiedades físicas del suelo. La horticultura se caracteriza por una intensidad alta del uso del suelo con varios cultivos y labores por año, y esto es lo que ha llevado a la degradación y erosión de los suelos que han sido utilizados para este rubro durante más de 40 años.

El contenido de materia orgánica del suelo es considerado un indicador principal en la evaluación de la calidad de suelo. Los principales procesos que llevan a la pérdida de materia orgánica son la erosión, el balance negativo de entradas y salidas de

compuestos orgánicos y la oxidación acelerada por el laboreo de los suelos (Durán y García Préchac, 2007). En las condiciones de Uruguay el proceso de erosión es el que tiene mayor importancia en la pérdida de materia orgánica del suelo, explicando entre 50-90% de las pérdidas totales de la misma en los sistemas de cultivos sin pasturas (Clérici et al., 2004).

El laboreo convencional continuo lleva a una disminución del contenido de materia orgánica del suelo. En un ensayo de larga duración en el INIA La Estanzuela (1963-2003) se midió la evolución del contenido de carbono orgánico del suelo en diferentes tratamientos en cuanto al manejo del suelo. En el sistema de agricultura continua con laboreo convencional se observó una caída continua del contenido de C orgánico del horizonte A_p, mientras que, en la rotación de agricultura con 4 años de pasturas, el carbono cae rápidamente en la fase de cultivos con laboreo y se recupera durante la pastura. Luego de 40 años las parcelas que rotaban agricultura con pasturas tuvieron un contenido mayor, de más del 1%, en C orgánico que las parcelas con agricultura continua. Algo similar sucede con el contenido de N total, donde los tratamientos mencionados tienen una diferencia acumulada de aproximadamente 2000 kg N total en una hectárea, considerando los primeros 20 cm de profundidad (Morón, 2003).

2.2.2. Uso de enmiendas orgánicas

Las enmiendas orgánicas se refieren al aporte de material orgánico (turba, hojarasca, abonos de origen animal o vegetal, etc.) al suelo para aumentar el contenido de materia orgánica del mismo.

El uso de enmiendas orgánicas para mejorar las propiedades físicas y químicas es una práctica común en el manejo de suelos dedicados a la producción hortícola del país. En el Sur el material más frecuentemente usado es la cama de pollo (mezcla de estiércol de pollo con cáscara de arroz en diferentes proporciones), y en el Norte, el mantillo de bosque (mezcla de estiércol vacuno y ovino, con suelo y restos de los montes donde duermen los animales).

Como características generales las enmiendas orgánicas presentan gran variabilidad en su composición, con un contenido de nutrientes generalmente bajo. En un estudio realizado por Barbazán et al. (2011) dónde se analizaron las propiedades físicas y químicas de los materiales orgánicos más utilizados en Uruguay (estiércol de gallina y de vaca, cama de pollo con cáscara de arroz y aserrín, mantillo de bosque y compost) se confirma la gran variabilidad que existe entre y dentro de los grupos, lo que determina la necesidad de analizar los materiales antes de agregarlo al suelo; siendo las determinaciones más importantes a realizar la concentración de N y P, y el contenido de humedad (debido a que las aplicaciones son realizadas frecuentemente en base a volumen).

La enmienda utilizada en este trabajo es la cama de pollo con cáscara de arroz, la cual presenta un porcentaje de humedad promedio de 46%, densidad $0,40 \text{ g/cm}^3$, con valores promedios de N, P y K de 16, 13 y $9,3 \text{ g. kg}^{-1}$ respectivamente; y una relación C/N de 18,2 (Barbazán et al., 2011). La gran variabilidad en los contenidos de nutrientes dentro de las muestras de cama de pollo se atribuye también al número de crías de pollos de la cama, ya que hace variar la proporción de estiércol en la mezcla final.

Según información del uso de enmiendas orgánicas a nivel nacional, el agregado de las mismas al suelo aumenta el rendimiento de los cultivos (García y Reyes 2001, Do Campo et al. 2005), aumenta el contenido materia orgánica, de P y de K (García y Reyes, 2001); y su aplicación periódica mejora las propiedades físicas del suelo: aumenta el índice de estabilidad estructural (Do Campo et al., 2005) y la porosidad total del suelo (Silva et al., 1987).

En un experimento dónde se agregaron enmiendas orgánicas a un suelo y se incubaron durante 11 semanas se observó que todos los materiales agregados (cama de pollo, estiércol de gallina y estiércol de vaca) produjeron un aumento en la actividad biológica del suelo medido como CO_2 respirado y contenido de carbono y nitrógeno en la biomasa microbiana del suelo; mientras que la actividad biológica disminuyó en los tratamientos con agregado de fertilizante nitrogenado con respecto al testigo, como consecuencia de una caída de pH y un aumento de la salinidad del suelo. El estiércol de ave, tanto cama de pollo como estiércol de gallina, fueron los que aportaron mayor cantidad de nitrógeno disponible, aumentando los valores de nitrógeno mineral en el suelo (Del Pino et al., 2008).

Sin embargo, la aplicación periódica de enmiendas orgánicas puede ocasionar la acumulación de grandes cantidades de P en el suelo, principalmente cuando la dosis a aplicar de estos materiales se calcula en base al N que requiere el cultivo. Esto se debe a que la relación N/P de las enmiendas generalmente es más baja que la relación N/P que absorbe el cultivo (Eghball y Power, 1999). Estos autores sugieren estimar la dosis del material a usar basándose en el contenido de fósforo con el fin de reducir la acumulación de fósforo en el suelo, y evitar la eutrofización de cuerpos de agua.

Otra limitante de la aplicación excesiva de cama de pollo puede ser la acumulación de sales y el aumento de la conductividad eléctrica del suelo, principalmente en cultivos protegidos. La cama de pollo es una enmienda orgánica que presenta valores altos de conductividad eléctrica, probablemente debido a la presencia de NaCl, ya que esta sal es agregada a las raciones para que sean más palatables para los animales (Barbazán et al., 2011). La presencia de sodio en el suelo tiene un efecto perjudicial en la agregación del mismo, particularmente en regiones secas o en condiciones de invernáculo, mientras que en climas húmedos el sodio intercambiable es lixiviado en profundidad, pudiendo contaminar las capas subterráneas de agua (Guo et al., 2019).

2.2.3. Uso de coberturas verdes

Se llama coberturas verdes a todos los cultivos, residuos de cultivos y restos vegetales que se instalan o agregan al suelo con el objetivo de mantener y/o mejorar su calidad física, química y biológica (Arboleya et al., 2011). Se pueden usar con diversos fines: cubrir la superficie del suelo (cultivos de cobertura), incrementar su fertilidad (abonos verdes), o reciclar nutrientes (cultivos trampa).

Los abonos verdes son cultivos secundarios que normalmente son sembrados intercaladamente al cultivo principal siendo posteriormente manejados dependiendo de los objetivos del abono verde. La forma de manejar los abonos verdes depende de las condiciones del suelo, del clima, de la especie de abono verde implantado, de las herramientas disponibles (rolos/rodillos, romperrama, chirquera, arado o herbicida) y del sistema productivo (siembra directa, laboreo reducido o laboreo convencional), el cual se corta, se quema o se entierra según el objetivo de producción (Arboleya et al., 2011).

Con el uso de las coberturas verdes se protege al suelo contra la erosión, se adiciona biomasa (aporte de materia orgánica y nutrientes), se mantiene la humedad del suelo (ya que la cobertura favorece la infiltración y disminuye la evaporación del agua), atenúa la variación de temperaturas, mejora la estructura del suelo y aumenta su actividad biológica. También promueve la movilización y reciclaje de nutrientes, disminuye la lixiviación por la gran cantidad de raíces activas en el perfil, disminuye la infestación de malezas (por efectos alelopáticos y sombreadamiento principalmente) y reduce la incidencia de plagas y enfermedades (Peñalva y Calegari, 1999).

Las distintas especies utilizadas como abonos verdes (leguminosas, gramíneas o crucíferas) proporcionan diferentes beneficios a los cultivos siguientes y tienen características complementarias para mejorar la calidad del suelo. Las leguminosas fijan nitrógeno atmosférico y contribuyen al aumento de la disponibilidad de este nutriente para los cultivos siguientes. Las gramíneas y crucíferas tienen elevada capacidad de reciclaje de nutrientes, reduciendo los riesgos de lixiviación (Amado et al., 2002). Las mezclas son utilizadas para combinar características favorables de cada familia o especie. Los abonos verdes utilizados en este trabajo fueron trigo (*Triticum aestivum*) y una mezcla de trigo y nabo forrajero (*Raphanus sativus* (L.) var. *oleiferus*).

El nabo forrajero, es un abono verde de otoño-invierno. Se trata de una planta anual que pertenece a la familia de las crucíferas. La época de plantación es de marzo a junio. La siembra se realiza al voleo o en línea, a una densidad recomendada entre 10-30 kg de semilla por hectárea, según se siembre en mezcla o solo. Tiene rápido crecimiento inicial y produce gran cantidad de biomasa (3-9 Mg/ha de materia seca). Las ventajas de este abono verde es que presenta una elevada capacidad de reciclaje de nutrientes (principalmente nitrógeno) y solubiliza elementos como P que quedan disponibles para el cultivo siguiente. Otra ventaja es que produce importantes efectos físicos en el suelo,

ya que presenta raíces pivotantes profundas capaces de romper capas compactas de suelo. Además, esa capacidad de desarrollar raíces engrosadas genera grandes canales al momento de descomponerse que mejoran la estructura y drenaje del suelo (Gilsanz, 2012). El nabo forrajero se destaca por su arado biológico y por el control de enfermedades (Peñalva y Calegari, 1999). No se recomienda su uso en suelos degradados ya que resulta en un bajo rendimiento. Es un abono verde eficiente en el control de malezas durante su crecimiento, pero su rápida degradación luego de muerto da lugar al crecimiento de malezas y a problemas asociados con la baja cobertura del suelo (Gilsanz, 2012).

El trigo es una gramínea invernal, presenta tolerancia a las bajas temperaturas, pero no tolera falta o excesos pronunciados de humedad. Se adapta bien a suelos de fertilidad media, con pH entre 5.5-7.5, es sensible a la acidez (Carámbula, 2007). Prefiere suelos medianamente texturados. La densidad de siembra es de 100-120 kg de semilla por hectárea. Las principales ventajas del trigo como abono verde son prevenir la erosión, suprimir maleza (debido a la competencia por agua, luz y nutrientes, en especial hacia la primavera), reciclar excesos de nutrientes (N, P y K) y adicionar materia orgánica. Es una fuente importante de residuo produciendo entre 10 y 12 toneladas de materia seca por hectárea. El residuo es de fácil manejo e incorporación. Las raíces del trigo son mejoradoras de la parte superior del suelo. Una desventaja del trigo es que presenta mayor susceptibilidad a enfermedades y plagas que el centeno y la avena. Es posible mezclar con leguminosas anuales (Gilsanz, 2012).

La relación carbono/nitrógeno (C/N) de los abonos verdes resulta importante ya que su valor es un buen indicador de la facilidad o dificultad con la que se degradará la materia orgánica. Las gramíneas presentan una relación C/N alta (mayor a 25/1), favorecen los procesos de inmovilización temporaria del nitrógeno mineral de la solución del suelo por parte de los microorganismos, por lo que presentan una descomposición lenta. Los abonos verdes con una relación C/N menor a 25/1 (crucíferas y leguminosas) favorecen la mineralización y la rápida liberación de nitrógeno y de los demás nutrientes presentes en su biomasa (Amado et al. 2002, Silva et al. 2009). Estos procesos están relacionados también a las condiciones edafoclimáticas, como ser la temperatura, la humedad y la textura del suelo (Amado et al., 2002).

Al momento de floración el trigo presenta una relación C/N aproximada de 32/1, mientras que una combinación de avena y nabo forrajero tiene una relación C/N de 23/1, siendo la relación C/N de avena sola 26/1 (Gilsanz, 2012). La menor relación C/N de la mezcla favorece la mineralización y la rápida descomposición de sus residuos.

Varias investigaciones demuestran que los residuos de gramíneas se descomponen más lentamente, proporcionando mayor control físico de malezas, pero al mismo tiempo causando inmovilización de N, lo que muchas veces impacta negativamente en los rendimientos de los cultivos siguientes, principalmente en los

primeros años de uso de abonos verdes de gramíneas (Teasdale et al. 2008, Wang et al. 2008, Vollmer et al. 2010). Una estrategia utilizada para evitar el déficit de N es agregar otra fuente de N a los abonos verdes de gramíneas. Por otro lado, el uso de abonos verdes de leguminosas (si se logra una biomasa suficiente) pueden proporcionar todo el N requerido para el cultivo siguiente, haciendo que los rendimientos sean similares a los tratamientos sin uso de abonos verdes (Vollmer et al., 2010).

Estos resultados evidencian la necesidad de realizar localmente estudios a largo plazo respecto al efecto residual de los abonos verdes sobre distintas variables de suelo, en especial el contenido de materia orgánica y las necesidades de fertilización para los cultivos subsiguientes.

2.2.4. Laboreo reducido

El laboreo reducido, mínimo laboreo o laboreo conservacionista se refiere a todo aquel que mantiene al momento de implantación del cultivo una cobertura de residuos orgánicos de al menos el 30% de la superficie del suelo (Allmaras et al., 1991). La relación entre la pérdida de suelo y cobertura no es lineal, sino curvilínea, y el efecto de la cobertura reduce significativamente la erosión en los rangos de valores más bajos de cobertura: un 30% de cobertura logra reducir la erosión más del 60% (Shelton et al., 1992).

En los predios hortícolas del Sur de Uruguay la práctica de laboreo reducido no ha tomado relevancia aún ya que los suelos tienen texturas finas y en horticultura los cultivos son realizados sobre canteros, precisan gran aireación del suelo y muchos de ellos requieren que se mueva la tierra para ser cosechados (boniato, papa, cebolla, ajo, remolacha, etc.), lo que implica laborear el suelo varias veces al año y que el suelo se encuentre sin cobertura por períodos prolongados.

Existen algunos productores hortícolas que han adoptado el laboreo conservacionista con el objetivo de preservar la calidad y la fertilidad del suelo; y evitar su degradación (principalmente por erosión); ya que es un problema que afecta la sostenibilidad los predios dedicados a la horticultura en el Sur de Uruguay.

La tecnología de laboreo reducido que se ha implementado es la siembra de abonos verdes sobre camellones, luego el abono verde es cortado o quemado con herbicida, y se instala el cultivo comercial sobre la cobertura del mismo. Esta tecnología implica que se mueva el suelo menos veces por año (solamente previo a la siembra del abono verde), además de mantener la superficie del suelo cubierta durante los períodos sin cultivo comercial.

El laboreo conservacionista en combinación con cultivos de cobertura mejora la calidad del suelo: aumenta el contenido de materia orgánica, conserva la biología del

suelo y mejora su fertilidad (Peigné et al. 2007, Arboleya et al. 2012, Corres et al. 2015). También reduce el escurrimiento y la erosión, y mejora la conservación de agua del suelo (Cook et al. 2006, Devkota et al. 2013, Alliaume et al. 2014).

Sin embargo, los efectos del laboreo reducido en la estructura del suelo no son tan claros. Algunos trabajos muestran que el laboreo conservacionista tiene un riesgo de compactación mayor, dificultando la emergencia y la instalación de los cultivos (Peigné et al., 2018); mientras que otros autores señalan que la densidad aparente es menor y la estabilidad de los agregados mayor en los suelos con laboreo conservacionista en comparación con el laboreo convencional (De Souza Neto et al. 2008, Arboleya et al. 2012, Crittenden et al. 2015).

Muchas investigaciones sugieren que el laboreo reducido y/o la labranza cero reducen los rendimientos de los cultivos (Alliaume et al. 2014, Pittelkow et al. 2015), pero en algunos casos el laboreo reducido puede producir rendimientos equivalentes (Arboleya et al., 2012) o incluso mayores que el laboreo convencional (Wang et al. 2008, Devkota et al. 2013). La reducción en los rendimientos es más frecuente en los períodos de transición de laboreo convencional a laboreo reducido; y podrían estar relacionados con una menor disponibilidad de nutrientes (principalmente nitrógeno), mayores dificultades en la instalación del cultivo (Alliaume et al., 2014) y los posibles efectos de compactación del suelo (Peigné et al., 2018). La tecnología de abonos verdes con laboreos conservacionistas lleva a una descomposición más lenta del residuo, retrasando la mineralización de los nutrientes y provocando deficiencias en los cultivos que deben ser compensadas con fertilización extra.

Otra dificultad importante cuando se realizan laboreos conservacionistas es el manejo de las malezas, ya que el laboreo es generalmente utilizado para el control de las mismas (Peigné et al., 2007). Esto tiene mayor impacto en los predios orgánicos en los cuales la incidencia de malezas aumenta más de 50 % cuando se disminuye la intensidad del laboreo (Cooper et al., 2016).

2.3. PRINCIPALES PROPIEDADES DEL SUELO AFECTADAS SEGÚN EL SISTEMA DE LABOREO

2.3.1. Materia orgánica y nutrientes

El laboreo de suelos frecuente en los predios hortícolas provoca que el riesgo de erosión y la oxidación de la materia orgánica aumenten, resultando en una disminución importante del contenido de carbono orgánico del suelo. Las medidas de manejo propuestas por el Proyecto EULACIAS relacionadas al control de la erosión (sistematización de cuadros con pendiente controlada) y aporte de materia orgánica (agregado de estiércol, rotación con abonos verdes y praderas) fueron implementadas en predios hortícolas del Sur de Uruguay, y tuvieron un impacto positivo en el contenido de

C orgánico en la mayoría de los cuadros. El carbono orgánico aumentó en 41 de los 61 cuadros monitoreados y disminuyó en 17 casos, siendo el promedio de incremento de 22% (Dogliotti et al., 2012).

El laboreo conservacionista, ya sea laboreo reducido o labranza cero, es otra medida de manejo que permite mantener o mejorar el contenido de carbono de los suelos. En un estudio de largo plazo donde compararon la influencia del laboreo cero con los tratamientos sin labrear, estos últimos tuvieron un 7 % más de carbono orgánico en los primeros 18 cm de suelo, y la escorrentía y la erosión se minimizaron con este manejo.

Varios estudios han demostrado que el laboreo reducido aumenta el contenido de carbono del suelo, así como la cantidad, actividad y diversidad de microorganismos en las capas superiores del suelo (Cookson et al. 2008, Arboleya et al. 2012). La labranza de conservación también tiende a aumentar la biomasa y la diversidad de las lombrices de tierra (Gilsanz 2012, Peigné et al. 2018).

El laboreo conservacionista genera una estratificación de la fertilidad del suelo, con mayor contenido de carbono orgánico del suelo (COS), N total, P disponible, y también mayor densidad de raíces en la capa superficial del suelo (0-15 cm de profundidad), en comparación con un manejo convencional (Peigné et al. 2007, 2018). En un estudio realizado por D'Haene et al. (2008a) se observó que los campos manejados con laboreo reducido tuvieron una estratificación más pronunciada en el porcentaje de nitrógeno total y en la relación C/N que los campos que tuvieron laboreo convencional, a pesar de tratarse de cultivos de raíces y tubérculos que requieren movimiento de tierra en la cosecha.

En el mismo sentido, en un trabajo realizado en el INIA Las Brujas (Canelones) entre los años 2012 y 2015 con diferentes manejos de suelo en horticultura, se observó que luego de tres años los tratamientos con laboreo reducido presentaron niveles de carbono activo y carbono orgánico mayores que los que tuvieron laboreo convencional. En lo que respecta a las propiedades biológicas, la abundancia de artrópodos y lombrices en general fue baja, pero el manejo convencional fue el que presentó los menores valores (Corres et al., 2015).

La disponibilidad de nitrógeno en el suelo también es afectada por el manejo de suelo, ya que depende de varios factores ambientales como la temperatura, humedad, y ubicación del rastrojo, así como la calidad y cantidad del mismo. En los sistemas de laboreo conservacionista el rastrojo queda en la superficie del suelo dando como resultado una descomposición más lenta que en el laboreo convencional, ya que existe un contacto menor de los residuos con la flora microbiana del suelo (D'Haene et al. 2008a, Gilsanz 2012). Esto implica que durante los primeros meses, dependiendo del

abono verde, y de factores del suelo y ambientales, la descomposición del abono verde puede significar una inmovilización neta de N del suelo.

Alliaume et al. (2014) realizaron un ensayo de diferentes manejos de suelo en un cultivo de tomate y observaron que las plantas de tomate que fueron plantadas luego de abonos verdes, ya sea dejado en superficie o incorporado al suelo, presentaron deficiencia de N, observada de forma visual en las plantas y comprobado mediante análisis químico de la composición foliar de N. Los tratamientos que no tuvieron abono verde y se le realizó un manejo de suelo convencional no presentaron deficiencias.

Los tratamientos de laboreo conservacionista generan una gran estratificación del fósforo disponible para las plantas, existiendo una concentración muy alta de fósforo disponible en los primeros 15 cm. en los laboreos conservacionistas en comparación con laboreo convencional, mientras que en las capas más profundas hay mayor concentración en los manejos convencionales (Peigné et al., 2018).

2.3.2. Agua en el suelo

La conservación del agua del suelo es una de las ventajas más importantes del laboreo reducido en la producción hortícola. La eficiencia en el uso del agua es un factor clave para obtener altos rendimientos en los cultivos de primavera-verano, ya que en Uruguay normalmente existe déficit hídrico durante el ciclo de los mismos.

El manejo de suelo con laboreo reducido implica el mantenimiento de residuos orgánicos sobre la superficie del suelo, los cuales actúan como barrera física, protegiendo el suelo del impacto de la gota de agua, reduciendo las pérdidas por evaporación, incrementando la infiltración del agua y el contenido de agua del suelo; y reduciendo el riesgo de erosión (Alliaume et al., 2014).

En un estudio donde compararon el uso de distintos tipos de mulch (polietileno, compost de estiércol, residuo de soja y paja de trigo) durante un cultivo de maíz, encontraron que con el mulch de trigo de 4 toneladas de residuo por hectárea, hubo un aumento en el contenido de agua del suelo durante la mayor parte del crecimiento del cultivo, además de una reducción significativa de la temperatura en la capa superficial del suelo (Cook et al., 2006).

Alliaume et al. (2017) desarrollaron un modelo de balance de agua que permite simular la dinámica del agua para cultivos hortícolas sobre camellones, bajo diferentes manejos de suelo (uso de coberturas verdes y laboreo reducido o convencional) y para suelos de textura fina con presencia de horizonte argílico; bastante frecuentes en los predios dedicados a horticultura en el Sur de Uruguay. Las simulaciones realizadas para 10 años mostraron que las necesidades de riego fueron menores y menos variables con

un manejo de laboreo reducido y uso de mulch orgánico, en comparación con un manejo de laboreo convencional.

2.3.3. Propiedades físicas afectadas por el manejo

Si bien el laboreo reducido tiene efectos positivos en algunas propiedades químicas de la capa superficial del suelo, la compactación tiende a aumentar y la porosidad total es menor con laboreos conservacionistas (Peigné et al., 2007). Peigné et al. (2018) encontraron que la compactación del suelo luego de 10 años de experimentación fue mayor en manejos de laboreo reducido en comparación con los tratamientos labreados, especialmente entre los 15 y 30 cm de profundidad. La compactación del suelo limitó el crecimiento de las raíces en esas profundidades en los laboreos conservacionistas.

El uso de abonos verdes de la familia de las crucíferas es ventajoso cuando los suelos están altamente compactados, ya que las raíces de estas plantas dejan canales profundos que facilitan el crecimiento de las raíces del cultivo siguiente. Chen y Weil (2011) estudiaron el crecimiento de un cultivo de maíz en suelos con distintos grados de compactación, y sembrados luego de distintos cultivos cobertura (rábano forrajero, colza y centeno). En los suelos con compactación alta, el maíz logró desarrollar mayor cantidad de raíces profundas en los tratamientos que tuvieron crucíferas previamente, en comparación con los que tuvieron centeno o el testigo (sin cultivo cobertura). Además observaron que los tratamientos realizados luego del rábano forrajero fueron más secos que el resto de los tratamientos. Estos autores sugieren la utilización de cultivos cobertura mixtos para proporcionar los beneficios de las crucíferas y gramíneas de forma simultánea.

Otros autores señalan que la estabilidad de los agregados en la capa superficial del suelo es mayor en los suelos con laboreo conservacionista que en aquellos manejados con laboreo convencional (De Souza Neto et al. 2008, Crittenden et al. 2015). Los abonos verdes en sistemas de siembra directa aumentan la estabilidad de los agregados. Según De Souza Neto et al. (2008) los suelos que tuvieron abonos verdes, tanto gramíneas como leguminosas, en sistemas de siembra directa, presentaron mayor estabilidad de los agregados (un DMG aproximadamente dos veces mayor que los sistemas con laboreo convencional) y mayor densidad aparente del suelo en su capa superficial.

En un trabajo realizado por Corres et al. (2015) luego de tres años de experimentación, los tratamientos con laboreo convencional tuvieron una mayor compactación (mayor densidad aparente y menor porosidad total) que los tratamientos con laboreo convencional.

2.4. CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL MAÍZ Y SU RESPUESTA A CONDICIONES EDÁFICAS

El maíz dulce es un cultivo de gran respuesta al riego. Presenta dos períodos críticos en los cuales hay que evitar el déficit hídrico: desde germinación a final de la emergencia, y desde la salida de la panoja (flor masculina) a la cosecha. Es importante evitar que el agua disponible en el suelo descienda en forma importante entre los diez días que preceden a la emergencia de los estigmas (barbas) y durante los 20 días posteriores a la floración (Paullier et al., 2014).

El déficit hídrico afecta significativamente el rendimiento del cultivo de maíz dulce. En un experimento donde se compararon tres intensidades de riego en un cultivo de maíz dulce (mojado, húmedo y seco), el rendimiento comercial del tratamiento mojado fue 28.9 y 67.3% mayor que los tratamientos húmedo y seco respectivamente. También el tratamiento seco redujo el número de mazorcas por hectárea en 41% (González Fuentes, 1988).

Además, la respuesta a la fertilización en el maíz también es importante. En un trabajo donde compararon distintas recomendaciones de nutrientes y dosis, se observó que en promedio hubo una clara respuesta a la fertilización con respecto al testigo sin fertilizar; pero las diferencias de rendimiento entre los tratamientos fertilizados no fueron grandes (menores a 500 kg/ha). Los resultados económicos se optimizaron en los tratamientos con menos nutrientes y dosis bajas (Perdomo y Cardellino, 2006).

Los principales nutrientes absorbidos por el maíz dulce son nitrógeno y potasio, 10,4 y 9,5 kg respectivamente, de nutriente por tonelada de choclo cosechado (Ciampitti y García, 2007). Si bien el potasio es un nutriente muy requerido por el cultivo, gran cantidad de este elemento queda en la parte aérea y solamente entre 12 % y 27 % es exportado por la mazorca (Borin, 2010), siendo exportados aproximadamente 2 kg de K por tonelada de choclo (Ciampitti y García, 2007). Se recomienda que la fertilización con K en cultivos de maíz dulce sea realizada de acuerdo a la exportación de ese nutriente por el cultivo. Se ha observado que en suelos con alto contenido de K, la fertilización potásica no influye de forma significativa en el rendimiento del maíz dulce (Meneses et al., 2017).

El nitrógeno es el principal nutriente exportado por el cultivo, siendo de 6,9 kg/tt (Ciampitti y García, 2007). Para el diagnóstico del nivel nutricional del maíz dulce durante el cultivo se puede utilizar la concentración de los nutrientes a nivel foliar. Si bien el nitrógeno no se encuentra en grandes concentraciones en la materia seca foliar, variando entre 1 % a 5 %, constituye un elemento indispensable para la expansión foliar y el crecimiento general de las plantas de maíz dulce. La concentración óptima de N está entre 2,5 y 3,5 % de la MS, mientras que un contenido menor a 2% se considera un nivel deficiente. La deficiencia de este elemento produce plantas pequeñas, y

consecuentemente disminuye el área foliar y los rendimientos. La deficiencia de nitrógeno se manifiesta por un amarillamiento generalizado de la planta debido a la destrucción de los cloroplastos (Parera, 2017).

2.5. HIPÓTESIS

Las hipótesis del trabajo fueron las siguientes:

1 - Disminuir el número de laboreos e incorporar abonos verdes en los períodos entre cultivos, ya sea solos o combinados, tiene un efecto positivo en aumentar el carbono orgánico del suelo; aumentar el contenido de nitratos, fósforo disponible y bases intercambiables en la capa superficial del suelo. También este manejo tiene un efecto en aumentar el pH del suelo.

2 - El laboreo reducido, que implica dejar el abono verde en superficie como mulch, aumenta el contenido de agua en el perfil del mismo, tanto en superficie como en profundidad en algún momento a lo largo del ciclo del cultivo comercial.

3 - Incorporar el nabo forrajero como abono verde tiene un efecto positivo en aumentar la porosidad del suelo y disminuir su compactación, logrando mejores condiciones para el crecimiento radicular.

4 - Los tratamientos con un manejo de laboreo reducido y mulch orgánico de un abono verde sin la presencia de leguminosas, afectan de forma negativa el crecimiento y el rendimiento de las plantas debido a una mayor compactación del suelo y a una inmovilización de nitrógeno lenta que se da al dejar los residuos del abono verde en superficie.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DEL ENSAYO

El presente ensayo fue realizado en el Centro Regional Sur de la Facultad de Agronomía, ubicado en la localidad de Progreso, Canelones, Uruguay (34° 61' latitud Sur y 56° 22' longitud Oeste). El mismo tuvo una duración de un año, desde abril 2016 a marzo 2017.

Las variables climáticas fueron tomadas de la estación meteorológica del INIA Las Brujas (34° 40' Latitud Sur y 56° 20' Longitud Oeste).

El suelo presente en el cuadro utilizado para el experimento es un Brunosol subéutrico típico cuyo horizonte A_p es de textura franco limosa con 14% arena, 62,5% de limo y 23,5% de arcilla (Alliaume et al., 2014). Desde el año 2010 este cuadro ha sido manejado con los tratamientos que se detallan en el siguiente capítulo en cuanto al manejo del suelo y con un abono verde de avena en los tratamientos que corresponde. La secuencia de cultivos en los últimos años se presenta en el cuadro 1.

Cuadro 1. Abonos verdes y cultivos comerciales realizados desde 2010 a 2015 en la parcela del experimento

AÑO	ABONO VERDE	CULTIVO COMERCIAL
2010	Avena negra	Tomate industria
2011	Avena negra	Tomate industria
2012	Avena negra	Maíz dulce
2013	Avena negra	Cebolla
2014	Avena negra	Calabacín
2015	Avena	Zapallo

El cuadro tiene un tamaño de 30m*50m, con una pendiente promedio entre 1-1,5%. Son un total de 24 canteros de tratamiento con una distancia de centro a centro de cantero de 1,5m. A los lados de los canteros más externos se sembraron 2 canteros con el cultivo comercial para evitar el efecto “borde”.

Los abonos verdes utilizados fueron trigo (*Triticum aestivum*) y nabo forrajero (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) y el cultivo evaluado fue maíz dulce (*Zea mays* L. var. *saccharata* Körn). Se utilizó el cultivar Bonanza. Es un maíz dulce común (su), con un contenido de azúcar normal entre 5-10%. El largo de ciclo de este cultivar es de 90 días.

3.2. TRATAMIENTOS

Se realizaron 6 tratamientos los cuales tenían un manejo diferencial en cuanto al manejo del suelo que incluía: tipo de laboreo (convencional o reducido), con o sin agregado de abono orgánico (7 Mg MS de cama de pollo por hectárea), y la siembra o no de abonos verdes. Se sembraron dos tipos de abonos verdes, trigo o una mezcla de trigo y nabo forrajero, los cuales fueron incorporados al suelo o dejados como mulch en superficie, dependiendo del tratamiento. Los tratamientos con laboreo convencional fueron laboreados dos veces al año, mientras que el laboreo reducido fue laboreado una sola vez.

Los tratamientos fueron los siguientes:

- Laboreo convencional (C).
- Laboreo convencional con agregado de cama de pollo (CP).
- Laboreo convencional con cama de pollo y abono verde de trigo incorporado al suelo (AV_T).
- Laboreo convencional con cama de pollo y abono verde de trigo y nabo forrajero incorporado al suelo (AV_{T+NB}).
- Laboreo reducido con cama de pollo y abono verde de trigo dejado en superficie como cobertura muerta (LR_T).
- Laboreo reducido con cama de pollo y abono verde de trigo y nabo forrajero dejado en superficie como cobertura muerta (LR_{T+NB}).

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental utilizado fue un diseño completo al azar (DCA) con 6 tratamientos y tres repeticiones, lo que hace un total de 18 parcelas (ver figura 1).

Cada parcela corresponde a uno o dos canteros dependiendo del tratamiento. En los tratamientos C y CP cada parcela se corresponde con dos canteros, mientras que los 4 tratamientos restantes contaban con un cantero por parcela, siendo un total de 24 canteros en evaluación.

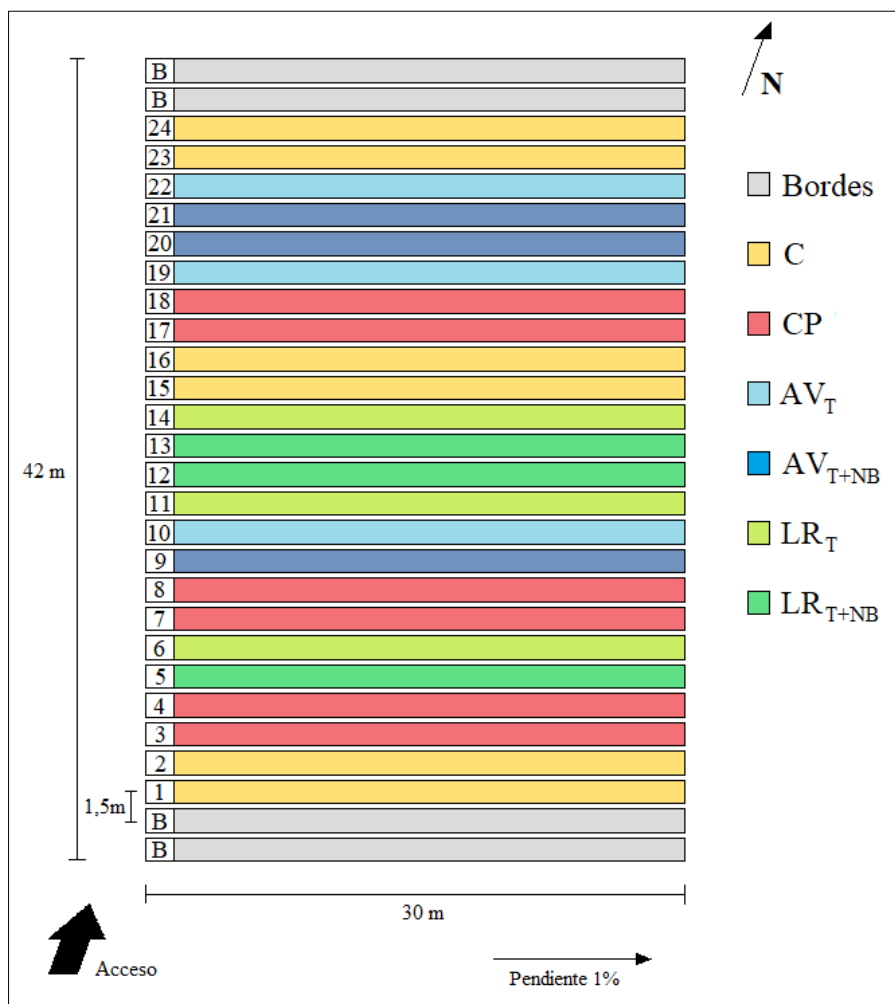


Figura 1. Esquema del ensayo

3.4. MANEJO DEL ABONO VERDE Y DEL CULTIVO COMERCIAL

La última semana de abril del año 2016 se preparó el suelo para la siembra de los abonos verdes. El laboreo consistió de un arado con disquera y se armaron los canchales para todos los tratamientos del ensayo.

El 4 de mayo se incorporó al suelo 7 Mg MS cama de pollo por hectárea a los canchales de laboreo reducido (LR_T y LR_{T+NB}). La cama de pollo es una mezcla de estiércol de pollo con cáscara de arroz. El 23 de mayo fue sembrado el abono verde a una densidad de 150 kg/ha de semilla de trigo en los tratamientos que tuvieron solo trigo (AV_T y LR_T), y una densidad de 80 kg de trigo y 15 kg de nabo forrajero por hectárea para los tratamientos con abonos verdes combinados (AV_{T+NB} y LR_{T+NB}).

La materia seca de los abonos verdes y los análisis químicos de las enmiendas se encuentran detallados en los cuadros 4 y 5 respectivamente.

La siembra de los abonos verdes fue manual y al voleo. Los tratamientos que no tuvieron abonos verdes fueron dejados en barbecho durante el invierno.

En los tratamientos de laboreo reducido los abonos verdes fueron cortados 1 mes antes de la siembra del maíz dulce, quedando los residuos del abono verde como mulch en la superficie del cantero. Una semana antes de la siembra se aplicó herbicidas en estos canteros, debido a la presencia de malezas (principalmente yerba carnícera, *Conyza bonariensis*) y al rebrote de los abonos verdes. Al momento de la siembra se utilizó un multiarado (ver figura 2). Se trata de una herramienta que realiza el corte del suelo y de los residuos dejando un surco sin cobertura en la línea de siembra.



Figura 2. Multiarado, herramienta utilizada para la siembra de maíz dulce en los tratamientos con laboreo reducido

En los tratamientos AV_T , AV_{T+NB} y CP la cama de pollo fue agregada previo a la siembra del cultivo comercial utilizando la misma dosis que para los tratamientos de laboreo reducido (7 Mg MS/ha). A estos tratamientos y al tratamiento “C” se le pasó una disquera y los canteros fueron re-encanterados el 5 de diciembre, previo a la siembra del maíz dulce.

La siembra del maíz dulce se realizó el 5 de diciembre de 2016. El marco de plantación utilizado fue de dos filas en una distribución tresbolillo, a 30 cm entre plantas y 150 cm entre canteros; determinando una densidad de cultivo de 4 plantas por metro cuadrado (40.000 plantas por hectárea).

Al estado de 4-6 hojas se raleó y se replantó en los lugares donde faltaban plantas, ajustando la población a la densidad objetivo de 40.000 plantas/ha.

En cuanto a la fertilización de base, además de la cama de pollo agregada en los canteros que correspondía según el tratamiento, se aplicó urea al momento de la siembra en los tratamientos que tuvieron abonos verdes. Se aplicó al voleo a razón de 20 kg por hectárea.

Se colocó una línea de goteros al centro del cantero (entre las dos hileras de plantas) con goteros distanciados 30 cm, y se regó durante los cinco días posteriores a la siembra. A partir de la quinta hoja (última semana de diciembre) se realizó una fertilización con urea mediante el riego. Se realizaron 4 ferti-riegos con una dosis de 25 kg de N por hectárea cada uno, siendo un total de 100 kg N/ha. Para los tratamientos que tuvieron abonos verdes se agregó una dosis total extra de nitrógeno de 26 Kg por hectárea (6,5 kg de N/ha por riego), para compensar el nitrógeno que se estimó fue utilizado por los microorganismos al incorporar residuos ricos en carbono.

Los mayores problemas sanitarios del cultivo se refirieron a la presencia de lagarta cogollera (*Spodoptera frugiperda*). La misma se controló mediante dos aplicaciones de Lorsban (Clorpirifos). Otro problema importante fue la presencia de malezas, siendo la maleza predominante el capín, *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv., la cual no fue posible controlarla químicamente ya que se trata de una gramínea (al igual que el cultivo de maíz), por lo que en algunos casos generó competencia con el cultivo. La incidencia fue mayor desde fines de enero hasta fin del ensayo.

3.5. OBSERVACIONES Y MEDICIONES

3.5.1. Muestreo de cama de pollo, abonos verdes y malezas

Se realizó el muestreo de la cama de pollo agregada al suelo, de los abonos verdes y de las malezas incorporadas, con el fin de realizar un balance de nutrientes (entradas y salidas de nutrientes) de las parcelas en estudio.

La cama de pollo utilizada como abono se analizó tomando muestras de diferentes estratos de la pila y mezclando en una sola muestra compuesta. Se tomaron muestras en las dos fechas en la cual se incorporó la cama de pollo al suelo para determinar el contenido de humedad. Las muestras fueron secadas a 60°C durante 72 horas, y luego se molieron con mortero manual, eliminando piedras y palos presentes.

Se realizó una prueba de germinación a las semillas de trigo utilizadas como abono verde con el método de siembra de semillas entre papel. Luego de 8 días en cámara a 20°C, se contabilizó el número de plantas germinadas. El % de germinación fue de 80 % de plantas normales y anormales, y de 64 % de plantas normales.

El muestreo de los abonos verdes se realizó cortando el material vegetal presente en un rectángulo de 1 metro por 0.15 m (0.15 m²), tomando tres repeticiones por parcela.

La presencia de malezas se midió utilizando un cuadrante de 0.4*0.4 m (0.16 m²). Se realizaron 3 repeticiones por parcela, en las cuales se cortaban todas las malezas presentes en el cuadrante. Las malezas predominantes fueron coniza, mastuerzo y raigrás.

Las muestras fueron secadas a 60° durante 2 días, determinando la materia seca de los abonos verdes y de las malezas. Luego fueron molidas para el análisis químico.

Se determinó el contenido de bases (calcio, magnesio, sodio y potasio) por espectrofotometría, el contenido de fósforo con el método Bray I (Bray y Kurtz, 1945), y el contenido de nitrógeno mediante el método Kjeldhal (Bremner y Mulvaney, 1982).

3.5.2. Muestreo de suelos

Se realizaron muestreos de suelos de todos los tratamientos en 3 oportunidades: previo a la siembra del abono verde (mayo 2016), previo a la siembra del cultivo de maíz dulce (diciembre 2016) y luego de finalizado el ciclo de cultivo (marzo 2017).

En las tres fechas se extrajo con calador una muestra compuesta por 10 sub-muestras de 20 cm de profundidad, distribuidas al azar en cada parcela. Las mismas fueron mezcladas para homogeneizar las muestras y luego se secaron a 40 °C durante 48 horas. Posteriormente fueron molidas y pasadas por un tamiz de 2 mm.

A las muestras de suelo se le hicieron los siguientes análisis de laboratorio:

- pH del suelo: se determinó mediante potenciometría, tanto en agua como en cloruro de potasio (KCl) 1M, con una relación suelo:solución de 1:2,5.
- Carbono orgánico del suelo (COS): se midió con el método de Walkley-Black, utilizando en la titulación la solución de Sal de Mohr (Walkley y Black, 1934).
- Fósforo disponible: se determinó con el método de extracción Bray I (Bray y Kurtz, 1945).
- NO₃: determinado mediante destilación Kjeldhal (Bremner y Mulvaney, 1982).
- Bases intercambiables: para obtener las bases de intercambio (Ca, Mg, K y Na), las muestras de suelo fueron extractadas mediante acetato de amonio

1M con una relación suelo:solución de 1:10, para luego determinar por espectrofotometría de absorción atómica (Ca y Mg) y de emisión (K y Na).

3.5.3. Humedad del suelo

La humedad del suelo en los distintos tratamientos fue medida en superficie de forma gravimétrica y en profundidad mediante sonda de neutrones.

3.5.3.1. Humedad superficial

El contenido de humedad del suelo en superficie se determinó por el método gravimétrico. Se tomaron muestras compuestas con un calador, tomando los 10 primeros cm de suelo, de 5 lugares diferentes de cada parcela. El muestreo tuvo una frecuencia semanal durante todo el período de crecimiento del cultivo, con el objetivo de evaluar la evolución de la humedad en la capa superficial del suelo. Los días en que se realizaron las mediciones fueron los siguientes: 29/12/16 (fecha 1), 5/1/17 (fecha 2), 12/1/17 (fecha 3), 19/1/17 (fecha 4), 26/1/17 (fecha 5), 10/2/17 (fecha 6), 16/2/17 (fecha 7), 23/2/17 (fecha 8), 1/3/17 (fecha 9).

Las muestras fueron pesadas inmediatamente de recolectadas del campo (peso fresco), luego se secaron en estufa a 105°C durante 48 hs, y una vez secas se volvían a pesar (peso seco).

El % de humedad gravimétrica se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$((\text{peso fresco} - \text{peso seco}) / (\text{peso seco})) * 100$$

3.5.3.2. Humedad en profundidad

Para monitorear la evolución de contenido de agua en el suelo en profundidad se utilizó una sonda de neutrones de marca CPN (Campbell Pacific Nuclear, modelo 503). Para esto se instaló en el centro del cantero de cada parcela (18 parcelas), un tubo de acceso de la sonda de neutrones. Se midió el contenido de agua con una frecuencia semanal durante todo el ciclo del cultivo, en intervalos de 15 cm hasta una profundidad de 100 cm, siendo un total de seis intervalos: 10-25, 25-40, 40-55, 55-70, 70-85, 85-100 cm de profundidad.

Se realizó la calibración de la sonda para todas las profundidades de medición establecidas, y en tres momentos para lograr abarcar contenidos de humedad del suelo diferentes. Se ajustó una recta de calibración para cada profundidad (ver anexo 1), lo que permitió tener las medidas de la sonda en valores de % de humedad gravimétrico. A partir del contenido gravimétrico de humedad y de la densidad aparente correspondiente, se estimó para cada punto el contenido volumétrico de humedad, el cual equivale a los mm de agua cada 10 cm de suelo.

3.5.4. Densidad aparente

La densidad aparente fue medida durante el período de crecimiento del maíz dulce, para 3 tratamientos de manejo de suelo diferentes (C, LRT y LRT+NB), utilizando la metodología de Blake y Hartge (1986). Se tomaron muestras imperturbadas realizando cuatro repeticiones por parcela a dos profundidades diferentes (5 a 10 cm y de 15-20 cm). Se colectaron usando aros de metal de 5 cm de ancho y 3 cm de alto y luego fueron llevadas al laboratorio. La densidad aparente se determinó por el cociente del peso de la muestra secada a 105 °C en estufa hasta peso constante, sobre el volumen del cilindro que contiene la muestra (68,7 cm³).

3.5.5. Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración se determinó el 29 de diciembre con un penetrómetro de cono (Field Scout SC 900), el cual registra la resistencia a la penetración a intervalos de 2,5 cm de profundidad hasta los 45 cm. Se tomaron tres mediciones por parcela.

3.5.6. Crecimiento de las plantas de maíz dulce

Para evaluar el crecimiento de las plantas de maíz dulce en los diferentes tratamientos, se tomaron 4 plantas al azar por parcela al momento de la cosecha.

A estas plantas se le midieron las siguientes variables: la altura de la planta desde el primer nudo hasta donde inicia la panoja (en m), y el diámetro del tallo 2 cm por encima del segundo nudo (en cm).

3.5.7. Análisis foliar

Se recolectaron muestras foliares de 4 plantas de maíz dulce por parcela para determinar el estado nutricional de las plantas en los distintos tratamientos. Se tomó la hoja opuesta a cada mazorca en febrero de 2017, momento en el cual el cultivo se encontraba en emergencia de barbas (Havlin et al., 2005).

Estas muestras fueron secadas a 60 °C durante 48 horas y luego molidas para su posterior análisis en laboratorio, donde se determinó el contenido de nitrógeno foliar. El análisis fue determinado en el Laboratorio de suelos de Facultad de Agronomía mediante el método de Kjeldhal.

3.5.8. Rendimiento

El rendimiento fue medido el primero de marzo, 87 días después de la siembra. Para determinar el rendimiento se delimitaron sub-parcelas de cosecha de 2 metros lineales de cantero, en zonas representativas de cada parcela.

En cada subparcela se cosecharon todos los choclos de tamaño comercial, los cuales fueron contados y luego pesados con y sin chala para determinar el rendimiento del cultivo en número de choclos por ha y en toneladas de choclo por hectárea, para cada tratamiento.

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para determinar el efecto de los tratamientos en las variables medidas, se realizó Análisis de Varianza (ANAVA) con la prueba de comparación de medias propuesta por Fisher (LSD de Fisher), con un 95% de confianza ($\alpha 0.05$).

Las variables que fueron medidas una sola vez (fósforo y nitratos del suelo, densidad aparente, rendimiento, y las variables relativas al crecimiento del maíz dulce) se analizaron mediante un modelo correspondiente a un diseño completamente aleatorizado (DCA).

El modelo estadístico utilizado fue:

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

Donde Y_{ij} es la observación del tratamiento i en la parcela j , μ es la media poblacional, τ_i es el efecto del tratamiento i , y ε_{ij} es el término de error aleatorio asociado a la observación Y_{ij} .

Para las variables que fueron medidas en varias fechas (humedad en superficie, en profundidad, resistencia a la penetración y las propiedades químicas del suelo) se utilizó el diseño de parcelas divididas, identificando las fechas o la profundidad como “subparcelas” del experimento (Factor B).

El modelo estadístico utilizado en parcelas divididas fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} + \gamma_k + (\gamma\tau)_{ik} + \delta_{ijk}$$

Donde Y_{ijk} es la variable de respuesta, μ representa la media general de la respuesta, τ_i representa el efecto del i -ésimo tratamiento, ε_{ij} es el error experimental (variabilidad entre parcelas), γ_k representa el efecto de la k -ésima medición, $(\gamma\tau)_{ik}$ es la interacción entre tratamiento y medición, y δ_{ijk} es el error de la medida repetida (dentro de las parcelas).

Se verificó normalidad y homogeneidad de la varianza de los errores para todas las variables en estudio. En los casos en los que no hubo varianzas homogéneas se utilizaron modelos lineales generales y mixtos, los cuales permiten contemplar modelos heterocedásticos.

Para la realización de los análisis estadísticos de los resultados se utilizó el programa INFOSTAT (Di Renzo et al., 2018).

Para algunas de las variables en estudio se utilizaron los contrastes presentados en el cuadro 2. Los contrastes permitieron hacer comparaciones entre medias de tratamientos que presentaban manejos en común, como ser el tipo de laboreo, el uso de abonos verdes y/o el agregado de cama de pollo.

Cuadro 2. Contrastes

Tratamiento	Contrastes				
	1	2	3	4	5
C	1	0	0	-5	2
CP	1	0	0	1	2
AV _T	1	1	1	1	-1
AV _{T+NB}	1	1	-1	1	-1
LR _T	-2	-1	1	1	-1
LR _{T+NB}	-2	-1	-1	1	-1

El contraste 1 compara el efecto promedio de los tratamientos con laboreo reducido con el promedio de los tratamientos con laboreo convencional.

El segundo contraste compara el promedio de los dos tratamientos con abonos verdes y laboreo reducido con el promedio de los que tuvieron abonos verdes y laboreo convencional.

El efecto de los diferentes tipos de abonos verdes utilizados (trigo o trigo con nabo forrajero) fue evaluado en el contraste 3.

El contraste 4 compara el promedio de los tratamientos con agregado de cama de pollo con el tratamiento que no tuvo cama de pollo.

El efecto promedio de los tratamientos con abonos verdes comparado con el promedio de los dos tratamientos que no tuvieron abonos verdes fue evaluado en el contraste 5.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DATOS AGROCLIMÁTICOS

4.1.1. Precipitaciones

Los abonos verdes fueron sembrados el 23 de mayo de 2016. Si bien las precipitaciones ocurridas durante ese mes resultaron inferiores a la media histórica para el mes de mayo, se logró una implantación exitosa de los mismos. Esto se debió a que la semana posterior a la siembra, las precipitaciones alcanzaron los 44 mm, no siendo necesario el riego en la siembra, ni durante el crecimiento de los abonos verdes. Por otro lado, las escasas precipitaciones ocurridas previo a la siembra del maíz dulce (5 de diciembre), inferiores a la media histórica para los meses entre agosto y noviembre, provocó que la preparación del suelo para el cultivo de maíz dulce se realizara sobre un suelo bastante seco. Por este motivo se presentaron dificultades durante la siembra, principalmente en los tratamientos de laboreo reducido. Al momento de pasar el multirado el suelo se rajaba provocando en algunos casos rajaduras profundas en las que caían las semillas. Esto generó una emergencia despareja debiéndose replantar en los lugares con faltante de plantas. En el período de crecimiento del maíz el agua no fue limitante (cuadro 3).

Cuadro 3. Comparación de datos históricos promedio de precipitaciones para la zona y precipitaciones ocurridas durante el periodo en estudio

Mes	Datos históricos* (mm)	Años 2016-2017 (mm)	Pp ocurridas- pp históricas (mm)
Febrero	91.9	76.1	-15.8
Marzo	95.8	87.6	-8.2
Abril	88.8	188.1	99.3
Mayo	72.2	50.0	-22.2
Junio	69.0	23.7	-45.3
Julio	68.5	157.7	89.2
Agosto	71.9	71.5	-0.4
Setiembre	72.3	64.1	-8.2
Octubre	91.8	84.2	-7.6
Noviembre	93.9	79.6	-14.3
Diciembre	73.2	104.2	31.0
Enero	83.1	104.7	21.6
Febrero	91.9	85.8	-6.1
Marzo	95.8	43.3	-52.5

*Datos de la Estación Experimental INIA Las Brujas, serie histórica 1985-2015.

4.2. MATERIALES ORGÁNICOS

A continuación, se presenta la información de los materiales orgánicos utilizados en el ensayo: abonos verdes, cama de pollo y malezas.

Cuadro 4. Materia seca de los materiales orgánicos incorporados

Tratamiento	Kg MS/há.		
	Abono verde	Cama de pollo	Malezas
LR _{T+NB}	13267	6985	2500
LR _T	9711	6822	1250
AV _{T+NB}	8967	6808	1063
AV _T	11578	6778	2313
CP	0	6904	5813
C	0	0	6438

Menos el tratamiento “C” todos los tratamientos tuvieron agregado de cama de pollo a una dosis similar. En los tratamientos de laboreo reducido la cama de pollo fue incorporada previo a la siembra de los abonos verdes, mientras que en los tratamientos de laboreo convencional fue incorporada luego del abono verde y antes del cultivo comercial.

La materia seca lograda por los abonos verdes fue mayor a 8000 kg. MS/ha. en todos los casos. En un trabajo realizado por Gilsanz (2012), en el que se evaluaron diferentes tipos de abonos verdes utilizados en horticultura, los abonos verdes de trigo tuvieron una producción promedio de materia seca de 12 toneladas por hectárea, mientras que la mezcla de avena con nabo forrajero produjo en torno a 13 toneladas de materia seca por hectárea. La producción de materia seca lograda en este ensayo fue algo inferior a la presentada por este autor, siendo el promedio para los abonos verdes de trigo de 10,6 tt. MS/ha. y 11,1 tt. MS/ha. para la mezcla de trigo y nabo forrajero.

La presencia de malezas al momento del trasplante, que luego fueron incorporadas al suelo (laboreo convencional) o quemadas y dejadas como mulch en superficie (laboreo reducido), fue significativamente mayor en los tratamientos que no tuvieron abonos verdes (“CP” y “C”). Es probable que los abonos verdes compitieran con las malezas por espacio y/o nutrientes, limitando su crecimiento. Como puede observarse en el cuadro 4, dentro de los tratamientos que tuvieron abonos verdes, los que alcanzaron una producción promedio de los mismos mayor, también presentaron un mayor contenido de malezas. Este mayor crecimiento de las coberturas verdes en general pudo estar relacionado a propiedades físico-químicas del suelo diferenciales entre los tratamientos.

La composición química de estos materiales se presenta en el cuadro 5.

Cuadro 5. Composición química de los materiales orgánicos utilizados en el ensayo

Materiales orgánicos	Concentración (g/kg de MS)					
	N	P	K	Ca	Mg	Na
Cama de pollo	22.0	16.5	35.0	35.0	7.5	6.0
Malezas	33.8	3.3	26.1	10.2	2.2	4.2
Abono verde trigo	19.6 _B	1.3 _B	10.2 _B	1.8 _B	0.8 _B	0.6
Abono verde trigo y nabo forrajero	21.1 _A	1.7 _A	12.2 _A	4.7 _A	1.3 _A	0.8
P _{valor}	0.058	0.006	<0.001	0.001	0.001	0.176
E.E.	0.51	0.08	0.31	0.44	0.06	0.08
C.V.	6.07	13.46	6.83	33.22	15.13	29.02

Nota: letras mayúsculas separan medias entre los dos tipos de nutrientes. El resto de las enmiendas no fueron analizadas estadísticamente por no contar con las repeticiones suficientes.

Como se observa en el cuadro 5 las malezas presentan mayor concentración de nutrientes que los abonos verdes en todos los casos. Con respecto a la composición de los abonos verdes, el abono verde mezcla de trigo y nabo forrajero presenta un % de nitrógeno mayor que el abono verde sólo de trigo. Esto podría implicar que el abono verde mezcla presente una descomposición más rápida en comparación con el abono verde sólo de trigo. También se observan diferencias en el contenido de bases de los diferentes abonos verdes, existiendo un mayor contenido para todas las bases en el abono verde de trigo y nabo forrajero, destacándose el calcio que presenta un contenido superior al doble que el abono verde de trigo. La composición química de los abonos coincide con lo reportado en la bibliografía (Peñalva y Calegari 1999, Gilsanz 2008).

Comparado con los datos presentados por Barbazán et al. (2011) para la cama de pollo con cáscara de arroz, la cama de pollo utilizada en el ensayo presentó valores promedio mayores para todos los nutrientes. Las enmiendas evaluadas por Barbazán et al. (2011) correspondientes a cama de pollo tenían en promedio 16, 13 y 9 g/kg de N, P y K; y 23, 4 y 3 de Ca, Mg y Na respectivamente. Las diferencias que presenta la composición de esta enmienda con respecto a las evaluadas por Barbazán et al. (2011) pueden atribuirse al número de crianzas de pollos que fueron realizadas con la misma cama, lo que determina la proporción de estiércol y de cáscara de arroz en la mezcla final.

4.3. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO

Las propiedades físico-químicas del suelo fueron determinadas en 3 fechas: previo al abono verde, en la instalación del cultivo comercial y luego de finalizado el mismo. A continuación se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio para cada una de las propiedades analizadas y los seis tratamientos en estudio.

4.3.1. pH en H₂O y en KCl

El pH del suelo fue medido en agua y en cloruro de potasio para las 3 fechas. Como se puede observar en el cuadro 6, existen diferencias significativas de estas dos variables para todas las fechas. Los tratamientos con laboreo reducido del suelo (LR_T y LR_{T+NB}) presentaron los valores de pH más altos. En la fecha 3 se observa que el tratamiento “C” tuvo valores promedios de pH en H₂O y en KCl significativamente más bajos que el resto de los tratamientos en estudio.

Los valores promedio de pH en los manejos de laboreo reducido para las 3 fechas juntas fueron de 6.1 y 5.4 en H₂O y KCl respectivamente. Los tratamientos con laboreo convencional y abonos verdes (AV_T y AV_{T+NB}) y el tratamiento de laboreo convencional con agregado de cama de pollo (CP) tuvieron valores de pH intermedios, siendo los promedios de 6.0 en agua y 5.3 en cloruro de potasio. El tratamiento de laboreo convencional sin agregado de materia orgánica al suelo (C) presenta los valores más bajos de pH para todas las fechas, con un promedio de 5.8 y 5.0 en H₂O y KCl respectivamente.

Cuadro 6. Valores medios de pH en agua (pH H₂O) y en cloruro de potasio (pH KCl) para cada fecha de muestreo, según el tratamiento

Tratamiento	Fecha 1		Fecha 2		Fecha 3	
	pH H ₂ O	pH KCl	pH H ₂ O	pH KCl	pH H ₂ O	pH KCl
LR _{T+NB}	6.14 _A	5.53 _A	6.03 _A	5.36 _A	6.15 _A	5.42 _A
LR _T	6.15 _A	5.48 _{AB}	5.99 _{AB}	5.32 _{AB}	6.11 _A	5.35 _{AB}
AV _{T+NB}	5.96 _C	5.29 _C	5.87 _{BC}	5.27 _{AB}	6.05 _A	5.29 _B
AV _T	5.99 _{BC}	5.23 _{CD}	5.84 _{CD}	5.21 _B	6.16 _A	5.42 _A
CP	6.10 _{AB}	5.41 _B	5.81 _{CD}	5.23 _B	6.05 _A	5.33 _{AB}
C	5.90 _C	5.12 _D	5.73 _D	5.02 _C	5.75 _B	4.92 _C
\bar{x} Fecha	6.04 _a	5.34 _a	5.88 _b	5.23 _b	6.04 _a	5.29 _a
		pH H ₂ O	pH KCl	EE		
	P _{valor trat*fecha}	0.038	0.002	0.04		
	P _{valor tratamiento}	0.123	0.036	0.07		
	P _{valor fecha}	<0.001	<0.001	0.02		
	CV	1.30	1.21			

Nota: letras mayúsculas separan medias dentro de cada fecha y corresponden a la separación de medias de la interacción tratamiento por fecha. Letras minúsculas separan medias por fecha para pH en H₂O y KCl.

En los contrastes realizados se constató que el pH en los tratamientos con laboreo reducido fue mayor (contraste 1: $P_{\text{valorH}_2\text{O}}=0.029$, $P_{\text{valorKCl}}=0.020$) que el pH de los suelos bajo laboreo convencional.

Estos resultados son coincidentes con el trabajo realizado por Cookson et al. (2008), Sá et al. (2009) en el cual el pH en la capa superficial del suelo fue mayor en los tratamientos sin laboreo, o con laboreo reducido, que en aquellos que tuvieron una pasada de rotativa. Sá et al. (2009) sugieren que la acumulación de una gran cantidad de residuos de cultivos en la superficie del suelo en los sistemas sin laboreo o con laboreo reducido, resulta en un aumento de la concentración de bases en la capa superficial, lo que lleva a un aumento del pH en la superficie del suelo. La mineralización de los residuos de cultivos libera pequeñas moléculas orgánicas (grupos carboxilos y fenólicos) que se unen con los cationes de la solución del suelo aumentando su pH.

También se detectaron valores mayores de pH (contraste 4: $P_{\text{valorH}_2\text{O}}=0.015$, $P_{\text{valorKCl}}=0.003$) en los tratamientos que tuvieron agregado de cama de pollo en comparación con el tratamiento “C”, que no tuvo agregado de cama de pollo.

El pH fue más bajo en el tratamiento “C” desde el primer muestreo de suelos, mientras que los tratamientos LR_T y LR_{T+NB} tuvieron los valores más altos también desde el inicio. Los tratamientos que se evaluaron en este ensayo fueron realizados durante seis años consecutivos en el mismo cuadro, por lo que es razonable que aparezca un efecto acumulado de la aplicación de cama de pollo y del no laboreo al inicio del experimento. Luego de finalizado el mismo, esta diferencia se acentúa, siendo el pH del suelo del tratamiento “C” significativamente menor al pH del resto de los tratamientos, lo que es concordante con el pH del material agregado de 7,3 (Barbazán et al., 2011).

El valor de pH de la cama de pollo es explicado por su alto contenido de bases: Ca, Mg, K y Na (ver cuadro 5). Los valores más altos de pH en los tratamientos con agregado de cama de pollo pueden deberse al alto contenido de sales de la enmienda, ya que las sales aumentan el pH del suelo. Según Barbazán et al. (2011) dentro de los materiales orgánicos usados en horticultura, la cama de pollo es la enmienda que presenta los valores más altos de conductividad eléctrica, debido a los elevados contenidos de sodio. La presencia de cloruro de sodio en la cama de pollo es proveniente de las sales agregadas a las raciones que se les da a estos animales para hacerlas más palatables.

A pesar de que todos los tratamientos fueron fertilizados con urea en la instalación del cultivo, los tratamientos con agregado de cama de pollo proporcionaron una alcalinidad suficiente para neutralizar la acidez generada por la nitrificación del fertilizante. La aplicación de cama de pollo en combinación con fertilizantes químicos pudo inhibir efectivamente la acidificación del suelo. Esto es coincidente con lo encontrado por Cai et al. (2015) quienes reportaron que luego de un experimento de 18

años de duración, la aplicación de estiércol porcino inhibía el proceso de acidificación del suelo dado por el agregado de 300 kg de urea por año.

Como se observa en el cuadro 6, las muestras tomadas en la fecha 2 (luego del abono verde y durante la instalación del cultivo), tuvieron valores de pH significativamente más bajos. Este muestreo fue realizado luego de la aplicación de urea durante la implantación del cultivo, por lo que la nitrificación del fertilizante podría estar explicando los valores más bajos de pH encontrados en la fecha 2, ya que este proceso libera cationes hidrógeno a la solución del suelo incrementando la acidez de este.

4.3.2. Carbono orgánico del suelo

Los valores promedio de carbono orgánico del suelo (COS) tuvieron diferencias significativas entre los tratamientos para las tres fechas juntas. En el cuadro 7 se presentan los valores de COS para los distintos manejos del suelo, para cada fecha de muestreo y el promedio para las tres fechas.

Cuadro 7. Valores medios de % carbono orgánico del suelo para todas las fechas de muestreo, según el tratamiento

Tratamiento	% COS			
	Fecha 1	Fecha 2	Fecha 3	\bar{x} Trat.
LR _{T+NB}	1.90	1.76	1.86	1.84 _A
LR _T	1.90	1.74	1.80	1.81 _A
AV _{T+NB}	1.90	1.80	1.92	1.88 _A
AV _T	1.87	1.78	1.96	1.87 _A
CP	1.83	1.67	1.79	1.76 _A
C	1.71	1.57	1.61	1.63 _B
\bar{x} Fecha	1.85 _A	1.72 _B	1.82 _A	
P _{valor tratamiento}	0.005	E.E.	0.04	CV
P _{valor fecha}	<0.001	E.E.	0.01	2.94
P _{valor trat*fecha}	0.178	E.E.	0.03	

Los tratamientos con agregado de cama de pollo y abono verde, ya sea enterrado (AV_T y AV_{T+NB}) o dejado como mulch en superficie (LR_{T+NB}, LR_T), tuvieron los valores más altos de carbono orgánico del suelo para todas las fechas, mientras que el tratamiento “C” presentó los niveles más bajos. No se observaron diferencias significativas en el % de COS entre los cinco tratamientos que tuvieron agregado de cama de pollo al suelo, pero estos tuvieron valores significativamente diferentes al tratamiento “C”.

La siguiente figura muestra los valores promedio de materia orgánica del suelo (%MOS=%COS*1.724) para las tres fechas y los 6 tratamientos de manejo de suelo.

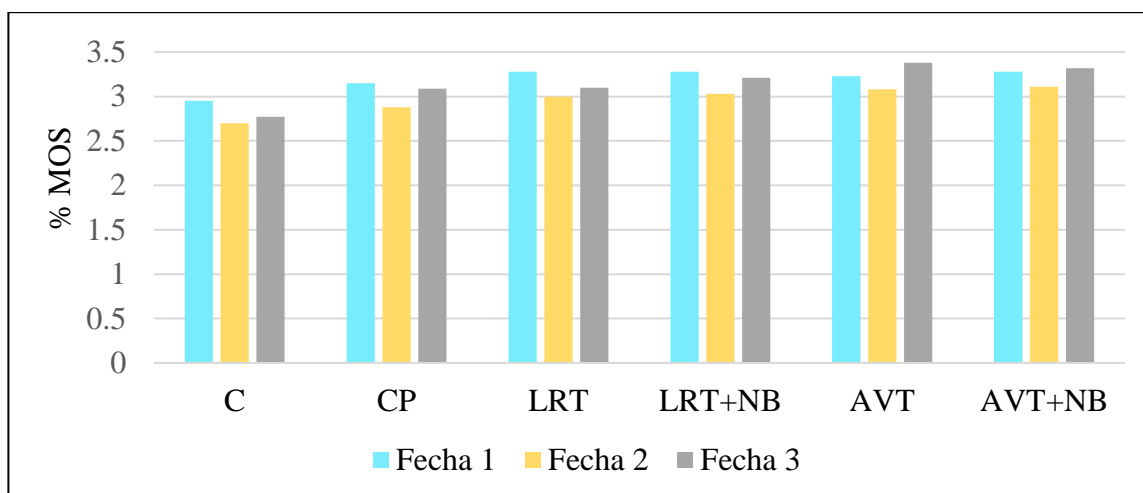


Figura 3. Valores promedio de % de materia orgánica del suelo para 3 fechas de muestreo según el tratamiento

Como puede observarse en la figura 3, el % MOS en la fecha 2 (instalación del cultivo) tuvo los valores promedio más bajos para todos los tratamientos en estudio.

También se observa una tendencia de los tratamientos con abono verde enterrado (AV_T y AV_{T+NB}) a tener valores promedio de % MOS mayores en el último muestreo que en el primer muestreo, aumentando el contenido de materia orgánica durante el transcurso del ensayo. Para los tratamientos LR_T , LR_{T+NB} , CP y C se observa una reducción de la MOS en el último muestreo con respecto al primero.

En el tratamiento con laboreo convencional “C”, sin incorporación de cama de pollo ni abonos verdes, se parte de un nivel inicial de COS más bajo que el resto de los tratamientos. Esto puede deberse a que la parcela ha sido manejada con estos tratamientos desde el año 2010, y es posible que se trate de un efecto acumulado de los tratamientos en los últimos 6 años. Este efecto también se visualizó el año del ensayo, con una tendencia en el mismo sentido.

Según Alliaume et al. (2014) el laboreo convencional aumenta las pérdidas de suelo por erosión con respecto al laboreo reducido, incluso los tratamientos que tuvieron abonos verdes y cama de pollo, presentaron mayor estimación de erosión que el manejo conservacionista. El laboreo acelera la descomposición de la materia orgánica ya que aumenta la exposición del suelo al oxígeno y promueve la rotura de los agregados del suelo, dando lugar a estructuras del suelo más afinadas que aumentan la superficie de contacto del suelo con los microorganismos descomponedores (Gilsanz, 2012).

En este ensayo no se visualizó un efecto del tipo de laboreo con respecto al contenido de COS, el efecto más importante en la variable COS tuvo que ver con el agregado o no de materia orgánica al suelo, ya sea cama de pollo o abonos verdes. Los tratamientos que tuvieron agregado de estas enmiendas presentaron mayor contenido de COS que el tratamiento “C”. Esto coincide con Arboleya et al. (2010, 2012), Corres et al. (2015) quienes compararon diferentes tipos de laboreo de suelo y tampoco encontraron diferencias significativas en el contenido de COS, pero si una tendencia del tratamiento sin agregado de materia orgánica a presentar los valores más bajos.

4.3.3. NO_3 y P

Los valores de nitrato en el suelo en la fecha 2 (instalación del cultivo), fueron significativamente mayores que en la fecha 3, luego de finalizado el cultivo comercial ($P_{\text{valor}} < 0.001$).

Cuadro 8. Valores promedios de nitrato en el suelo para dos fechas de muestreo, según el tratamiento

Tratamiento	NO_3 (ppm)	
	Fecha 2	Fecha 3
CP	31.2	12.6 A
AV _T	45.5	9.1 B
LR _T	28.1	8.8 B
LR _{T+NB}	27.7	8.8 B
AV _{T+NB}	45.3	6.8 BC
C	21.6	4.0 C
EE	8.27	1.02
CV	43.08	21.16
P_{valor}	0.28	0.002

En el momento de implantación del maíz dulce, si bien no hubo diferencias significativas entre los diferentes manejos del suelo, los tratamientos que tuvieron abono verde incorporado al suelo, presentaron una tendencia a tener niveles mayores de nitrato en el suelo que el resto de los tratamientos. La cama de pollo en los tratamientos AV_T, AV_{T+NB} y CP fue agregada previo a la siembra del maíz dulce. Por otro lado, los cuatro tratamientos con abonos verdes tuvieron una fertilización nitrogenada superior a los tratamientos “C” y “CP” con el objetivo de compensar la inmovilización de nitrógeno que se da durante la descomposición de los abonos verdes. Estos dos factores pueden estar explicando el mayor contenido de nitratos en los tratamientos AV_T y AV_{T+NB} durante la implantación del cultivo. De todas formas, los valores de nitrato al momento de la siembra fueron superiores a 20 ppm N- NO_3 para todos los tratamientos, valor reportado por García (2005) como nivel crítico para el crecimiento del maíz.

Como se observa en el cuadro 8, el tratamiento que tuvo un manejo de laboreo convencional y agregado de cama de pollo (CP) fue el que finalizó el cultivo con los valores más altos de nitrato, en comparación con el resto de los tratamientos, mientras que el tratamiento con laboreo convencional sin agregado de materia orgánica (C) tuvo los niveles más bajos.

Para la fecha 3, el contraste 4 es significativo ($P_{\text{valor}} < 0.001$). Este contraste compara el promedio de los tratamientos que tuvieron agregado de cama de pollo versus el tratamiento que no tuvo agregado de cama de pollo. Es decir, el tratamiento “C” difiere significativamente del resto en esta fecha. Esto era esperable, ya que el tratamiento “C” comenzó el ensayo con menor contenido de carbono orgánico, y luego no tuvo agregado de materia orgánica (ni abonos verdes, ni cama de pollo), solamente fue fertilizado con urea al momento de la siembra, por lo que se perdió, ya sea por la absorción del cultivo de este nutriente o por lavado.

En cuanto a los niveles de P disponible en el suelo al final del cultivo de maíz dulce, no se observan diferencias significativas entre los distintos tratamientos.

Cuadro 9. Valores promedios de P disponible en el suelo al final del cultivo de maíz, según el tratamiento

Tratamiento	P _{suelo} (ppm)
C	27.0
AV _T	22.5
LR _{T+NB}	21.5
LR _T	19.1
CP	17.5
AV _{T+NB}	16.3
EE	6.14
CV	51.52
P _{valor}	0.837

Se observa una tendencia del tratamiento “C” a presentar los valores más altos de P del suelo. Se analizaron los contrastes presentados en el cuadro 2 pero ninguno de ellos fue significativo para esta variable, probablemente debido a la gran variabilidad de las mediciones.

Si bien se trata de una tendencia, el tratamiento “C”, sin agregado de cama de pollo, presentó el valor promedio de fósforo más alto que los demás tratamientos, que si tuvieron cama de pollo. Estos resultados son opuestos a los presentados por Corres et al. (2015), quienes encontraron que los niveles de fósforo fueron significativamente más altos en los manejos que tuvieron enmiendas orgánicas, especialmente aquellos con

estiércol de ave, en comparación con los que sólo se le agregó fertilizante sintético.

Según Gilsanz (2012), la disponibilidad de fósforo mejora con un contenido de humedad favorable en el suelo y los procesos de acidificación del suelo pueden afectar la disponibilidad del fósforo para las plantas al presentarse en formas poco solubles. Por esta razón podía esperarse que los tratamientos con laboreo reducido y agregado de cama de pollo presentaran una concentración de fósforo disponible mayor, ya que tuvieron mayor contenido de humedad y pH más altos que el resto de los tratamientos, pero no es lo que se da en este caso.

Por otro lado, Arboleya et al. (2012) encontraron mayor contenido de fósforo en los suelos con laboreo convencional en comparación con los que tuvieron laboreo reducido y abonos verdes, y explicaron esto en base a que los tratamientos de laboreo reducido tuvieron doble fase de cultivos (abonos verdes y cultivo comercial), lo que promovió una mayor extracción de fósforo.

Es importante considerar que aunque se trata de valores de fósforo en suelo muy bajos considerando el agregado frecuente de cama de pollo en la mayoría de los tratamientos, no son valores críticos para el crecimiento del cultivo. El nivel crítico promedio de fósforo disponible presentado por García (2005) es de 16 ppm P Bray 1.

4.3.4. Bases intercambiables

Los siguientes cuadros presenta los contenidos de bases intercambiables totales, y de cada base intercambiable por separado; para los seis tratamientos y las 3 fechas de muestreo. El cuadro 10 muestra los valores promedio de las tres fechas, mientras que en el cuadro 11 se presentan los valores promedio para cada fecha por separado.

Cuadro 10. Valores promedio de las concentraciones de bases intercambiables para las tres fechas de muestreo según el tratamiento

Tratamiento	Suma de bases intercambiables	Ca	Mg	K	Na
(cmol _c kg ⁻¹)					
LR _{T+NB}	17.94	11.88	4.63	0.93 _A	0.50
LR _T	17.42	11.58	4.48	0.86 _A	0.50
AV _{T+NB}	17.21	11.32	4.43	0.91 _A	0.54
AV _T	17.60	11.47	4.55	0.97 _A	0.60
CP	17.30	11.32	4.48	0.93 _A	0.57
C	16.28	10.81	4.30	0.61 _B	0.56
E.E.	0.35	0.27	0.10	0.05	0.02
CV	4.53	4.55	6.63	10.14	12.62
P _{valor}	0.085	0.197	0.307	0.005	0.082

Cuadro 11. Valores promedios de la suma de bases intercambiables, calcio, magnesio, potasio y sodio; para cada fecha de muestreo

Tratamiento		Suma de bases intercambiables	Ca	Mg	K	Na
(cmol _c kg ⁻¹)						
Fecha 1	LR _{T+NB}	17.61	11.27	4.76	1.02 _A	0.56
	LR _T	16.84	10.79	4.58	0.91 _{AB}	0.55
	AV _{T+NB}	16.49	10.60	4.56	0.77 _{BC}	0.55
	AV _T	15.96	10.22	4.42	0.79 _{BC}	0.54
	CP	17.08	11.04	4.61	0.86 _B	0.56
	C	15.57	9.90	4.40	0.66 _C	0.60
Fecha 2	LR _{T+NB}	17.81	11.57	4.86	0.90 _{BC}	0.48
	LR _T	17.26	11.25	4.66	0.88 _C	0.46
	AV _{T+NB}	17.86	11.63	4.62	1.05 _A	0.56
	AV _T	18.01	11.70	4.69	1.04 _{AB}	0.58
	CP	16.93	10.87	4.61	0.90 _{BC}	0.55
	C	17.04	11.28	4.59	0.63 _D	0.55
Fecha 3	LR _{T+NB}	18.40	12.79	4.28	0.86 _C	0.47
	LR _T	18.16	12.69	4.21	0.79 _C	0.47
	AV _{T+NB}	17.27	11.73	4.11	0.92 _{BC}	0.51
	AV _T	18.82	12.49	4.56	1.09 _A	0.68
	CP	17.90	12.05	4.23	1.02 _{AB}	0.60
	C	16.24	11.26	3.92	0.54 _D	0.52
E.E.		0.45	0.30	0.17	0.05	0.04
CV		4.53	4.55	6.63	10.14	12.62
P _{valor fecha*trat.}		0.137	0.091	0.821	0.001	0.157

Cuando se evaluaron los datos de las tres fechas juntas, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para la suma de bases intercambiables, y tampoco para el contenido de calcio, magnesio y sodio por separado. Sin embargo, el contraste 4 fue significativo para dos de estas variables: suma de bases intercambiables y contenido de calcio ($P_{\text{valorBI}}=0.008$ y $P_{\text{valorCa}}=0.033$). Esto implica que el suelo del tratamiento “C” tuvo un contenido de bases intercambiables y de calcio menor que el resto de los tratamientos. De la misma forma, el contenido de potasio en el tratamiento “C” fue significativamente más bajo que el contenido de potasio en los demás tratamientos evaluados.

El tratamiento “C” fue el único tratamiento que no tuvo agregado de cama de pollo, y eso podría estar explicando los valores más bajos de bases intercambiables. Esto coincide con lo presentado por Cai et al. (2015), quienes observaron que en el largo

plazo los tratamientos con agregado de urea y sin aplicación de estiércol tuvieron una disminución del pH del suelo y una reducción significativa de los cationes intercambiables del suelo.

El alto contenido que tiene la cama de pollo de potasio y calcio (ver cuadro 5) es lo que puede estar explicando que todos los tratamientos que tuvieron agregado de la enmienda se diferenciaran del tratamiento “C” en el contenido de estas bases en el suelo.

Por otro lado, a pesar de que la composición del abono verde mezcla (trigo y nabo forrajero) presentó mayor contenido de todas las bases en general que el abono verde solo de trigo (ver cuadro 5), esto no tuvo repercusión en el contenido de las bases en los suelos entre los diferentes tratamientos.

El contenido de magnesio intercambiable del suelo no tuvo diferencias entre los tratamientos para ninguna de las 3 fechas de muestreo. Tampoco se detectaron diferencias en los contrastes analizados.

En la fecha 1 los manejos de laboreo reducido y cama de pollo (LR_T , LR_{T+NB} y CP) tuvieron los valores más altos de potasio en el suelo y significativamente diferentes al tratamiento “C”, mientras que en las fechas 2 y 3 los valores mayores de K se dieron en los tratamientos de AV_T , AV_{T+NB} y CP, pero todos los tratamientos se diferenciaron del tratamiento “C”. Esto concuerda con Corres et al. (2015) quienes reportaron que los niveles de potasio fueron mayores en los tratamientos que tuvieron agregado de enmiendas orgánicas en comparación con los que tuvieron solamente fertilización química. Con respecto al potasio y el tipo de laboreo, Gilsanz (2012) indica que el contenido de potasio no se ve afectado de forma importante por el tipo de laboreo, ya que luego de algunos años con ensayos de laboreo reducido y convencional se encontraron niveles similares de este nutriente en el suelo.

En cuanto a los niveles de sodio en el suelo no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos, pero los tratamientos de laboreo reducido tuvieron niveles más bajos de esta base intercambiable en comparación con los tratamientos que tuvieron un laboreo convencional (contraste 1, $P_{valor}=0.009$). Esto sería algo positivo ya que la acumulación de sodio tiene un efecto perjudicial en la agregación del suelo, y su lixiviación en profundidad contamina napas de agua subterráneas

Los muestreos realizados en las fechas 2 y 3 presentaron un contenido mayor de bases intercambiables que en la fecha 1, explicado fundamentalmente a un mayor contenido de Ca en esas fechas. Contrariamente a esto, los valores de magnesio más altos se registraron en las fechas 1 y 2, mientras que en la fecha 3 resultaron los valores más bajos.

4.4. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

4.4.1. Humedad superficial

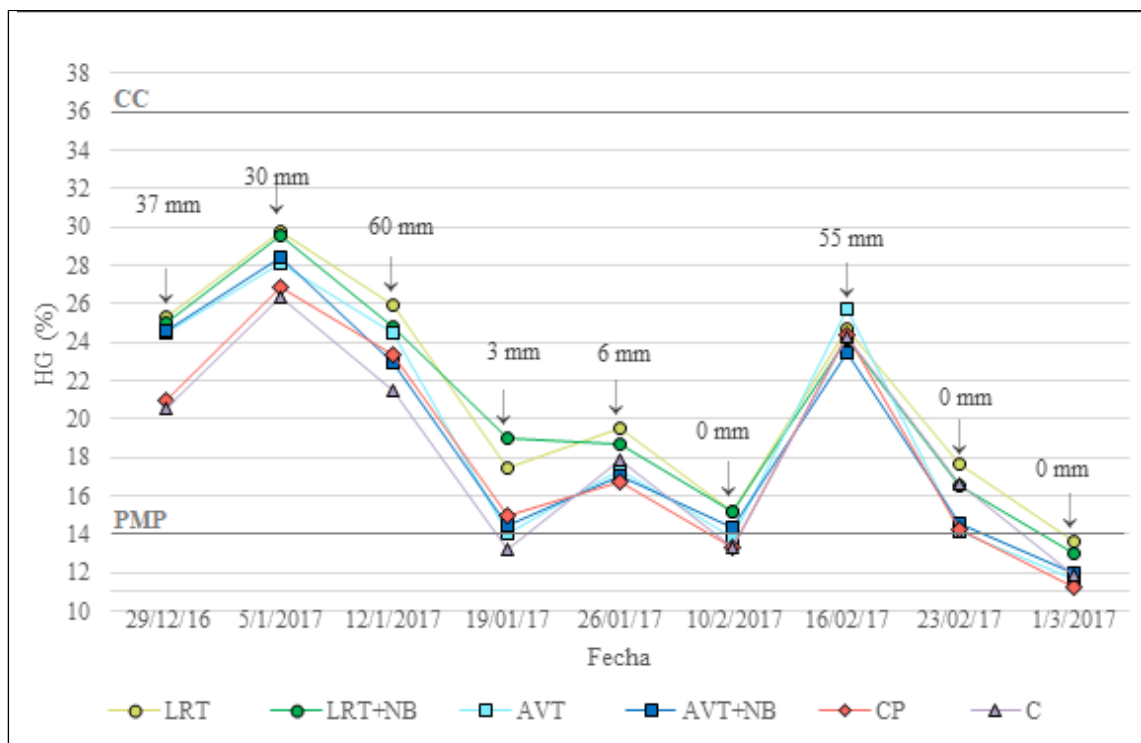
Con respecto al % de humedad gravimétrica superficial (0-10 cm del perfil de suelo), existen diferencias significativas entre los tratamientos para todas las fechas de muestreo. Los valores de % HG son presentados en el cuadro 12 para las nueve fechas de muestreo por separado y para cada tratamiento de manejo de suelo.

Cuadro 12. Valores promedios de humedad gravimétrica (% HP) en los primeros 10 cm del suelo para los distintos tratamientos y en las 9 fechas de muestreo

Tratamiento	% HG superficial								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
LR _T	25.3	29.8	25.9	17.5	19.5	15.2	24.7	17.6	13.6
	A	A	A	A	A	A	AB	A	A
LR _{T+NB}	25.0	29.6	24.8	19.0	18.7	15.2	24.1	16.5	13.1
	A	AB	AB	A	AB	A	AB	A	AB
AV _T	24.5	28.1	24.5	14.1	17.4	13.8	25.7	14.2	11.6
	A	BC	ABC	BC	BC	AB	A	B	BC
AV _{T+NB}	24.6	28.5	22.9	14.5	17.0	14.4	23.4	14.6	12.0
	A	ABC	CD	BC	C	AB	B	B	BC
CP	21.0	26.9	23.4	15.0	16.7	13.3	24.4	14.3	11.2
	B	CD	BC	B	C	B	AB	B	C
C	20.6	26.3	21.5	13.3	17.9	13.3	24.3	16.6	11.8
	B	D	D	C	ABC	B	AB	A	BC
	EE	0.58		CV	5.17		P _{valor}	<0.001	

Nota: el P_{valor} corresponde a la interacción tratamiento por fecha. Las letras separan valores dentro de cada fecha.

Los tratamientos con laboreo reducido (LR_T y LR_{T+NB}) tuvieron los valores más altos de humedad en superficie para todas las fechas, mientras que los tratamientos con laboreo convencional sin abonos verdes (C y CP) presentaron los valores más bajos de humedad superficial para la mayoría de las fechas. En la figura 4 se puede observar gráficamente la evolución en el tiempo del contenido de humedad en la capa superficial del suelo.



Las flechas verticales (↓) indican las precipitaciones ocurridas los 4 días previos a la fecha de muestreo.

Figura 4. Evolución del % humedad gravimétrica de 0 - 10 cm del perfil del suelo según el tratamiento

Como se observa en la figura 4, el % de humedad gravimétrica en los primeros 10 cm de suelo tiene una gran variación entre las distintas fechas, pero en los tratamientos con laboreo reducido (LR_T y LR_{T+NB}) la humedad superficial es mayor que en los tratamientos que tuvieron laboreo convencional (C, CP, AV_T y AV_{T+NB}) para la mayoría de las fechas. Solamente en la fecha 7, los tratamientos con laboreo reducido no tienen los valores de % humedad superficial más altos, pero no hay diferencias significativas entre estos tratamientos y los que tuvieron laboreo convencional para esa fecha.

La fecha 2 (5/1/17) fue la que presentó mayor % de humedad en superficie ($P_{valor} < 0.001$). A medida que avanzó el verano, creció el cultivo y como no hubo precipitaciones importantes el suelo se fue secando considerablemente hasta el 16/2 donde se registraron 55 mm. Luego el suelo comenzó a secarse nuevamente registrándose hacia el final del cultivo (fecha 9: 1/3/17) los valores de humedad superficial más bajos. Como se observa en la figura 4 en cuatro fechas de muestreo el suelo estuvo en el PMP y en ningún momento llegó a contenidos de CC, pero si alcanzó en la fecha 2 el 80% de CC.

Se realizaron los contrastes ortogonales presentados en el capítulo 3.6 para la variable % de humedad en superficie para todas las fechas juntas, los cuales se presentan en el cuadro 13.

Cuadro 13. Contrastes para variable % humedad superficial

Variable: humedad en superficie (%)	Contrastes				
	1	2	3	4	5
EE	0.67	0.39	0.39	1.06	0.67
P _{valor}	<0.001	0.001	0.470	0.009	<0.001

El cuadro 13 muestra que todos los contrastes evaluados tuvieron diferencias significativas, menos el contraste 3. Esto significa que el tipo de laboreo, el uso de abonos verdes y el agregado de cama de pollo tuvo un efecto significativo en la variable % de humedad en superficie. El tipo de abono verde utilizado (trigo o la combinación de trigo y nabo forrajero) no tuvo un efecto en la humedad del suelo (contraste 3).

El laboreo reducido implica que los residuos del abono verde queden en superficie como mulch, y actúa como barrera física favoreciendo la infiltración del agua, reduciendo el escurrimiento y disminuyendo las pérdidas por evaporación.

El mayor contenido de agua en los primeros centímetros del suelo para los tratamientos que tuvieron laboreo reducido es un factor importante a considerar en los cultivos de primavera-verano, como ser el cultivo de maíz dulce en este caso. Entre los meses de noviembre a febrero la probabilidad que exista déficit hídrico en Uruguay es alta, y en el caso de que no se disponga de riego, el uso de esta tecnología puede influir de forma importante en los rendimientos del cultivo.

En algunos trabajos hechos en Uruguay sobre el mismo tipo de suelo que se realizó este ensayo, el contenido de agua en los tratamientos laboreados fue menor que los que tuvieron un manejo de laboreo reducido (Arboleya et al. 2012, Alliaume et al. 2014). Alliaume et al. (2014) evaluaron el contenido de agua del suelo en un cultivo de tomate realizado sobre camellones en los años 2010 y 2011, y encontraron que los tratamientos con laboreo reducido tuvieron 14 y 7 mm. más que el resto de los tratamientos en los primeros 20 cm. de suelo.

4.4.2. Humedad en profundidad

Para evaluar el contenido de agua del suelo en profundidad, se calcularon los mm de agua de 10 a 100 cm para cada fecha y cada tratamiento.

Los tratamientos de laboreo reducido (LR_T y LR_{T+NB}) y el tratamiento de

laboreo convencional con abono verde de trigo (AV_T) tuvieron un contenido de agua en el perfil de suelo (de 10 a 100 cm de profundidad) mayor que los tratamientos de laboreo convencional con abono verde de trigo y nabo forrajero y los tratamientos sin abono verde (AV_{T+NB} , CP y C), para la mayoría de las fechas (ver cuadro 14).

Cuadro 14. Valores promedios de mm da agua en el perfil del suelo (10-100cm) para los distintos tratamientos y las 10 fechas de muestreo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LR _T	276.7	337.0	307.7	337.6	223.1	305.0	229.0	282.7	203.9	174.5
	ABC	A	AB	A	A	A	A	A	A	AB
LR _{T+NB}	279.0	329.6	303.3	327.1	211.8	281.9	219.2	278.3	196.2	161.5
	A	AB	ABC	AB	AB	B	AB	AB	A	C
AV _T	278.2	338.3	313.4	320.1	206.7	280.8	218.1	280.7	205.6	180.9
	AB	A	A	BC	BC	B	AB	AB	A	A
AV _{T+NB}	265.1	317.6	293.9	311.5	201.2	272.6	212.7	277.1	200.8	170.2
	CD	C	CD	CD	BC	BC	BC	AB	A	ABC
CP	266.8	322.6	297.0	316.2	206.6	266.2	204.1	275.1	200.2	166.4
	BCD	BC	BCD	BCD	BC	C	C	AB	A	BC
C	264.4	318.6	290.9	307.4	198.8	267.8	208.0	269.0	194.4	166.6
	D	BC	D	D	C	C	BC	B	A	BC
	EE 4.24		CV 2.86			P _{valor} 0.040				

Nota: el P_{valor} corresponde a la interacción tratamiento por fecha. Las letras separan valores dentro de cada fecha.

De los contrastes realizados para todas las fechas, se puede insinuar como significativo el contraste 1 ($P_{valor}=0.076$) el cual indica que los tratamientos con laboreo reducido son diferentes a aquellos que tuvieron laboreo convencional; y el contraste 5 ($P_{valor}=0.064$) lo que implica que los tratamientos con abonos verdes presentaban un contenido de agua en el perfil del suelo mayor que los que no tuvieron abonos verdes.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Arboleya et al. (2010), quienes encontraron que en las capas más profundas del perfil del suelo los tratamientos con laboreo reducido tenían una tendencia a presentar contenidos de humedad mayores; y se lo atribuían a una mayor intercepción del agua debido a la presencia de residuos orgánicos en superficie, que cuando no era utilizada por el cultivo en ese momento percolaba y se acumulaba en capas más profundas. Las diferencias en el contenido de agua en profundidad entre los tratamientos fueron más notorias en los meses de verano (Arboleya et al., 2012). En los resultados de Alliaume et al. (2014) los tratamientos con laboreo reducido también presentaron contenidos de agua en profundidad mayores que en los tratamientos con laboreo convencional, principalmente en el primer mes luego de trasplantado el cultivo comercial.

4.4.3. Densidad aparente

La figura 5 muestra la densidad aparente para 3 tratamientos de manejo de suelo diferentes: laboreo reducido con abono verde de trigo (LRT), laboreo reducido con abono verde de trigo y nabo forrajero ($LRT+NB$) y laboreo convencional (C). Se presentan los valores para 2 profundidades: profundidad 1 (5-10cm) y profundidad 2 (15-20cm). No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados para ninguna de las dos profundidades.

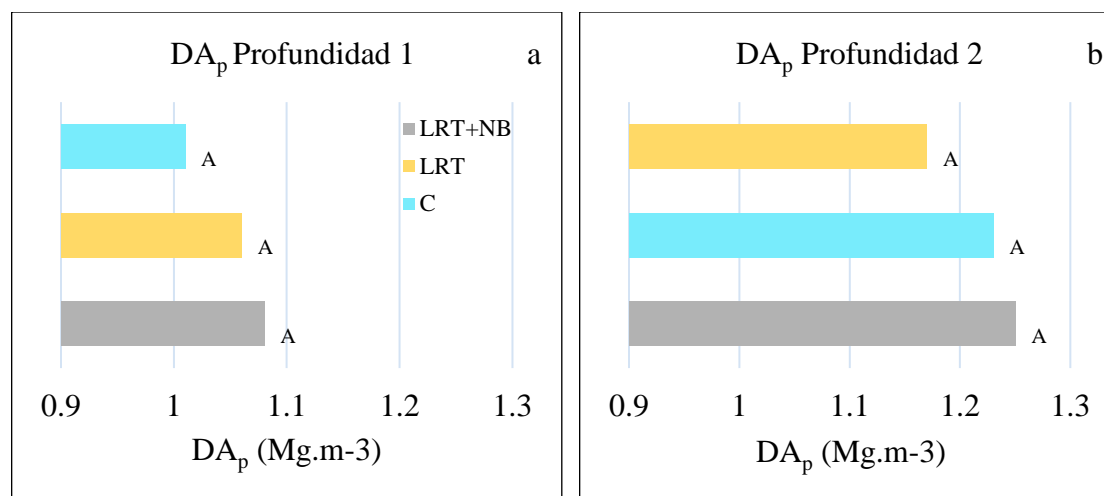


Figura 5. Valores promedios de densidad aparente del suelo (DA_p) para la profundidad 1 (a) y la profundidad 2 (b)

El tipo de laboreo (convencional o reducido) y los diferentes abonos verdes utilizados no tuvieron un efecto significativo en la densidad aparente del suelo. Esto concuerda con lo encontrado por Cookson et al. (2008), Arboleya et al. (2012), quienes luego de 6 años utilizando distintos tipos de laboreo del suelo, no observaron diferencias en la densidad aparente del suelo entre los tratamientos.

Otros trabajos muestran que la densidad aparente en los primeros 7 cm de suelo son mayores en los sistemas de laboreo reducido o siembra directa en comparación con los sistemas que utilizan laboreo convencional. De Sousa Neto et al. (2008) encontraron que la densidad del suelo fue mayor en los sistemas conservacionistas que en los sistemas de laboreo convencional, y proponen que el laboreo convencional afloja la tierra, generando macroporos que disminuyen la densidad aparente del suelo, mientras que en el laboreo reducido el suelo solo se mueve en la línea de siembra.

Sin embargo, los resultados de D'Haene et al. (2008b) muestran que luego de algunos años, los tratamientos con laboreo reducido presentaron menor densidad aparente que los que tuvieron laboreo convencional; y explican esto por el mayor contenido de COS en los tratamientos de laboreo reducido. En el mismo sentido,

Reichert et al. (2016) proponen que luego de un período prolongado de no laboreo del suelo, la densidad aparente del mismo tiende a disminuir debido a un reordenamiento de las partículas del suelo durante procesos de hinchamiento y contracción repetidos. También en los tratamientos sin laboreo se observa un aumento del contenido de materia orgánica en la capa superficial del suelo, lo que mejora la agregación y la estabilización de la estructura del suelo; y un aumento de la actividad biológica del suelo, que incrementa la macroporosidad del mismo, logrando así una densidad aparente más baja.

Si bien la densidad aparente no tuvo diferencias entre los distintos tratamientos, la densidad aparente en la profundidad 1 fue significativamente menor que en la profundidad 2 (ver cuadro 15).

Cuadro 15. Valores medios de DA_p ($Mg.m^{-3}$) del suelo para la profundidad 1 (5-10 cm) y la profundidad 2 (15-20 cm)

Profundidad	DA_p
1	1.05 A
2	1.22 B
EE	0.02
CV	11.2
P_{valor}	<0.001

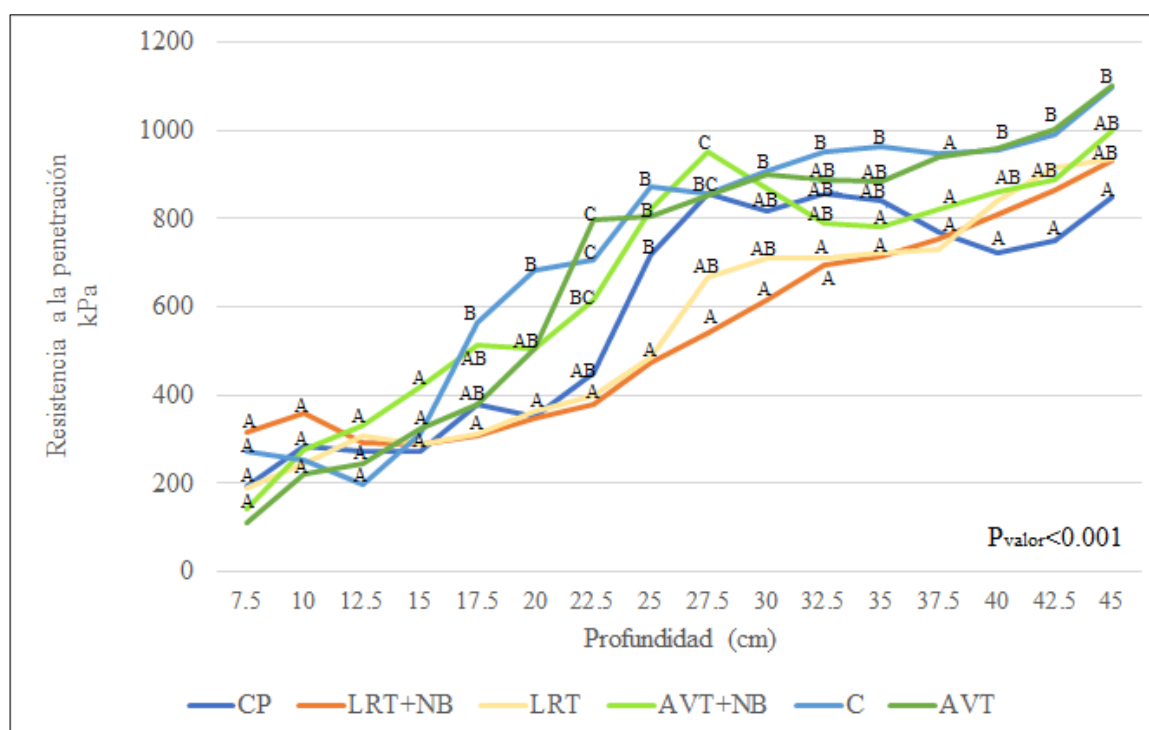
Esto es coherente con la situación general de los suelos y concuerda con los trabajos de De Sousa Neto et al. (2008), Crittenden et al. (2015) donde la densidad del suelo fue menor en la capa superficial (0-7,5 cm. y 0-5 cm. respectivamente) en comparación con las capas más profundas. De Sousa Neto et al. (2008) observaron que inversamente al aumento de la densidad aparente del suelo en profundidad, el volumen de macroporos disminuía, determinando menor aireación del suelo.

En este ensayo la densidad del suelo varió entre 0,87 y 1,42 $Mg.m^{-3}$ para las dos profundidades. Estos valores fueron inferiores a 1,55 $Mg.m^{-3}$, que es el valor propuesto por Reichert et al. (2003) como limitante para el crecimiento radicular de cultivos anuales para suelos de textura media; por lo que se puede considerar que la densidad aparente del suelo no fue un factor limitante para el crecimiento de las plantas de maíz dulce bajo los diferentes manejos de suelo del ensayo.

4.4.4. Resistencia a la penetración

El promedio de la resistencia a la penetración en los primeros 45 cm del suelo tuvo diferencias significativas entre los distintos manejos de suelo realizados ($P_{valor}=0.007$). Esta variable fue medida 24 días luego de sembrado el maíz dulce (fecha 1 de medición de humedad del suelo).

Los valores de 0 a 5 cm fueron eliminados para el análisis debido a la gran cantidad de datos sin valor. En la capa superficial, de 7,5 a 15,0 cm de profundidad no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. A partir de los 17,5 cm de profundidad se observan diferencias entre los distintos manejos de suelo, donde los tratamientos con laboreo reducido (LR_T y LR_{T+NB}) tienen menores resistencias a la penetración que los tratamientos con laboreo convencional. El tratamiento “C”, sin abono verde ni agregado de cama de pollo, es el que presenta los valores más altos de resistencia a la penetración para la mayoría de las profundidades. Esto puede observarse gráficamente en la figura 6.



Nota: el P_{valor} corresponde a la interacción tratamiento por profundidad. Las letras separan valores dentro de cada profundidad.

Figura 6. Valores medios de resistencia a la penetración para cada profundidad (7.5 a 45 cm), según el tratamiento

Como se observa en la gráfica, después de los 15 cm y hasta los 35 cm de profundidad, los tratamientos de laboreo reducido (línea amarilla y línea anaranjada) presentan los valores más bajos de resistencia a la penetración, existiendo diferencias significativas entre el tratamiento de laboreo reducido y el tratamiento “C” (línea celeste) para todas esas profundidades. A los 37,5 cm. de profundidad no se observan diferencias significativas entre los tratamientos, y desde la profundidad 40 a 45 cm. el

tratamiento “CP” (línea azul) es el que presenta menor resistencia a la penetración, diferenciándose significativamente de “C” y “AVT”.

Los valores de resistencia a la penetración permiten evaluar el estado de la estructura del suelo a diferentes profundidades y puede ser útil para comprender el enraizamiento de los cultivos. La mayor cantidad de raíces del maíz se ubican en los primeros 15 cm de suelo (Chen y Weil, 2011). En este ensayo no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para estas profundidades, por lo que es de esperar que no hubiera un efecto importante de los diferentes laboreos y manejos del suelo en el desarrollo radicular del maíz dulce. Sin embargo, Chen y Weil (2011) muestran que el desarrollo radicular de las plantas de maíz en los suelos con menor compactación alcanzó los 60 cm de profundidad sin inconvenientes, mientras que la densidad de raíces encontradas en profundidad en los suelos compactados fue muy escasa. Esto implica que los tratamientos que tuvieron laboreo reducido del suelo, y en este ensayo menor resistencia a la penetración, pudieron haber tenido un mayor desarrollo radicular que los tratamientos con laboreo convencional.

Crittenden et al. (2015), Peigné et al. (2018) reportaron no haber detectado diferencias significativas en los valores de resistencia a la penetración entre los distintos laboreos del suelo en los primeros 15 cm del perfil, lo que es consistente con los resultados de este ensayo. Sin embargo, los valores de resistencia a la penetración reportados por estos autores en profundidad fueron opuestos. En la capa de suelo entre 15 y 35 cm. de profundidad los tratamientos que fueron arados presentaron menor resistencia a la penetración, y en los suelos donde la intensidad y la profundidad de laboreo fue menor, la resistencia a la penetración aumentó (Crittenden et al. 2015, Peigné et al. 2018).

Reichert et al. (2016) evaluaron la evolución de la estructura del suelo luego de laboreado durante 14 años. Estos autores plantean que en los primeros años de no laboreo se observa menor compactación en la capa superficial del suelo (0-15 cm.), pero mayor densidad aparente y compactación del suelo por debajo de 15 cm. Después de 14 años sin laboreo el suelo presenta una estabilidad mayor y se observa un aumento de la porosidad del suelo, y una disminución de la compactación y de la densidad aparente del mismo, también en las capas más profundas (14-21 cm.).

Los resultados del presente ensayo pudieron estar condicionados por el contenido de humedad diferencial en los distintos tratamientos. La resistencia a la penetración es dependiente de algunas propiedades del suelo, como ser: la textura del mismo, la densidad aparente y el contenido de agua del suelo (Crittenden et al., 2015). La textura y la densidad aparente del suelo fueron similares en todo el ensayo, por lo que el contenido de agua puede ser el factor que explique las diferencias en la resistencia a la penetración del suelo en la capa de 15 a 35 cm. del perfil del suelo. A continuación se presenta de forma gráfica en la figura 7 el contenido de agua promedio para cada

tratamiento el día que se midió la compactación del mismo.

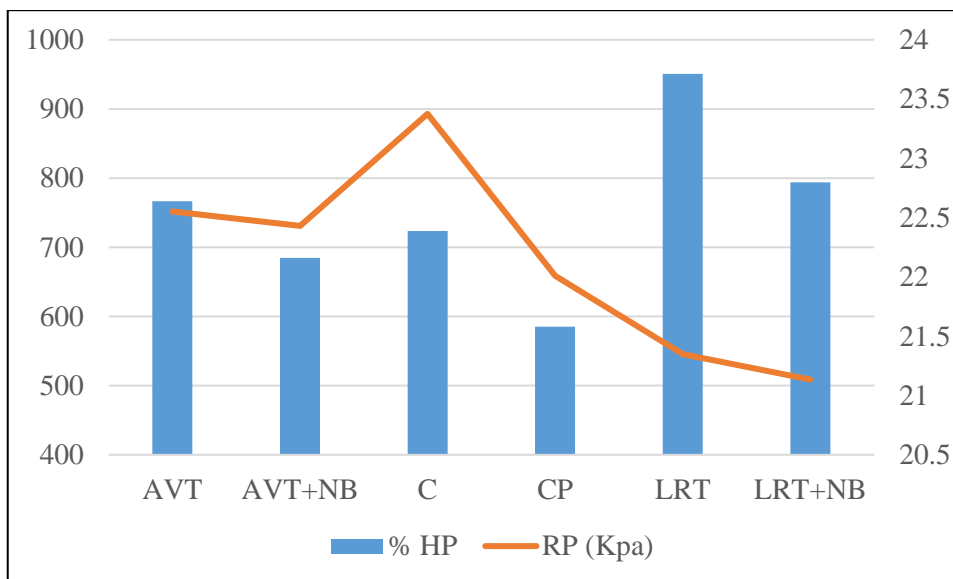


Figura 7. Valores medios de resistencia a la penetración (línea anaranjada) y valores medios de humedad (barras azules) para la zona entre 15 y 35 cm. del perfil del suelo

Como puede observarse en la figura 7, los tratamientos de laboreo reducido del suelo (LRT y LRT+NB) presentan los valores más altos de humedad, y los más bajos de resistencia a la penetración para esas profundidades, por lo que los menores valores de resistencia a la penetración pueden deberse a un mayor contenido de agua y no a un efecto del laboreo en la estructura del suelo.

También puede observarse en la gráfica, cómo el tratamiento “C” (tratamiento que no tuvo agregado de cama de pollo ni abonos verdes) presenta un contenido de agua promedio similar al resto de los tratamientos con laboreo convencional, pero sin embargo los valores de resistencia a la penetración son mayores.

De todas formas, en todos los tratamientos evaluados, los valores de resistencia a la penetración más altos que se obtuvieron en este ensayo estuvieron en torno a los 1000 kPa. Estos valores se encuentran muy por debajo de 2000 kPa, que es la resistencia a partir de la cual se tiende a limitar el crecimiento radicular (Reichert et al., 2003).

4.5. CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS DE MAÍZ DULCE

4.5.1. Análisis foliar

Si bien no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para esta variable, el tratamiento que tuvo laboreo convencional con agregado de cama de pollo (CP) presentó los valores más altos de nitrógeno foliar (%), mientras que el

tratamiento que tuvo laboreo convencional, pero sin agregado de cama de pollo (C) tuvo los valores más bajos. Para los tratamientos con laboreo reducido (LR_T y LR_{T+NB}), se observa una tendencia a tener concentraciones más bajas de N foliar que el tratamiento CP y más altas que C, AV_T y AV_{T+NB} .

Cuadro 16. Valores promedios del % N foliar según el tratamiento

Tratamiento	%N
CP	2.9
LR_{T+NB}	2.7
LR_T	2.6
AV_T	2.4
AV_{T+NB}	2.4
C	2.3
EE	0.17
CV	11.37
P_{valor}	0.157

Según los rangos de nutrientes presentados por Parera (2017) para diagnosticar el nivel nutricional del maíz, los niveles óptimos de N foliar para el crecimiento de maíz están entre 2,5 y 3,5%. Los tratamientos con laboreo reducido y abonos verdes, y el tratamiento de laboreo convencional y cama de pollo estuvieron dentro de ese rango, mientras que los tratamientos de abonos verdes enterrados y el tratamiento con laboreo convencional sin enmiendas presentaron valores correspondientes al rango bajo de N foliar (entre 1,9% y 2,5%), pero acercándose a los niveles óptimos.

Por otro lado, García (2005) presenta como rango de valores críticos de N en hoja al momento de floración entre 2,75-3,5%, por lo que todos los tratamientos menos “CP” presentaron déficit de N según este autor. Esto implica que la fertilización, tanto orgánica como inorgánica, no fue suficiente para satisfacer los requerimientos de N de las plantas de maíz dulce. Sin embargo, en el campo no se observaron síntomas visuales de deficiencia de N en ninguno de los tratamientos. Probablemente la dosis extra de nitrógeno agregada en los tratamientos que tuvieron abonos verdes (LR_{T+NB} , LR_T , AV_{T+NB} y AV_T) no fue suficiente para compensar la inmovilización de N que se da por la descomposición de los mismos.

4.5.2. Altura de la planta y diámetro del tallo a cosecha

La altura de las plantas (desde el primer nudo hasta inicio de panoja) del tratamiento que tuvo laboreo reducido con abono verde de trigo (LR_T), fue significativamente mayor que la altura de las plantas en los tratamientos de laboreo convencional, con abono verde y agregado de cama de pollo (AV_T y AV_{T+NB}). En cuanto

al diámetro del tallo (medido 2 cm por encima del segundo nudo), si bien está directamente relacionada con la altura de las plantas, esta variable no tuvo diferencias significativas según los distintos manejos del suelo y para el nivel de significación elegido ($P_{\text{valor}} < 0.05$).

Cuadro 17. Valores promedios de la altura de las plantas y del diámetro del tallo al momento de cosecha, según el tratamiento

Tratamiento	Altura de la planta (m)	Diámetro del tallo (cm)
LR _T	1.39 _A	2.44 _{AB}
LR _{T+NB}	1.32 _{AB}	2.41 _{AB}
CP	1.28 _{AB}	2.63 _A
C	1.25 _{ABC}	2.21 _B
AV _T	1.20 _{BC}	2.38 _{AB}
AV _{T+NB}	1.13 _C	2.20 _B
EE	0.05	0.11
CV	14.34	15.94
P _{valor}	0.02	0.07

Del análisis de los contrastes presentados en el cuadro 2, surge que en los tratamientos con laboreo reducido se obtuvo mayor altura de plantas ($P_{\text{valor}} = 0.003$) que los que tuvieron un manejo de suelo convencional (contraste 1). Sin embargo, el tratamiento con cama de pollo “CP” sin abonos verdes y laboreo convencional, presentó los valores promedio más altos de diámetro del tallo.

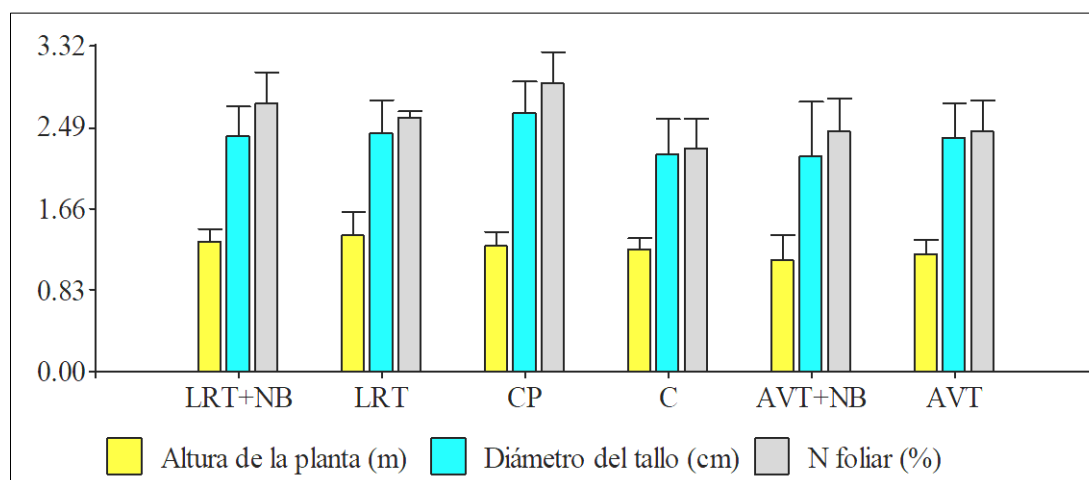


Figura 8. Diámetro del tallo, altura promedio de las plantas al momento de cosecha y N foliar

La mayor altura de las plantas en los tratamientos con laboreo reducido puede estar explicada por el mayor contenido de humedad de los suelos, tanto en superficie como en profundidad. Esto coincide con lo encontrado por Rivera et al. (2009) quienes evaluaron el crecimiento de las plantas de maíz dulce bajo diferentes condiciones de humedad de suelo y 3 dosis distintas de fertilización con fósforo; y observaron que las plantas que crecieron en condiciones de mayor humedad del suelo tuvieron una altura de las plantas mayor. Este trabajo también mostró una correlación positiva entre las variables altura de la planta y diámetro del tallo, donde a mayor altura de la planta mayor fue su diámetro (Rivera et al., 2009). En este ensayo la mayor altura de las plantas no necesariamente se correspondió con diámetros mayores, ya que los tratamientos con laboreo reducido presentaron plantas de mayor altura, pero con tallos más chicos que las plantas del tratamiento “CP”.

Por otro lado, se observa en la figura 8 una tendencia a que los tratamientos que tuvieron un contenido de N foliar mayor también presentaron tallos más gruesos. Es decir, las plantas que tuvieron mayor contenido de N foliar desarrollaron plantas más vigorosas con tallos más gruesos.

4.6. RENDIMIENTO DEL CULTIVO

A continuación se presentan los valores promedio para cada tratamiento de las variables relativas a los resultados productivos: rendimiento promedio en toneladas por hectárea y el número total de choclos por hectárea.

Cuadro 18. Rendimiento promedio de maíz dulce en toneladas por hectárea y en número de choclos por hectárea según el tratamiento

Tratamiento	Rendimiento promedio (tt/ha)	No. de choclos por ha
CP	10.2	37778
LR _T	9.5	35555
LR _{T+NB}	9.0	30000
AV _{T+NB}	6.2	27778
AV _T	5.6	28889
C	5.4	26667
EE	1.95	5231
CV	44.23	29.12
P _{valor}	0.36	0.60

Los valores de rendimiento, ya sea medido como el no. de choclos por hectárea o las toneladas de choclo por hectárea, no tuvieron diferencias significativas entre los

distintos tratamientos.

Se probaron los contrastes ortogonales detallados en el cuadro 2 para las dos variables relacionadas con el rendimiento, pero no se observó en ningún caso un efecto de los tratamientos del suelo en estas variables. Como se puede observar en el cuadro 19 el P_{valor} fue mayor a 0,05 para todos los contrastes evaluados.

Cuadro 19. Contrastes para variables relativas al rendimiento

Contrastes		1	2	3	4	5
Variable: rendimiento (tt/ha)	EE	6.77	3.91	3.91	10.7	6.77
	P_{valor}	0.19	0.12	0.96	0.23	0.88
Variable: no. de choclos/ha	EE	18122	10463	10463	28653	18122
	P_{valor}	0.59	0.41	0.54	0.37	0.72

Los valores promedio de rendimiento para cada tratamiento fueron muy diferentes, el tratamiento “CP” tiene un rendimiento promedio cercano al doble del rendimiento promedio del tratamiento “C” (ver cuadro 18). El hecho de que no existan diferencias significativas entre los tratamientos está dado por la gran variabilidad de resultados dentro de cada tratamiento. Esto fue debido a que el cultivo presentaba en todos los tratamientos zonas muy enmalezadas, en algunos casos con faltante de plantas y en otros casos había plantas con choclos que no tenían tamaño comercial, dando lugar a que en cada tratamiento existieran parcelas con buenos resultados y parcelas con rendimientos muy bajos. Esta variabilidad no permitió diferenciar estadísticamente los tratamientos.

Al comparar los rendimientos del ensayo con el rendimiento promedio nacional de 5,7 Mg/ha, se observa que todos los tratamientos tuvieron rendimientos similares o superiores al rendimiento promedio nacional (MGAP. DIEA, 2017). De todas formas los resultados productivos del cultivo en general no fueron buenos, pudiendo deberse a algunos factores como ser: agua limitante (la humedad del suelo fue cercana al punto de marchitez permanente en cuatro oportunidades durante el ciclo del maíz dulce, siendo éste un cultivo con gran respuesta al riego), falta de nitrógeno (los valores de % de nitrógeno foliar fueron cercanos al valor crítico para todos los tratamientos) y la incidencia de malezas, existiendo una presencia importante de éstas desde mitad hacia fin del ciclo del maíz dulce, compitiendo con el cultivo por nutrientes (principalmente agua).

El tratamiento “C” fue el que presentó un rendimiento promedio más bajo, pudiendo deberse esto al efecto acumulado negativo de la no incorporación de materia orgánica al sistema durante 6 años. Este tratamiento presentó también un promedio de

altura de las plantas más bajo, un diámetro de tallo más chico y un contenido de N foliar menor que el resto de los tratamientos; por lo que era esperable que los rendimientos fueran menores. Según el trabajo realizado por Rivera et al. (2009) las plantas que tuvieron mayor altura y mayor diámetro del tallo presentaron los rendimientos más altos; y viceversa.

El menor contenido de carbono orgánico del suelo encontrado en el tratamiento “C” con respecto al resto de los tratamientos (ver cuadro 7) puede estar determinando los rendimientos más bajos.

Según Scopel et al. (2005) utilizando la tecnología de laboreo reducido se logra reducir el escurrimiento de agua entre un 10 y un 50% y las pérdidas de suelo por erosión entre 50 y 90% en comparación con el laboreo convencional, dependiendo la magnitud del año, de la pendiente y de la cantidad de residuos que quedan como mulch en superficie. Luego de 5 años, los niveles de carbono del suelo en el laboreo reducido aumentaron más de 20% en comparación con el laboreo convencional, debido principalmente al aporte de residuos y a la reducción de la erosión. La disminución del COS generada en sistemas con laboreo convencional afecta la productividad general del suelo y por lo tanto los rendimientos de los cultivos. Estos autores encontraron rendimientos de maíz más altos en los tratamientos de laboreo reducido, explicado por una mayor eficiencia del uso de agua y nutrientes, mayor acumulación de materia orgánica y una reducción de la erosión.

5. CONCLUSIONES

Los beneficios de la tecnología de laboreo reducido y uso de abonos verdes en las propiedades biológicas y físico-químicas del suelo son ampliamente difundidos en la bibliografía, destacándose la reducción significativa de la erosión hídrica y el aumento de la materia orgánica del suelo.

Este trabajo permitió avanzar en el conocimiento de esta tecnología a nivel local, generando mayor experiencia del manejo del laboreo reducido sobre los suelos presentes en el sur de Uruguay. La información generada aporta herramientas para continuar adaptando esta tecnología a la producción hortícola y podría servir de incentivo para que el laboreo reducido pueda tener mayor adopción por parte de los productores en este rubro.

El tipo de laboreo tuvo impacto en el pH del suelo, siendo los tratamientos con laboreo reducido los que presentaron los niveles de pH más altos para todas las fechas de muestreo. El efecto de los residuos de los abonos verdes dejados en superficie como mulch, permitió que aumentara la concentración de bases en la capa superficial del suelo y eso se vio reflejado en un aumento del pH.

La mayoría de las propiedades físico-químicas del suelo se vieron afectadas por el agregado o no de materia orgánica (cama de pollo y abonos verdes) y no tanto por el tipo de laboreo realizado. Los tratamientos con agregado de enmiendas, ya sea solo cama de pollo o combinado con abonos verdes, tuvieron valores mayores de pH, de carbono orgánico del suelo, de potasio y de nitratos.

El manejo convencional sin agregado de cama de pollo ni abonos verdes (tratamiento "C") presentó los niveles más bajos de COS, de potasio, de nitratos y de pH del suelo, presentando una tendencia a la acidificación debido al agregado anual de urea. El agregado de enmiendas orgánicas en el resto de los tratamientos permitió neutralizar el proceso de acidificación generado por la nitrificación de la urea.

El efecto acumulado de los mismos tratamientos durante seis años de ensayo en el mismo cuadro, permitió observar los efectos en el largo plazo de los tratamientos. Esto se observó principalmente en el tratamiento "C", el cual comenzó el ensayo con los valores más bajos de COS, pH, potasio y nitratos; y continuó esa tendencia también en el año estudiado.

Con respecto a las propiedades físicas del suelo, los tratamientos con laboreo reducido tuvieron mayor contenido de humedad en superficie y en profundidad. Salvo en la fecha 7, en la cual el contenido de agua fue alto y no se observaron diferencias en el contenido de humedad superficial, los tratamientos con laboreo reducido tuvieron valores de contenido de humedad en los primeros centímetros de suelo entre un 8 y un

28% mayor que los tratamientos con laboreo convencional. En cuanto a la humedad en profundidad, los mm promedio acumulados entre 10-100 cm. del perfil de suelo fueron de 263.3 para los tratamientos con laboreo reducido y de 253.8 para los tratamientos con laboreo convencional. Esto puede deberse a que el abono verde dejado como mulch en superficie tiene un rol importante en los procesos que determinan el contenido de agua del suelo. El mulch interviene en la disminución de la temperatura del suelo, disminuyendo así la evaporación; favorece la infiltración; reduce el escurrimiento y el riesgo de erosión del suelo.

Por otro lado, no hubo diferencias entre los tratamientos en cuanto a las variables referidas a la compactación del suelo en superficie (densidad aparente y resistencia a la penetración). No se observó un efecto del tipo de laboreo ni de la especie de abono verde utilizada. Los tratamientos que tuvieron el abono verde mezcla, que incluía el uso de nabo forrajero, no tuvo un efecto diferencial en favorecer la descompactación. Sin embargo, se observó un efecto del tipo de laboreo en la compactación del suelo en profundidad. Entre los 15 y los 35 cm del perfil del suelo, los tratamientos con laboreo reducido, independientemente del abono verde que tuvieran, presentaron valores más bajos de resistencia a la penetración con respecto a los tratamientos con laboreo convencional. De todas formas, este efecto del tipo de laboreo en la compactación pudo estar relacionado con el mayor contenido de humedad que tuvieron los tratamientos de laboreo reducido.

En cuanto a los problemas de esta tecnología citados en la bibliografía con respecto a la inmovilización de N compitiendo con el cultivo comercial, la dosis de urea extra agregada en los tratamientos que tuvieron abonos verdes permitió superar las limitantes de déficit de N durante el crecimiento del cultivo comercial. Sin embargo, si bien no se observaron visualmente deficiencia de N en el cultivo, los valores de N foliar fueron cercanos a los valores críticos en todos los tratamientos. Este resultado debe ser tenido en cuenta a la hora de implementar los manejos de suelo que incluyan el uso de abonos verdes, ya que los resultados productivos pueden verse afectados si no se considera la cantidad de nitrógeno necesaria en el proceso de descomposición de los abonos verdes.

En base a esto, los tratamientos con el manejo de laboreo reducido y abonos verdes lograron obtener rendimientos por encima del promedio nacional y similares al resto de los tratamientos del ensayo.

El tratamiento con laboreo convencional y agregado de cama de pollo "CP" presentó los niveles finales de nitrato en el suelo más altos, y las plantas con mayor diámetro y % de nitrógeno foliar, lo que determinó una tendencia a que este tratamiento presentara los valores más altos de toneladas de choclo por hectárea.

En conclusión, el uso de la tecnología de laboreo reducido con abonos verdes sobre camellones en la producción hortícola tiene la capacidad de mejorar varias propiedades físicas y físico-químicas del suelo, y ajustando la fertilización es posible obtener rendimientos promedios similares a los obtenidos realizando un manejo con laboreo convencional del suelo. Además, el laboreo reducido aumentó el contenido de agua del suelo, lo cual es una ventaja a considerar en los cultivos de primavera y verano, momento en el que normalmente existe déficit hídrico en Uruguay.

6. RESUMEN

La producción hortícola en el sur de Uruguay se realiza sobre suelos muy degradados, con laboreos frecuentes y poco agregado de materia orgánica al suelo, lo que afecta la productividad y sostenibilidad de los sistemas. Estudios previos han demostrado que el laboreo reducido junto con el uso de abonos verdes sobre camellones, logra reducir el escurrimiento y la pérdida de suelo por erosión, además de aumentar la infiltración y la humedad del suelo. Las limitantes de esta tecnología tienen que ver con la deficiencia de N y la compactación de los suelos, lo que muchas veces resulta en un menor rendimiento de los cultivos. Esta tesis tuvo como objetivo cuantificar el impacto del laboreo reducido y el uso de abonos verdes y cama de pollo en algunas propiedades físicas y físico-químicas del suelo, y en el rendimiento de maíz dulce. También se propone evaluar la incorporación del nabo forrajero y su efecto en la descompactación del suelo. El experimento fue realizado durante los años 2015 y 2016 en el departamento de Canelones, Uruguay, en un cultivo de maíz dulce plantado sobre un Brunosol Subéutrico Típico. Los tratamientos incluyeron diferentes manejos del suelo: laboreo convencional (C), laboreo convencional con agregado de cama de pollo (CP), laboreo convencional con agregado de cama de pollo y abono verde de trigo (AV_T) y de trigo y nabo forrajero (AV_{T+NB}), laboreo reducido con cama de pollo y abono verde de trigo (LR_T) y abono verde de trigo y nabo forrajero (LR_{T+NB}) en un cultivo de maíz dulce. El laboreo reducido presentó mayor pH que los tratamientos con laboreo convencional. La mayoría de las propiedades físico-químicas del suelo se vieron afectadas por el agregado de materia orgánica (cama de pollo y abonos verdes) y no por el tipo de laboreo. El tratamiento C, sin agregado de materia orgánica, tuvo valores más bajos de pH, COS, BI y NO_3 . LR_T y LR_{T+NB} tuvieron mayor contenido de humedad en superficie y en profundidad. No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a la resistencia a la penetración o densidad aparente del suelo en superficie. LR_T y LR_{T+NB} tuvieron menor resistencia a la penetración en profundidad, entre los 15 y los 35 cm. del perfil del suelo. El nabo forrajero no tuvo efecto significativo en ninguna de las propiedades del suelo analizadas. No hubo problemas de deficiencia de N en el cultivo de maíz dulce y los rendimientos del cultivo fueron superiores a 5 tt/ha en todos los casos, siendo el tratamiento C el que presentó los rendimientos más bajos; posiblemente por un efecto acumulado de repetir los mismos tratamientos durante seis años en el cuadro, que determinó que C comenzara el ensayo con valores más bajos de COS, entre otros. El laboreo reducido con abonos verdes dejados en superficie como mulch es viable en la producción hortícola y es posible obtener rendimientos similares que bajo laboreo convencional.

Palabras clave: Laboreo reducido; Abonos verdes; Cama de pollo; Trigo; Nabo forrajero; Maíz dulce; Propiedades físico-químicas del suelo.

7. SUMMARY

Vegetable production in south Uruguay is carried out on very degraded soils, with frequent tillage and little inputs of organic matter to the soil, which affects systems productivity and sustainability. Previous studies have shown that reduced tillage with the use of green manure on raised beds, allows to reduce runoff and soil runoff, in addition to increasing infiltration and soil moisture. The limits of this technology have to do with N deficiency and soil compaction, which often results in lower crop yields. This thesis aimed to quantify the impact of reduced tillage and the use of green manure and chicken manure, in some physical and physicochemical properties of the soil, and in sweet corn yields. It is also proposed to evaluate the incorporation of forage turnip and its effect on soil decompaction. The experiment was carried out during 2015-2016 in Canelones, south Uruguay, in a sweet corn crop system seeded in a Brunosol Subeutrico Tipico. Treatments included different soil management: convencional tillage (C), convencional tillage with chicken manure (CP), conventional tillage with chicken manure and wheat green manure (AV_T), wheat and forage turnip green manure (AV_{T+NB}), reduced tillage with chicken manure and wheat green manure (LR_T), wheat and forage turnip green manure (LR_{T+NB}) in a sweet corn crop. Reduced tillage showed higher soil pH than conventional tillage. Most of the physical-chemical properties of the soil were affected by the addition of organic matter (chicken and green manures) and not by the tillage. C treatment, which had no organic matter inputs, had lower values of pH, COS, BI and NO_3 . LR_T and LR_{T+NB} had higher moisture content, on surface and depth. No significant differences were observed between treatments in surface bulk density or penetration resistance. LR_T and LR_{T+NB} had lower depth penetration resistance compaction between 15 and 35 cm. of the soil profile. Forage turnip had no significant effect on any of the soil properties analyzed. There were no problems of N deficiency in the sweet corn crop and crop yields were higher than 5 tt/ha in all cases. C had the lowest yields; possibly due to acumulative effect of the treatments during six years, which determined that C began the trial with lower COS values. Reduced tillage with green manures left as mulch is viable in vegetable production and it is possible to obtain similar yields than under conventional tillage

Keywords: Reduced tillage; Green manure; Chicken manure; Wheat; Forage turnip; Sweet corn; Soil physicochemical properties.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Alliaume, F.; Rossing, W. A. H.; García, M.; Giller, K. E.; Dogliotti, S. 2013. Changes in soil quality and plant available water capacity following systems re-design on commercial vegetable farms. *European Journal of Agronomy*. 46: 10-19.
2. _____.; _____.; Tittonell, P.; Jorge, G.; Dogliotti, S. 2014. Reduced tillage and cover crops improve water capture and reduce erosion of fine textured soils in raised bed tomato systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 183: 127-137.
3. _____.; _____.; _____.; Dogliotti, S. 2015. Improving resource use efficiency and soil conservation in smallholder vegetable systems though improve soil tillage and residue management. In: International Symposium for Farming Systems Design (5th., 2015, Montpellier, France). Proceedings. s.n.t. pp. 27-28.
4. _____.; _____.; _____.; _____. 2017. Modelling soil tillage and mulching effects on soil water dynamics in raised-bed vegetable rotations. *European Journal of Agronomy*. 82: 268-281.
5. Allmaras, R. R.; Langdale, G. W.; Unger, P. W.; Dowdy, R. H.; Van Doren, D. M. 1991. Adoption of conservation tillage and associated planting systems. In: Lal, R.; Pierce, F. J. eds. *Soil Management for Sustainability*. Ankeny, Soil and Water Conservation Society. pp. 53-83.
6. Amado, T. J. C.; Mielniczuk, J.; Aita, C. 2002. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 26: 241-248.
7. Arboleya, J.; Gilsanz, J. C.; Alliaume, F.; Leoni, C.; Falero, M.; Guerra, S. 2010. Manejo sustentable en producción hortícola intensiva. In: Seminario de Actualización Técnica (2010, Las Brujas, Canelones). Manejo de suelos para producción hortícola sustentable. Montevideo, INIA. pp. 9-19 (Actividades de Difusión no. 624).
8. _____.; _____.; _____.; _____.; _____.; Aranda, S.; Guerra, S. 2011. Manejo sustentable en la producción hortícola intensiva. In: Día de Campo Jardín de Abonos Verdes de Verano (2011, Rincón del Colorado, Canelones). Módulo de investigación comprobatoria hortícola. Montevideo, INIA. pp. 17-28 (Actividades de Difusión no. 641).

9. _____.; _____.; _____.; _____.; _____.; Guerra, S. 2012. Minimum tillage and vegetable crop rotation; striving for sustainable high productivity through improved soil and crop management. *Agrociencia* (Uruguay). 16(3): 62-70.
10. Barbazán, M.; Del Pino, A.; Moltini, C.; Hernández, J.; Rodríguez, J.; Beretta, A. 2010. Aplicación de enmiendas orgánicas y efectos en el suelo. *In*: Seminario de Actualización Técnica (2010, Rincón del Colorado, Canelones). Manejo de suelos para producción hortícola sustentable. Montevideo, INIA. pp. 21-31 (Actividades de Difusión no. 624).
11. _____.; _____.; _____.; _____.; _____. 2011. Caracterización de materiales orgánicos aplicados en sistemas agrícolas intensivos de Uruguay. *Agrociencia* (Uruguay). 15(1): 82-92.
12. Blake, G. R.; Hartge, K. H. 1986. Bulk Density. *In*: Klute, A. ed. *Methods of Soil Analysis*. Madison, Wisconsin, ASA/SSSA. pp. 363-375.
13. Boguzas, V.; Mikucioiené, R.; Slepetiene, A.; Sinkeviciene, A.; Feiza, V.; Steponaviciene, V. 2015. Long-term effect of tillage systems, straw and green manure combinations on soil organic matter. *Zemdirbyste-Agriculture*. 102(3): 243-250.
14. Borin, A. L. D. C.; Lana, R. M. Q.; Pereira, H. S. 2010. Absorção, acúmulo e exportação de macronutrientes no milho doce cultivado em condições de campo. *Ciência e Agrotecnologia*. 34: 1591-1597.
15. Bray, R. H.; Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*. 59: 39-45.
16. Bremner, J. M.; Mulvaney, C. S. 1982. Nitrogen Total. *In*: Page, A. L.; Miller, R. H.; Keeney, D. R. eds. *Method of soil analysis. Chemical and microbiological properties*. Madison. Wisconsin, ASA/SSSA. pp. 595-622.
17. Cai, Z.; Wang, B.; Xu, M.; Zhang, H.; He, X.; Zhang, L.; Gao, S. 2015. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. *Journal of Soils and Sediments*. 15: 260-270.
18. Carámbula, M. 2007. *Verdeos de invierno*. Montevideo, Hemisferio Sur. 178 p.

19. Chen, G.; Weil, R. R. 2011. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil and Tillage Research*. 117: 17-27.
20. Ciampitti, I. A.; García, F. O. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 33: 13-16.
21. Clérici, C.; Baethgen, W.; García Préchac, F.; Hill, M. 2004. El cultivo de soja y la conservación del suelo. *Cangüé*. no. 26: 20-22.
22. Cook, H. F.; Valdes, G. S. B.; Lee, H. C. 2006. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays*. *Soil and Tillage Research*. 91: 227-235.
23. Cookson, W. R.; Murphy, D. V.; Roper, M. M. 2008. Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology and Biochemistry*. 40(3): 763-777.
24. Cooper, J. M.; Warman, P. R. 1997. Effects of three fertility amendments on soil dehydrogenase activity, organic C and pH. *Canadian Journal of Soil Science*. 77(2): 281-283.
25. _____; Baranski, M.; Stewart, G.; Nobel-de Lange, M.; Bàrberi, P.; Fliebach, A.; Peigné, J.; Berner, A.; Brock, C.; Casagrande, M.; Crowley, O.; David, C.; De Vliegheer, A.; Döring, T.F.; Dupont, A.; Entz, M.; Grosse, M.; Haase, T.; Halde, C.; Hammerl, V.; Huiting, H.; Leithold, G.; Messmer, M.; Schloter, M.; Sukkel, W.; van der Heijden, M.G.A.; Willekens, K.; Wittwer, R.; Mäder, P. 2016. Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*. 36(22): 1-20.
26. Corres, A.; Gilsanz, J. C.; Silvera, M.; Arboleya, J.; Leoni, C. 2015. Abonos verdes, enmiendas orgánicas y mínimo laboreo: alternativas para mejorar la salud del suelo y potenciar la producción hortícola. *Revista INIA*. no. 42: 31-37.
27. Crittenden, S. J.; Poot, N.; Heinen, M.; van Balen, D. J. M.; Pulleman, M. M. 2015. Soil physical quality in contrasting tillage systems in organic and conventional farming. *Soil and Tillage Research*. 154: 136-144.

28. D´Haene, K.; Vandenbruwane, J.; De Neve, S.; Gabriels, D.; Salomez, J.; Hofman, G. 2008a. The effect of reduced tillage on nitrogen dynamics in silt loam soils. *European Journal of Agronomy*. 28(3): 449-460.
29. _____; Vermang, J.; Cornelis, W. M.; Leroy, B.; De Neve, W. S. S.; Hofman, G. 2008b. Reduced tillage effects on physical properties of silt loam soils growing root crops. *Soil and Tillage Research*. 99(2): 279-290.
30. De Sousa Neto, E. L.; Andrioli, I.; Beutler, A. N.; Centurion, J. F. 2008. Atributos físicos do solo e produtividade de milho em resposta a culturas de pré-safra. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 43(2): 255-260.
31. Del Pino, A.; Repetto, C.; Mori, C.; Perdomo, C. 2008. Patrones de descomposición de estiércoles en el suelo. *Terra Latinoamericana*. 26(1): 43-52.
32. Della Maggiora, A. I.; Irigoyen, A.; Gardiol, J. M.; Caviglia, O.; Echarte, L. 2002. Evaluación de un modelo de balance de agua en el suelo para el cultivo de maíz. *Revista Argentina de Agrometeorología*. 2: 167-176.
33. Devkota, M.; Martius, C.; Lamers, J. P. A.; Sayre, K. D.; Devkota, K. P.; Guptac, R. K.; Egamberdiev, O.; Vleka, P. L. G. 2013. Combining permanent beds and residue retention with nitrogen fertilization improves crop yields and water productivity in irrigated arid lands under cotton, wheat and maize. *Field Crops Research*. 149: 105-114.
34. Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; Robledo, C. W. 2018. InfoStat versión 2018. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. FCA. Grupo InfoStat. s.p. Consultado 15 jun. 2019. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>
35. Do Campo, R.; García, C.; Casanova, S.; Rabuffetti, A. 2005. Sistemas de cultivo para la producción hortícola sostenible en la región Sur de Uruguay. Efecto del estiércol de gallina en el cultivo de cebolla (*L. Allium cepa*). (en línea). Las Brujas, Uruguay, INIA. s.p. Consultado jun. 2018. Disponible en <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219230807164537.pdf>
36. Dogliotti, S.; Rossing, W. A. H.; Van Ittersum, M. K. 2004. Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems*. 80: 277-302.

37. _____.; Abedala, C.; Aguerre, V.; Albín, A.; Alliaume, F.; Alvarez, J.; Bacigalupe, G. F.; Barreto, M.; Chiappe, M.; Corral, J.; Dieste, J. P.; García de Souza, M. C.; Guerra, S.; Leoni, C.; Malán, I.; Mancassola, V.; Pedemonte, A.; Peluffo, S.; Pombo, C.; Salvo, G.; Scarlato, M. 2012. Desarrollo sostenible de sistemas de producción hortícolas y hortícola-ganaderos familiares: una experiencia de co-innovación. Montevideo, INIA. 112 p. (FPTA no. 33).
38. Durán, A.; García Préchac, F. 2007. Suelos del Uruguay: origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. v.3, 358 p.
39. Eghball, B.; Power, J. F. 1999. Phosphorus- and nitrogen-based manure and compost applications: corn production and soil phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*. 63(4): 895-901.
40. Ernst, O.; Siri-Prieto, G. 2009. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil and Tillage Research*. 105: 260-268.
41. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT). 2008. Conservation Agriculture. (en línea). Rome. s.p. Consultado jun. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/ag/ca/index.html>
42. García, F. O. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. (en línea). Rosario, INPOFOS. PPI. PPIC. Cono Sur. 21 p. Consultado dic. 2019. Disponible en <http://www.fertilizando.com/articulos/criterios-manejo-fertilizacion-cultivo-maiz.pdf>
43. García, M.; Reyes, C. 2001. Estudio de la respuesta de una sucesión de cultivos hortícolas a diferentes abonos orgánicos. *In*: Congreso Nacional de Horticultura (8º, 2001, Salto, Uruguay). Resúmenes. Salto, s.e. p. 29.
44. Gilsanz, J. C. 2008. Jardín de abonos verdes de invierno. *In*: Día de Campo Jornada Abonos Verdes (2008, Las Brujas, Canelones). Módulo de investigación comprobatoria hortícola. Montevideo, INIA. pp. 1-13 (Actividades de Difusión no. 546).
45. _____. 2012. Abonos verdes en la producción hortícola: usos y manejo. Montevideo, INIA. 64 p. (Serie Técnica no. 201).

46. Gómez, A.; Russi, C.; Dogliotti, S.; García, M.; Colnago, P.; Scarlato, M.; Acosta, D.; Pombo, C. 2013. Montevideo Rural Sustentable, informe de proyecto: sistemas de producción sustentables para agricultores familiares. Montevideo, Intendencia Municipal de Montevideo. Unidad de Montevideo Rural. 51 p.
47. González Fuentes, E. A.; Goyal, M. R.; Chao de Báez, C. 1988. Effects of three irrigation regimes on growth parameters and yield of drip irrigated sweet corn (*Zea mays* cv. Suresweet). The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico. 72(4): 565-574.
48. Guo, Z.; Zhang, Z.; Zhou, H.; Rahman, M.T.; Wang, D.; Guo, X.S.; Li, L.; Peng, X. 2018. Long-term animal manure application promoted biological binding agents but not soil aggregation in a vertisol. Soil and Tillage Research. 180: 232-237.
49. _____.; _____.; Fan, J.; Yang, X.; Yi, Y.; Han, X.; Wang, D.; Zhu, P.; Peng, X. 2019. Does animal manure application improve soil aggregation? Insights from nine long-term fertilization experiments. Science of the Total Environment. 660: 1029-1037.
50. Havlin, J. L.; Beaton, J. D.; Tisdale, S. L.; Nelson, W. L. 2005. Soil Fertility and Fertilizers; an introduction to nutrient management. 7th. ed. New Jersey, Pearson Educational. 497 p.
51. Hill, M.; García Prechac, F.; Terra, J.; Sawchik, J. 2008. Incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en el modelo USLE/RUSLE para estimar erosión en Uruguay. Agrociencia (Uruguay). 12(2): 57 - 67.
52. _____.; Clérici, C.; Sánchez, G.; Mancassola, V. 2015. Estimación de pérdidas de suelo por erosión hídrica en tres diferentes sistemas de manejo hortícola del sur de Uruguay. Agrociencia (Uruguay). 19(1): 94 - 101.
53. IMM. CAMM (Intendencia Municipal de Montevideo. Comisión Administradora del Mercado Modelo, UY). 2019. Observatorio Granjero: maíz dulce en Uruguay. Caracterización productiva y comercial. (en línea). Montevideo. 8 p. Consultado may. 2019. Disponible en http://www.mercadomodelo.net/c/document_library/get_file?uuid=153d2be6-da4e-44c3-8a86-c93065d19c6f&groupId=42766
54. Macena da Silva, F. A.; Silveira Pinto, H.; Scopel, E.; Marc Corbeels, M.; Affholder, F. 2006. Dinâmica da água nas palhadas de milho, milheto e

soja utilizadas em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 41(5): 717-724.

55. Mancassola, V.; Hill, M.; Clérico, C.; Sánchez, G. 2016. Estimación de la relación de pérdida de suelo (RPS) para cultivos hortícolas en el Sur de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 20(2): 95 - 108.
56. Meneses, N.; Mendoza-Cortez, J. W.; CecílioFilho, A. B. 2017. Fertilización potásica del maíz dulce en suelo con alta disponibilidad de potasio. *Agrociencia (Uruguay)*. 21(2): 54 - 58.
57. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2001. Censo general agropecuario 2000. Montevideo, Uruguay. 213 p.
58. _____. 2013. Censo general agropecuario 2011. Montevideo, Uruguay. 142 p.
59. _____. 2017. Anuario estadístico agropecuario 2017. (en línea). Montevideo. pp. 109-115. Consultado jun. 2018. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/diea-anuario2017web01a.pdf>
60. _____. RENARE (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales Renovables, UY). 2005. Carta de erosión antrópica. (en línea). Montevideo. Esc. 1:500.000. Consultado jun. 2018. Disponible en http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/1311_1418831319erosion.pdf
61. Montenegro, A. A. A.; Abrantes, J. R. C. B.; de Lima, J. R.; Singh, V. P.; Santos, T. E. M. 2013. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*. 109: 139-149.
62. Morón, A. 2003. Principales contribuciones del experimento de rotaciones cultivos-pasturas de INIA La Estanzuela en el área de fertilidad de suelos (1963-2003). *In*: Simposio 40 Años de Rotaciones Agrícolas-ganaderas (2003, La Estanzuela, Colonia). Montevideo, INIA. pp. 1-8 (Serie Técnica no. 134).
63. Nelson, D. W.; Sommers, L. E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In*: Sparks, D. L.; Page, A. L. eds. *Methods of Soil Analysis*. Madison, WI, SSSA. pp. 961-1110.

64. Parera, C. A. 2017. Producción de maíz dulce. Buenos Aires, INTA. 64 p.
65. Paullier, J.; Arboleya, J.; Campelo, E.; Maeso, D.; Giménez, G. 2014. Producción integrada de maíz dulce. Montevideo, INIA. 16 p. (Boletín de Divulgación no. 106).
66. Peigné, J.; Ball, B.C.; Roger-Estrade, J.; David, C. 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use Management*. 23: 129-144.
67. _____.; Vian, J. F.; Payet, V.; Saby, N. P. A. 2018. Soil fertility after 10 years of conservation tillage in organic farming. *Soil and Tillage Research*. 175: 194-204.
68. Peñalva, M.; Calegari, A. 1999. Abonos verdes como integrantes de sistemas de producción hortícolas y frutícolas. Canelones, MGAP/JUNAGRA/GTZ. 153 p.
69. Perdomo, C.; Cardellino, G. 2006. Respuesta de maíz a fertilizaciones definidas con diferentes criterios de recomendación. *Agrociencia (Uruguay)*. 10(1): 63 - 79.
70. Pittelkow, C. M.; Liang, X.; Linnquist, B. A.; van Groenigen, K. J.; Lee, J.; Lundy, M. E.; van Gestel, N.; Six, J.; Venterea, R. T.; van Kessel, C. 2015. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*. 517: 365-370.
71. Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Braida, J. A. 2003. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente*. 27: 29-48.
72. _____.; Da Rosa, V. T.; Vogelmann, E. S.; Da Rosa, D. P.; Horn, R.; Reinert, D. J.; Sattler, A.; Denardin, J. E. 2016. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil and Tillage Research*. 158: 123-136.
73. Renard, K. G.; Foster, G. R.; Weesies, G. A.; Mc Cool, D. K.; Yoder, D. C. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington, D.C., USDA. ARS. 64 p. (Agriculture Handbook no. 703).
74. Rivera, B.; Carrillo, E.; Obrador, J. J.; Juárez, J. F.; Aceves, L.; García, E. 2009. Soil moisture tension and phosphate fertilization on yield components of

A-7573 sweet corn (*Zea mays* L.) hybrid, in Campeche, Mexico.
Agricultural Water Management. 96(9): 1285-1292.

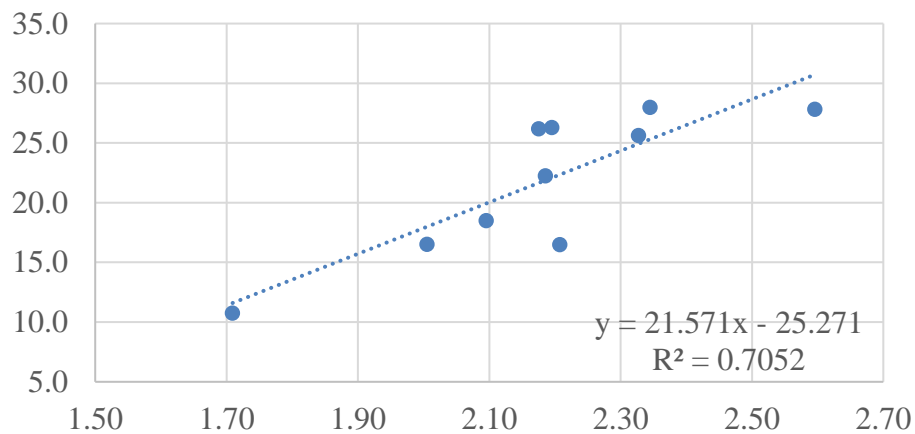
75. Sá, J. C. M.; Cerri, C. C.; Lal, R.; Dick, W. A.; de Cassia Piccolo, M.; Feigl, B. E. 2009. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil and Tillage Research*. 104(1): 56-64.
76. Scopel, E.; Findeling, A.; Chavez Guerra, E.; Corbeels, M. 2005. Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield. *Agronomy for Sustainable Development*. 25: 425-432.
77. Sganga, F.; Cabrera, C.; González, M.; Rodríguez, S. 2014. Producción familiar agropecuaria uruguaya y sus productores familiares a partir de los datos del censo general agropecuario y el registro de productores familiares. (en línea). Montevideo, MGAP. DGDR. 11 p. Consultado jun. 2018.
Disponible en
<http://www2.mgap.gub.uy/portal/afiledownload.aspx?2,10,821,O,S,0,10981%3BS%3B1%3B76>
78. Shelton, D. P.; Dickey, E. C.; Jasa, P. J.; Hirschi, M. C.; Brown, L. C. 1992. Water erosion. *In*: Melvin, S. ed. Conservation tillage systems and managements. Iowa, Ames, Midwest Plan Service. pp. 8-11.
79. Silva, A.; Ciavattone, A.; Moltini, C. 1987. Efecto de tres sistemas de manejo del suelo en el cultivo del tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 114 p.
80. Silva, E. C. da; Muraoka, T.; Villanueva, F. C. A.; Espinal, F. S. C. 2009. Absorção de nitrogênio nativo do solo: aproveitamento de nitrogênio pelo milho, em razão da adubação verde, nitrogenada e fosfatada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 44 (2): 118-127.
81. Teasdale, J. R.; Abdul-Baki, A. A.; Bong Park, Y. 2008. Sweet corn production and efficiency of nitrogen use in high cover crop residue. *Agronomy for Sustainable Development*. 28: 559-565.
82. Vollmer, E. R.; Creamer, N.; Reberg-Horton, C.; Hoyt, G. 2010. Evaluating cover crop mulches for no-till organic production of onions. *HortScience*. 45(1): 61-70.

83. Walkey, A.;Black, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.
84. Wang, G.; Ngouajio, M.; McGiffen, M. E.; Hutchinson, C. M. 2008. Summer cover crop and in-season management system affect growth and yield of lettuce and cantaloupe. *HortScience*. 43(5): 1398-1403.

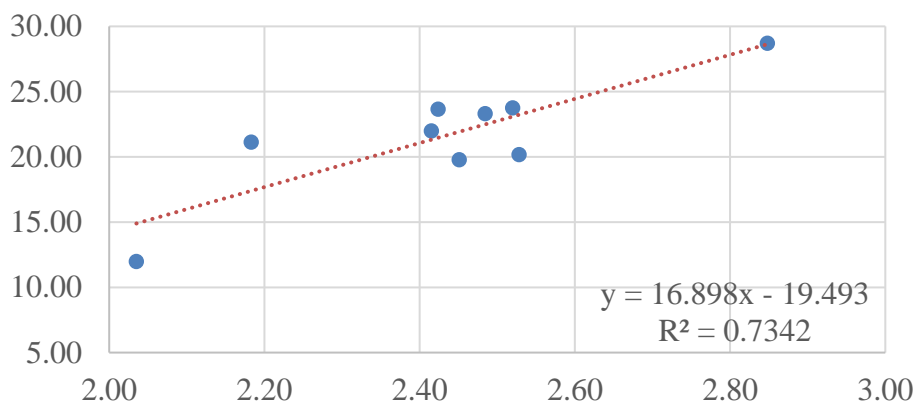
9. ANEXOS

Anexo 1. Calibración de los valores de la sonda de neutrones para todas las profundidades

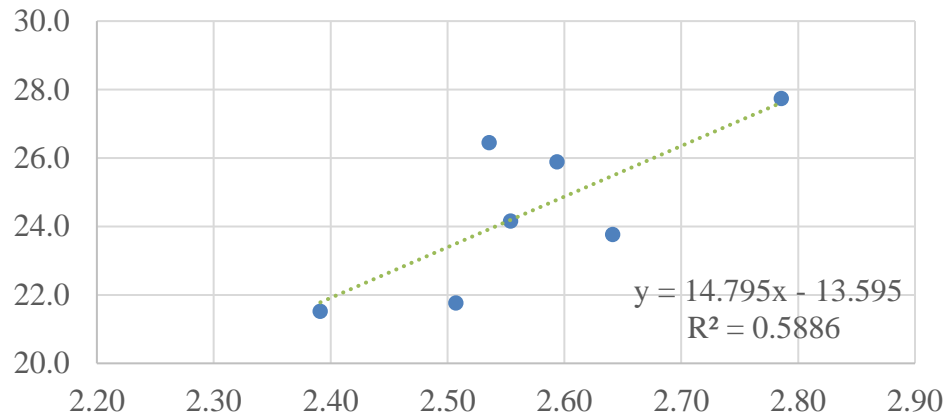
Profundidad 1: 10-25 cm



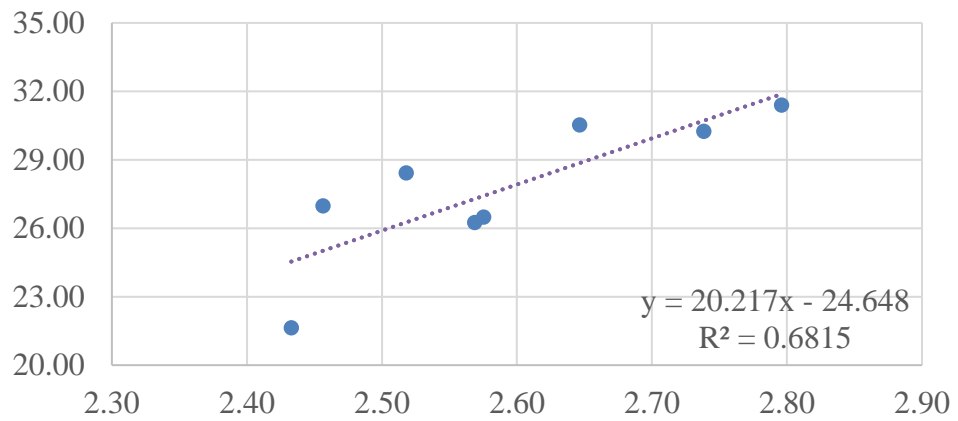
Profundidad 2: 25-40 cm



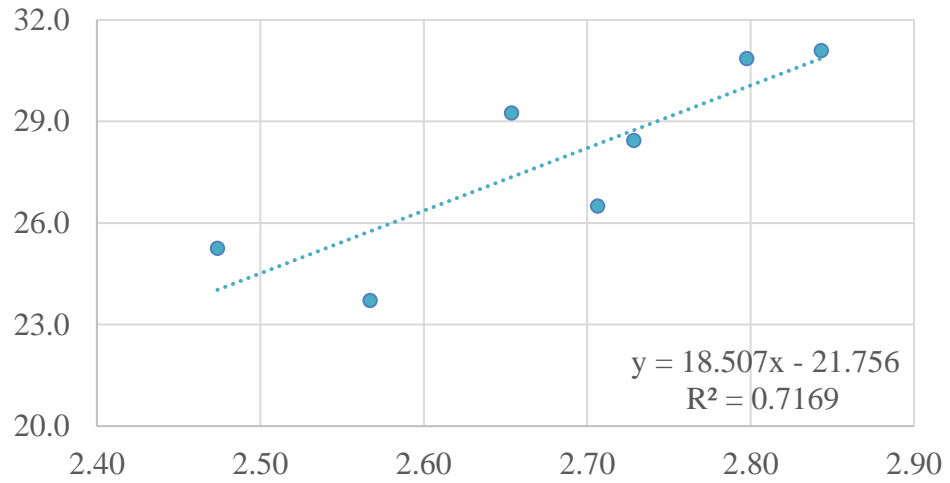
Profundidad 3: 40-55 cm



Profundidad 4: 55-70 cm



Profundidad 5: 70-85 cm



Profundidad 6: 85-100 cm

