

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DEL SISTEMA DE CULTIVO SOBRE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO
Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO DE MAÍZ Y SOJA

por

Bruno Alberto MARTINEZ FERNÁNDEZ
Federico TAULLARD SILVA
Joaquín VARGAS CASTIÑEIRAS

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2022

PÁGINA DE APROBACIÓN

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Dr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Ph.D. Guillermo Siri-Prieto

Ing. Agr. Santiago Álvarez

Fecha: 25 de mayo de 2022

Autor: -----

Bruno Alberto Martínez Fernández

Federico Taullard Silva

Joaquín Vargas Castiñeiras

AGRADECIMIENTOS

A nuestros familiares y amigos por apoyarnos a lo largo de esta etapa.

A nuestro tutor, Oswaldo Ernst por su apoyo en la realización de este trabajo y a Santiago Álvarez por su colaboración en el trabajo de campo.

Al personal de la EEMAC por llevar a cabo aquellas tareas que fue imposible realizar por la situación sanitaria.

TABLA DE CONTENIDO

	PÁGINA DE APROBACIÓN	II
	AGRADECIMIENTOS	III
	LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VII
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	CALIDAD DEL SUELO E INDICADORES	3
2.2	CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS)	3
2.3	FACTORES EDAFOCLIMÁTICOS QUE DETERMINAN LA CANTIDAD DE CARBONO EN EL SUELO	4
2.4	FACTORES DEL SISTEMA DE CULTIVO QUE AFECTAN EL CONTENIDO DE CARBONO EN EL SUELO	5
2.4.1	Sistema de laboreo	5
2.4.2	Intensidad de cultivos en la rotación	6
2.4.3	Componentes de la rotación y productividad	7
2.4.4	Efecto de la fertilización	9
2.4.5	Propiedades Físicas del suelo	9
2.4.6	Resistencia a la penetración	11
2.4.7	Densidad aparente	13
2.4.8	Estabilidad de agregados	15
2.4.9	Infiltración	16
2.5	RESPUESTA VEGETAL	17
2.5.1	Lectura de clorofila (SPAD)	17
2.5.2	Altura de planta	20
2.5.3	Temperatura del canopeo	22
3	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EXPERIMENTO	24
3.2	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	24
3.3	DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS	26

<u>3.4</u>	<u>MANEJO GENERAL DEL ENSAYO</u>	28
<u>3.5</u>	<u>DETERMINACIONES</u>	28
<u>3.5.1</u>	<u>Determinaciones en el suelo</u>	28
<u>3.5.1.1</u>	<u>Resistencia a la penetración</u>	28
<u>3.5.1.2</u>	<u>Estabilidad de agregados</u>	28
<u>3.5.1.3</u>	<u>Carbono orgánico</u>	29
<u>3.5.1.4</u>	<u>Densidad aparente</u>	29
<u>3.5.1.5</u>	<u>Evaluación visual de la estructura del suelo</u>	29
<u>3.5.1.6</u>	<u>Infiltración</u>	30
<u>3.5.2</u>	<u>Determinaciones en planta</u>	30
<u>3.5.2.1</u>	<u>Lectura de clorofila</u>	30
<u>3.5.2.2</u>	<u>Temperatura del canopeo</u>	30
<u>3.5.2.3</u>	<u>Número de plantas logradas, altura y nudos por planta en soja</u>	31
<u>3.5.2.4</u>	<u>Número de plantas logradas, altura y espigas por planta en maíz</u>	31
<u>3.5.3</u>	<u>Determinaciones a cosecha</u>	31
<u>3.6</u>	<u>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</u>	31
<u>3.6.1</u>	<u>Diseño en bloques completos al azar</u>	32
<u>3.6.2</u>	<u>Análisis de varianza (ANAVA)</u>	32
<u>3.6.3</u>	<u>Test de Tukey</u>	32
<u>3.6.4</u>	<u>Análisis de Covariables</u>	33
<u>4</u>	<u>RESULTADOS</u>	34
<u>4.1</u>	<u>PROPIEDADES DE SUELO</u>	34
<u>4.1.1</u>	<u>Carbono orgánico en el suelo</u>	34
<u>4.1.2</u>	<u>Propiedades físicas del suelo</u>	36
<u>4.2</u>	<u>RESPUESTA DEL CULTIVO</u>	38
<u>5</u>	<u>DISCUSIÓN</u>	42
<u>5.1</u>	<u>PROPIEDADES DEL SUELO</u>	42
<u>5.2</u>	<u>RESPUESTA VEGETAL</u>	46

<u>5.2.1</u>	<u>Respuesta diferencial en la composición del rendimiento</u>	47
<u>6</u>	<u>CONCLUSIONES</u>	49
<u>7</u>	<u>RESUMEN</u>	50
<u>8</u>	<u>SUMMARY</u>	51
<u>9</u>	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	52
<u>10</u>	<u>ANEXOS</u>	60

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Tratamientos actuales y anteriores del experimento.....	27
2. Efecto del sistema de cultivo sobre la concentración de carbono orgánico en el suelo en el estrato 0-5cm y 5-20 cm de profundidad.....	35
3. Propiedades físicas del suelo medidas en cada tratamiento.....	38
4. Componentes del rendimiento por cultivo en cada tratamiento.....	41
5. Respuesta del cultivo.....	42
Figura No.	
1. Precipitaciones para el período 09/2020 – 04/2021 en la EEMAC vs media histórica de INUMET para Paysandú.....	25
2. Temperatura media para el período 09/2020 – 04/21 registradas en la EEMAC vs media histórica de INUMET para Paysandú.....	25
3. Evolución del Carbono Orgánico de 0-5cm.....	36
4. Evolución del Carbono Orgánico de 5-20cm.....	37
5. Rendimiento de maíz (amarillo) y soja (verde) en kg/ha por tratamiento.....	39

1 INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo pasado la agricultura en Uruguay ha tenido diversos y sucesivos cambios en la forma de plantear el sistema productivo. Alrededor de la década de 1950, el sistema se caracterizaba por realizarse bajo agricultura continua con laboreo. Dicho sistema condujo a que procesos erosivos y de degradación del suelo ocurrieran, llevando a una pérdida de calidad, deterioro de propiedades físicas y fertilidad. Este sistema tuvo lugar hasta comienzos de la década del 70, cuando el sistema dejó la agricultura continua para convertirse en un sistema basado en la rotación de cultivos y pasturas con laboreo de suelos. El cambio en el sistema tuvo consecuencias diversas, desde una considerable disminución del área sembrada (más de 1 millón de hectáreas entre 1940-1950, a menos de 700 mil) acompañada por una baja en el número de productores. Este esquema productivo permitió además de lograr mayores rendimientos, una recuperación parcial de la calidad del suelo deteriorada con el esquema anterior y mitigar las pérdidas de suelo por erosión.

El siguiente y gran cambio, se asocia con la incorporación de la siembra directa en la década de los 90 y principios del presente siglo. Los efectos sobre el número de productores y hectáreas sembrada por año fueron similares a los ocurridos con la etapa anterior, y el área agrícola llegó al mínimo histórico. Por otro lado, este nuevo paquete tecnológico permitió disminuir aún más las pérdidas de suelo y continuar recuperando la calidad de suelo.

Entre el 2002 y 2007 tiene lugar un proceso de “expansión e intensificación” agrícola que introdujo diversos cambios tecnológicos. Entre ellos, cabe destacar la masificación de la siembra sin laboreo, el cambio de un sistema en cuyo esquema se incluían pasturas a uno que se basa en agricultura continua, basado principalmente en cultivos de verano con un neto predominio del cultivo de soja, y dejando de lado los cultivos de invierno que antiguamente predominaron en el sistema. A partir de 2007, los cultivos de invierno comienzan a ser incluidos nuevamente, pero en un sistema más intenso basado en el doble cultivo anual.

Si bien las ventajas de la implementación de sistemas con siembra directa en relación a sistemas con laboreo convencional, son contundentes como muestran diversos trabajos (Karlen et al., 1994, Janzen et al., 1998, Ernst y Siri-Prieto, 2009, Díaz-Zorita et al., 2004), dichos sistemas deben cumplir con dos

requisitos básicos para controlar las pérdidas de suelo por erosión y mantener su contenido de carbono: que una alta proporción de los residuos sean devueltos al sistema y que la superficie se mantenga siempre cubierta, ya sea por cultivos o sus rastrojos. Sin embargo, el proceso de intensificación agrícola implementado en lo que va del siglo XXI, siguió una racionalidad económica que justificó el reemplazo de la rotación pastura con cultivos por agricultura continua con alta frecuencia de soja, cuestionando los paradigmas utilizados para calificarlo como intensificación sostenible. Bajo este escenario, el suelo sufre un proceso de degradación acumulativa que se manifiesta en pérdida de la capacidad de suministro de nutrientes y condición física del suelo (Ernst et al., 2020).

La hipótesis planteada en este trabajo es que la degradación del suelo generada por su historia de manejo puede ser revertida rediseñando el sistema de cultivo. Para ello se modificaron las rotaciones evaluadas durante 20 años en un experimento de largo plazo instalado en la EEMAC (Ernst et al., 2020) y se cuantificó su impacto en el rendimiento de maíz y soja.

Los objetivos específicos fueron cuantificar el efecto de eliminar la labranza y rediseñar el sistema de cultivo sobre i) la concentración de carbono del suelo; ii) sus propiedades físicas estimadas por la densidad aparente, estabilidad de agregados del suelo, resistencia a la penetración y la descripción del perfil cultural, iii) la respuesta vegetal a diferencias en la calidad del suelo cuantificadas en rendimiento de maíz y soja.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CALIDAD DEL SUELO E INDICADORES

La definición de calidad del suelo debe ir más allá de la productividad vegetal, englobando el ambiente como un todo (Acton y Gregorich, 1995). Calidad del suelo se relaciona con su aptitud para soportar el crecimiento de cultivos sin derivar en la degradación del recurso suelo ni en daños ambientales. Para cumplir con estos requerimientos, se deben mantener o mejorar las propiedades del suelo, tanto las físicas como las químicas y biológicas (Aparicio y Costa, 2007). Carter et al., citados por Wilson y Sasal (2017) parten de la base de que la calidad de suelo reúne dos conceptos centrales, como son la calidad inherente al suelo y la calidad influenciada por el manejo.

Wilson y Sasal (2017) indican que la calidad del suelo no puede ser medida de forma sencilla, sino que debe ser inferida a través de indicadores. Los mismos pueden ser definidos como procesos y propiedades sensibles a cambios en las funciones del suelo, y son de utilidad para determinar si las prácticas y manejo del suelo que se están realizando son o no sustentables (Doran y Jones, Shukla et al., citados por Aparicio y Costa, 2007). En el mismo sentido, dado que las propiedades de los mismos son dinámicas, un suelo prístino, definido por Droogers y Bouma (1997) como *genoforms*, modifica sus propiedades en respuesta al manejo. Cuando este cambio determina pérdida de productividad, se genera un *phenoform*.

2.2 CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS)

Los principales factores que afectan la evolución del carbono orgánico en el suelo, son la vegetación, factores climáticos y propiedades del suelo (Robert, 2001). El stock de carbono presente en los suelos, está gobernado por un equilibrio dinámico entre el ingreso de carbono a través de material vegetal muerto y la salida mediante el proceso de mineralización. En condiciones aeróbicas, apenas un 1% aproximadamente del carbono que ingresa es retenido en las fracciones más estables de la materia orgánica (MO). El COS está

gobernado por la actividad biológica que sustenta, siendo dicha actividad clave en determinar la porosidad y estructura del suelo. Por tanto, buena parte de las propiedades físicas relacionadas con la dinámica del agua y aire en el suelo, además de la resistencia a la erosión dependen del contenido de MO. La agregación y estabilidad de la estructura del suelo aumentan con el contenido de MO y consecuentemente lo hace la tasa de infiltración y la capacidad de almacenar agua disponible. El mismo autor, también afirma que interviene en gran medida en diversas propiedades químicas del suelo como la dinámica y biodisponibilidad de nutrientes para el crecimiento vegetal (Durán y García Préchac, 2007). Por ello, muchos autores afirman que es un muy buen indicador de calidad de suelo dada la estrecha relación que tiene con las propiedades del suelo y la productividad (Galantini y Rosell, Kapkiyai et al., Rasmussen y Collins, citados por Aparicio y Costa, 2007) y funciones ambientales (Robert, 2001).

Sin embargo, dado que el contenido de MO es función de la textura y factores climáticos, otros autores sugieren que puede tener algunas limitaciones al comparar valores de MO de diferentes suelos (Andriulo e Irizar, 2017).

2.3 FACTORES EDAFOCLIMÁTICOS QUE DETERMINAN LA CANTIDAD DE CARBONO EN EL SUELO

En un agroecosistema, la vía de ingreso del carbono es la fotosíntesis y la salida del mismo ocurre por procesos de respiración. Por un lado, la respiración radicular, y por otro la respiración microbiana de la materia orgánica. Dichos procesos son influenciados tanto por la humedad y temperatura por lo que muestran una marcada estacionalidad siendo el verano el momento de mayor tasa respiratoria, y el invierno el de menor (Álvarez, 2006).

En cuanto a factores inherentes al suelo, como su mineralogía, afectan principalmente a la materia orgánica asociada a los macro agregados y las partículas de arcilla dado que forman enlaces con las mismas (Robert, 2001).

A modo de síntesis, Saffih-Hdadi y Mary (2008), a través del modelo de simulación AMG, simularon cómo fluctúa el valor del coeficiente k, que refiere a la mineralización de la materia orgánica, en diferentes escenarios de temperaturas y contenidos de arcilla. Los resultados obtenidos, muestran con

claridad cómo la tasa de mineralización disminuye conforme aumenta el contenido de arcilla, y cómo aumenta en condiciones de mayor temperatura.

2.4 FACTORES DEL SISTEMA DE CULTIVO QUE AFECTAN EL CONTENIDO DE CARBONO EN EL SUELO.

Dado que en los sistemas agrícolas el ingreso de carbono al sistema ocurre a través de la fijación por fotosíntesis, el ingreso de carbono queda supeditado a la producción de biomasa por unidad de superficie y a la producción de la misma que es devuelta al suelo (Ernst y Siri-Prieto, 2011).

El contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) depende de un balance entre el ingreso de restos vegetales y la salida del carbono del suelo en la respiración de microorganismos del suelo, logrando eventualmente una situación de equilibrio (Janzen et al., 1998). Sin embargo, dicho equilibrio puede verse afectado y alterar el sentido en que varía la cantidad de COS.

La intensidad de laboreo, el tipo e intensidad de las rotaciones son algunos de los factores que definen la evolución del carbono en el suelo (Janzen et al., 1998). Adicionalmente, es fundamental considerar la calidad y cantidad de biomasa radicular y aérea que ingresa al suelo, que es definida por la cantidad y tipo de cultivos, así como la composición y cantidad de forraje producido por las pasturas (Ernst y Siri-Prieto, 2011).

2.4.1 Sistema de laboreo

Díaz-Roselló, citado por Ernst y Siri-Prieto (2009), señala que en el Uruguay un 25% del COS se ha perdido como consecuencia de sistemas bajo laboreo convencional. Diversos autores han probado que sistemas bajo labranza convencional, experimentan mayores pérdidas de COS que aquellos que no lo hacen (Karlen et al., 1994, Janzen et al., 1998, Álvarez et al., 2014). Las pérdidas ocurren principalmente por dos vías, una es la mayor exposición a factores erosivos, y la otra es la mayor oxidación de la materia orgánica causada por el

mayor contacto del suelo con el oxígeno y del rastrojo con el suelo (Grant, citado por Díaz-Zorita y Grove, 2002). Una menor intensidad de laboreo, incluso puede generar un ingreso de carbono al suelo, en suelos de la región, en la Pampa Argentina Álvarez y Steinbach (2006), a través de un metaanálisis de trabajos llevados a cabo en dicha región, encontraron que, en promedio, los sistemas que se convirtieron de laboreo convencional a cero laboreo, experimentaron una ganancia de 4,35 y 4,15 toneladas por hectárea de COS en relación a sistemas bajo labranza convencional y reducida respectivamente. En el mismo sentido, Janzen et al. (1998) cuantificó a partir de un experimento de largo plazo, un aumento en de 4 toneladas de COS por hectárea en sistemas con laboreo cero, en relación a sistemas con laboreo convencional. La respuesta en término de COS al no laboreo, también puede manifestar interacciones con otros factores de manejo tales como la fertilización, tipo de rotación empleada, producción de rastrojo y características edafológicas.

Visto que los sistemas con elevada intensidad de laboreo sufren mayores pérdidas de COS que aquellos con cero laboreo y siembra directa, cabe analizar qué características deben tener estos últimos sistemas para funcionar de forma eficiente. Vale destacar que, en Uruguay, en los sistemas agrícolas, predomina el cero laboreo y la siembra directa. Para la zafra 2017/2018, la encuesta agrícola (MGAP. DIEA, 2018) arrojó como resultado que un 95% de la superficie sembrada (398mil hectáreas) con cultivos de invierno fue realizada bajo siembra directa, y para zafra de verano la proporción fue de 89% (1046mil hectáreas).

2.4.2 Intensidad de cultivos en la rotación

La producción de biomasa depende de la radiación fotosintéticamente activa, la eficiencia con que la misma es interceptada, y, posteriormente convertida por la planta (Ernst y Siri-Prieto, 2011). La interceptación de dicha radiación es determinada por la secuencia e intensidad de cultivos. Los períodos de barbecho, o períodos con baja cantidad de plantas por unidad de superficie o pasturas sobre pastoreadas son flancos en la interceptación de dicha radiación perdiendo la oportunidad de generar biomasa, y por tanto una mayor cantidad de rastrojo, que como se mencionó anteriormente es la única vía de ingreso de carbono al suelo.

Janzen et al. (1998) señala que, en suelos canadienses, el efecto del barbecho estival a lo largo de los años fue evaluado por diversos autores en experimentos de largo plazo. En todas las ocasiones, el COS estimado fue mayor para suelos que se encontraban bajo agricultura continua o sistemas de trigo rotando con pasturas en relación a aquellos suelos con barbecho.

En la Pampa semiárida en Argentina, Álvarez et al. (2014) cuantifican en un experimento de largo plazo con diferentes secuencias de cultivos y métodos de laboreo la concentración, cantidad y estratificación de carbono orgánico en varios rangos de profundidad de muestreo. Tanto para cantidad y concentración, la rotación de maíz, soja y cultivo de cobertura mostraron los mayores valores. La estratificación calculada, puede ser considerado como un buen indicador de calidad de suelo (Franzluebbers, 2002) dada la importancia de la materia orgánica del suelo sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y el control de la erosión. Para sistemas estabilizados, el valor sugerido es de mayor o igual a 2. Para dicho indicador, la rotación que incluía maíz, soja y cultivo de cobertura obtuvo el mayor valor, aunque en ninguna oportunidad fue mayor a 2.

2.4.3 Componentes de la rotación y productividad

En cuanto a los componentes que hacen a cada rotación en particular, sean pasturas o cultivos anuales de renta, se debe recordar que los mismos son los encargados de producir el ingreso de carbono al sistema. La combinación de la presencia de rastrojo y laboreo cero o prácticas conservacionistas, provocan un incremento de MOS (Díaz-Zorita y Grove, 2002).

El ingreso de carbono por los cultivos de soja y maíz fue cuantificado por Álvarez (2006) para la región de la Pampa Ondulada. Para ambos cultivos se debe considerar tanto el aporte de la biomasa aérea como el aporte de la biomasa radicular. Ambos componentes son cuantificados en forma porcentual en relación al rendimiento, lo que deja en evidencia la importancia de maximizar la productividad de los cultivos. Adicionalmente, bajo rotaciones con mayor proporción de soja, los niveles de carbono en suelo experimentan mayores caídas. Álvarez et al. (2014) hallaron diferencias a favor de la rotación maíz - soja en relación al monocultivo de soja en el stock de carbono orgánico del suelo en un experimento de largo plazo, 15 años después de ser instalado. El mayor

aporte de carbono por el maíz, se debe a la mayor producción de biomasa del mismo en la secuencia (Álvarez y Steinbach, citados por Álvarez et al., 2014). Adicionalmente, la descomposición del maíz ocurre 2,5 veces más lento que la de soja dada su menor concentración de N, lo que se relaciona de forma lineal con la pérdida de peso del residuo sobre la superficie (Ernst et al., 2002). La presencia de residuos en superficie constituye un aspecto favorable, ya que los residuos mejoran considerablemente propiedades del suelo que otorgarían una mayor resistencia ante la erosión, capacidad de secuestrar nutrientes y almacenar más agua (Karlen et al., 1994).

En referencia al rol del componente pasturas en las rotaciones agrícolas, en Uruguay, Ernst y Siri-Prieto (2009) plantearon un ensayo parcelario de larga duración donde uno de los aspectos evaluados fue el efecto de la pastura perenne en relación a un sistema de agricultura continua. Los resultados sugieren que la presencia de la pastura en la rotación tiene un rol fundamental dado que disminuye las potenciales pérdidas de carbono del suelo. Esto se explica por cómo se distribuye la producción de residuos. Si bien la producción de residuos fue mayor en un 13% para los sistemas de agricultura continua, la distribución de la misma difirió en relación a los sistemas bajo rotación. Por un lado, en los sistemas agrícolas continuos, se estimó que un 86% de la biomasa se mantenía en superficie. Por otro lado, en sistemas bajo rotaciones con pasturas perennes, la biomasa aérea se estimó en 64%. Esto indica que un mayor porcentaje de la biomasa producida pertenecía a las raíces. Si bien no se reflejó en el contenido de COS, esto puede deberse a distintas causas, como la proporción de pasturas - cultivos en la rotación. En concordancia con estos resultados, en un experimento de largo plazo de INIA La Estanzuela para rotaciones con proporciones de pasturas y cultivos iguales, se observa una tendencia similar, donde ocurren aumentos y descensos en el COS según se encuentre en fase agrícola o de pastura. El efecto del pastoreo sobre la biomasa de residuos es otro aspecto a considerar, dado que limita la cantidad de residuos que ingresan al suelo y, además, el efecto del pastoreo puede tener implicancias directas sobre el desarrollo de biomasa radicular (Ernst y Siri-Prieto, 2009). Por último, el contenido de COS inicial también juega un papel importante en determinar el balance de carbono resultante.

2.4.4 Efecto de la fertilización

La fertilización, principalmente la nitrogenada, tiene dos principales efectos en los agroecosistemas. Por un lado, sobre la productividad, donde son diversos los estudios que muestran cómo la producción de biomasa y posteriormente de residuos se incrementa con una adecuada fertilización (Janzen et al., 1998, Álvarez, 2006), presentando una serie de ventajas para el sistema que fueron mencionados anteriormente. Por otro lado, el nitrógeno tiene un papel preponderante en mantener el balance C:N del suelo. Dicha relación debe oscilar entre 10 y 12, determinada según la proporción de hongos y bacterias que integran el suelo (García Lamothe et al., 2009). Dichos microorganismos son los encargados de descomponer los residuos de cultivos y/o pasturas, actuando de forma diferencial y secuencial según varíe la relación C:N del residuo. Por tanto, dicha relación gobierna el ingreso de los residuos al suelo como materia orgánica.

Para mantener dicho balance, es fundamental el control de pérdidas e ingresos de N. En sistemas bajo siembra directa, las pérdidas ocurren principalmente por erosión dado que no hay una exposición de la materia orgánica con el oxígeno que promueva su oxidación. Adicionalmente, las rotaciones o secuencias de cultivos planteadas, deben ser eficientes en el uso y retención del nitrógeno. Si dichas pérdidas no son controladas adecuadamente, los microorganismos se encontrarán en un ambiente deficiente en nitrógeno, y consecuentemente respirarán menos carbono para sobrevivir (Paul y Clark, citados por García Lamothe et al., 2009), promoviendo mayores pérdidas de carbono como CO₂ y restringiendo el ingreso del mismo al suelo.

2.4.5 Propiedades Físicas del suelo

La estructura física del suelo, que regula la capacidad de almacenaje y la intensidad y dirección del flujo de los diferentes compuestos y energía, varía ampliamente en respuesta a factores genéticos y ambientales (Martino, 2001). Letey (1985) define como buenas condiciones físicas del suelo a aquellas que no requieren un manejo excepcionalmente bueno para lograr una buena producción de los cultivos. La condición física de un suelo determina, la rigidez

y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes (Rucks et al., 2004).

La estructura del suelo no es fácilmente medible, debido a la complejidad del mismo y a la multiplicidad de sus funciones, así como por su naturaleza altamente dinámica, pudiendo ser modificada drásticamente en un muy corto período de tiempo. La composición mineralógica básica, la distribución del tamaño de partículas y el modo en que estas se unen para formar agregados son los principales factores que determinan las propiedades físicas del suelo. Estos factores no son suficientes para suministrar una descripción del sistema dada su fuerte interacción con el clima, la actividad biológica del suelo y las prácticas agrícolas. En consecuencia, la estructura del suelo solamente puede ser definida en términos de parámetros que miden procesos o propiedades parciales, y debe referirse necesariamente a un determinado marco de tiempo (Martino, 2001). Estas propiedades de los suelos determinan, en gran medida, la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta (Rucks et al., 2004).

Letey (1985) clasifica las propiedades físicas del suelo en dos grupos; aquellas que afectan el crecimiento de las plantas de forma directa y las que lo hacen de forma indirecta. El primer grupo incluye a la disponibilidad de agua, la disponibilidad de oxígeno, la temperatura y la resistencia mecánica al crecimiento radicular. Las propiedades pertenecientes al segundo grupo influyen sobre el crecimiento de los cultivos por su efecto sobre las mencionadas anteriormente. Dentro de este grupo se encuentran la densidad aparente, la textura, la agregación, la estabilidad de agregados y la distribución del tamaño de poros.

Durán y García Préchac (2007) explican que los factores que regulan estas propiedades dependen en su mayoría de las características propias del suelo, su ubicación geográfica y posición en el paisaje, pero también son afectadas por el uso y manejo de suelo, el tráfico de maquinaria, el pasaje de implementos de laboreo y el pisoteo de los animales durante el pastoreo.

Como fue discutido en secciones anteriores, la importancia de la materia orgánica como indicador de calidad de suelo radica en su relación con las

propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo (García, 2004). El manejo de los suelos tiene un efecto sobre el contenido de materia orgánica según el número de años de agricultura, los cultivos, las pasturas, las labranzas, las rotaciones, el manejo del cultivo, la fertilización y los períodos de barbecho (García, 2004, Durán y García Préchac, 2007). Dexter, citado por Aparicio y Costa (2007) explica que la calidad del suelo está fuertemente relacionada con su estructura y gran parte del daño ambiental que ocurre en tierras bajo laboreo intensivo de suelos como la erosión, desnitrificación y susceptibilidad a la compactación se originan por la degradación de la estructura física del suelo.

El efecto de la condición física sobre el crecimiento de las plantas es dependiente de los factores de manejo mencionados, por lo que no existe una “mejor condición física universal” (Letey, 1985).

2.4.6 Resistencia a la penetración

La resistencia de un suelo a la penetración de un instrumento de sondeo, es un índice integrado de la compactación del suelo, el contenido de humedad, textura y tipo de arcilla (Rucks et al., 2004). Un suelo con menor grado o nula compactación presenta una menor resistencia mecánica a la penetración generando condiciones más apropiadas para el desarrollo radical (Taboada et al., Calonego y Resolem, citados por Martínez et al., 2020). El grado de empaquetamiento o compactación de las partículas de un suelo determina su capacidad para permitir el desarrollo de cultivos, su capacidad para soportar el tráfico y su susceptibilidad a la erosión, entre otros factores (Martino, 2001). Por tales motivos la resistencia a la penetración es frecuentemente usada como parámetro para medir la penetración de las raíces (Pelegri et al., 1996).

Castiglioni y Reddel (2021) explican que la compactación de los suelos representa un problema productivo y ambiental. Según estos autores, este proceso puede variar en intensidad de acuerdo a la profundidad y posición de los suelos en el paisaje, como también a partir del efecto de diferentes prácticas agrícolas.

Para su medición se utiliza un instrumento denominado penetrómetro, las medidas obtenidas con este aparato se toman como índice de la resistencia mecánica que ofrece el suelo al crecimiento radicular, lo cual depende de la

magnitud del espacio poroso grueso, y su rigidez, la que es afectada por el contenido de humedad del suelo (Rucks et al., 2004). La humedad del suelo afecta a los tres factores del suelo que determinan la resistencia a la penetración: cohesividad, ángulo de fricción interna y compresibilidad (Camp y Gill, Williams y Shaykewich, Larson et al., Ayers y Bowen, citados por Martino, 2001). Pelegrin et al. (1996) al analizar la influencia del sistema de laboreo sobre la resistencia a la penetración observaron que esta propiedad puede sufrir cambios en cortos períodos de tiempo, especialmente cuando baja el contenido de agua en las capas de suelo, acentuándose estas variaciones cuando éstas tienen una alta densidad aparente.

El valor crítico de resistencia mecánica a la penetración que impide la elongación radical de los cultivos es muy discutido, variando entre 0.9 y 3 Mpa (Rangeon et al., 2008), aunque en general se asume un valor de 2 MPa (Eavis et al., citado por Rangeon et al., 2008).

Según Bengough et al. (2006) la resistencia a la penetración medida con un penetrómetro puede no ser siempre el mejor indicador del impedimento mecánico al crecimiento radicular, en especial en situaciones donde no se realiza laboreo, explica que en estas condiciones pueden existir sistemas continuos de canales por los que las raíces pueden crecer aún en suelos con elevadas resistencias a la penetración. Martino (2001) menciona la misma problemática y explica que el valor de resistencia a la penetración obtenido con un penetrómetro es generalmente mayor al real ya que el instrumento no es capaz de adaptar su forma a los obstáculos del suelo, ni de reducir su fricción con las partículas del suelo a través de la secreción de lubricantes.

La compactación de los suelos es un proceso que restringe el crecimiento de las raíces y la emergencia de los cultivos, con consecuencias productivas y ambientales negativas (Castiglioni y Reddel, 2021). Arranz et al., citados por Mahilos y Ramos (2017) explican el mismo problema causado por la compactación de suelos pudiendo resultar en una mala implantación del cultivo ya que las raíces tienen más dificultad en penetrar el suelo y un acceso reducido a los nutrientes. Indican que el resultado es un menor desarrollo del sistema radical de las plantas y por lo tanto un menor desarrollo de la planta en su conjunto resultando en una menor producción.

Rangeon et al. (2008) al analizar la resistencia a la penetración y humedad del suelo como indicadores de calidad en distintos sistemas de labranza observaron que los sistemas de siembra directa obtuvieron mayores valores de resistencia a la penetración en los primeros centímetros (atribuible al paso de las maquinarias y al adensamiento superficial por falta de cobertura vegetal) pero no presentaron problemas de compactación en profundidad, como ocurrió en los tratamientos de labranza convencional y labranza mínima con disco.

Aparicio y Costa (2007) concluyeron al analizar indicadores de calidad del suelo en sistemas de agricultura continua que la resistencia a la penetración no fue un indicador sensible del número de años bajo agricultura continua, probablemente porque esta medida es una función de la densidad aparente y la humedad del suelo.

2.4.7 Densidad aparente

La densidad aparente es la relación que existe entre el peso seco (105°C) de una muestra de suelo, y el volumen que esa muestra ocupa en el suelo (Rucks et al., 2004). Esta propiedad es un indicador físico de calidad de suelo, capaz de permitir identificar alteraciones producidas por diferentes manejos, está relacionado con la compactación del mismo, y también asociado con el contenido de carbono orgánico (Álvarez et al., citado por Martínez et al., 2020). Venanzi et al. (2002) explican que la densidad aparente muestra menor sensibilidad en la detección de capas compactadas en el perfil del suelo que la resistencia a la penetración, pero que tiene una mejor relación con el comportamiento de los cultivos. Ramírez (1997) expresa que esta propiedad es una característica que nos da a conocer las condiciones en las cuales se encuentra el suelo con respecto a la compactación, la porosidad, la disponibilidad de agua y oxígeno, entre otras. El umbral de densidad aparente establecido como límite para el crecimiento radical para suelos francos arcillo limosos es de 1,50 Mg m⁻³ (USDA, 1996).

Rickman et al., citados por Letey (1985) concluyeron, tras analizar cómo son afectadas las raíces de las plantas al crecer en suelos con alta densidad aparente, en los que la tasa de difusión de oxígeno no era limitante (logrado

mediante condiciones artificiales), que uno de los efectos principales causados por la alta densidad aparente en estas condiciones fue el de restringir el suministro de oxígeno teniendo como consecuencia un crecimiento reducido de las plantas.

Pelegrin et al. (1996) indican que la densidad aparente es una de las propiedades más afectadas por el laboreo de suelo. Explican que en sistemas de no laboreo pueden ocurrir valores más elevados de densidad aparente en los primeros 20 cm del suelo que en aquellos donde sí se realiza laboreo debido a la consolidación natural del suelo, así como por la compactación causada por el tráfico del tractor en las operaciones de siembra y tratamientos con pesticidas.

Álvarez y Steinbach (2009) realizaron una revisión sobre los resultados obtenidos en experimentos de campo instalados en la Pampa Argentina con el fin de determinar el efecto de diferentes sistemas de laboreo sobre las propiedades del suelo y rendimiento de los cultivos. En la mayoría de los casos la densidad aparente fue significativamente mayor para los sistemas de no laboreo al compararlos con aquellos donde sí se realizaba esta práctica de manejo. Los aumentos en la densidad aparente en los sistemas bajo siembra directa solo se reportaron en aquellos suelos donde la densidad aparente era menor a 1.3 g ml^{-1} , a partir de estos valores el sistema de no laboreo no tuvo efecto sobre la densidad del suelo. Los aumentos promediaron en 0.05 g ml^{-1} y no se relacionaron con el tiempo transcurrido desde el inicio del experimento, tipo de suelo ni rotación de cultivos. En cuanto al rendimiento de los cultivos, no se observaron diferencias significativas para el cultivo de soja (*Glicine max* (L.)-Merr.) pero sí para los cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) y maíz (*Zea mays* L.) siendo los rendimientos un 10 a 14% inferiores en los sistemas de no laboreo al compararlos con laboreo convencional. Aparicio y Costa (2007) obtuvieron resultados similares al analizar indicadores de calidad del suelo en sistemas de agricultura continua en la Pampa Argentina, no encontraron relación entre el número de años bajo agricultura continua y la densidad aparente del suelo, pero sí entre esta propiedad y el sistema de laboreo empleado.

Resultados contrastantes son presentados por García Préchac (1992), en su trabajo hace referencia a un ensayo en el cuál se evaluó la incidencia de diferentes secuencias de cultivos y pasturas sobre la densidad aparente del suelo, luego de 16 años de instalado el experimento se observó que los sistemas

con menor proporción de cultivos y tierra en rastrojo o trabajada, y con mayor proporción de pasturas presentaron los menores valores promedio de densidad aparente, lo contrario ocurrió en aquellos sistemas que no incluían pasturas y tenían mayores proporciones de cultivos y tierra trabajada.

2.4.8 Estabilidad de agregados

La agregación del suelo es el proceso mediante el cual sus partículas primarias, arena, limo y arcilla, se unen formando unidades secundarias, agregados, debido a la acción de fuerzas naturales y a sustancias derivadas de exudados de las raíces y provenientes también de la actividad microbiana (Soil Science Society of America., citado por Gabioud et al., 2011).

La estabilidad de los agregados se refiere a la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fase sólida y la organización del espacio poroso cuando es expuesto a diferentes tipos de estrés (Kay, citado por Martínez et al., 2020). Refiere a la resistencia que los agregados del suelo tienen a desintegrarse o romperse frente a la acción del agua y manipulación mecánica (laboreo) (Rucks et al., 2004).

Esta propiedad está condicionada especialmente por la acción del agua como factor de degradación y por la cohesión en estado húmedo como factor de resistencia (Hénin et al., citados por Gabioud et al., 2011) y está estrechamente asociada al contenido de carbono orgánico, principalmente con la fracción más lábil (Euza et al., Álvarez et al., citados por Martínez et al., 2020). Un factor muy importante en afectar la estabilidad de la estructura es el contenido de agua que hay en el suelo ya que determina el grado en que las fuerzas mecánicas causan destrucción en la estructura (Rucks et al., 2004). Así, la estabilidad de agregados del suelo, por ser una característica edáfica dinámica, es considerada un indicador sensible de tendencias a la recuperación o degradación de los suelos (Doran y Parkin, citados por Gabioud et al., 2011).

La estabilidad de la estructura de un suelo es una de las características más importantes que afectan al rendimiento de los cultivos ya que afecta a la penetración de las raíces, la capacidad de almacenaje de agua y el movimiento de aire y agua en el suelo (Langmaack, citado por Aparicio y Costa, 2007).

El laboreo y otras operaciones agrícolas generalmente van causando un descenso en la estabilidad de los agregados, este efecto se ve disminuido cuando los niveles de materia orgánica del suelo se mantienen altos y los laboreos de suelos se realizan a niveles de humedad óptimo (Rucks et al., 2004). Ramírez et al. (2006) concluyeron, al analizar los efectos a largo plazo de la labranza convencional y siembra directa sobre las propiedades físicas de un suelo en la Pampa Ondulada Argentina, que la estabilidad de agregados junto con la conductividad hidráulica fueron los parámetros más sensibles al tipo de manejo empleado. Luego de 16 años de instalado el experimento observaron que la labranza convencional causa un descenso significativo en la proporción de agregados de mayor tamaño (8-4 mm) y un aumento en la clase de 2-3 mm. Aparicio y Costa (2007) reportaron una estabilidad estructural de 100% para suelos bajo pasturas por más de 30 años, 45% para suelos bajo siembra directa y 31% para laboreo convencional.

2.4.9 Infiltración

Infiltración es el término que hace referencia al proceso por el cual el agua ingresa al suelo desde su superficie. La tasa de este proceso, relativa a la tasa de suministro de agua, determina cuánta agua ingresará y cuánta se perderá por escorrentía (Hillel, 2004). La tasa de infiltración es en gran medida controlada por la distribución del tamaño de poros y, en cierta medida, está sujeta a las prácticas de manejo empleadas (Letey 1985).

Uno de los efectos más frecuentes del deterioro de calidad física es la formación de capas compactadas, que al alterar la geometría y la distribución de los poros puede conducir a disminuciones en la tasa de infiltración (Hamza y Anderson, citados por Martínez et al., 2020). La compactación de suelo consiste en la disminución del espacio poroso, lo que provoca una menor infiltración del agua y aireación del suelo, restringiendo el crecimiento radicular (Langmaack et al., citados por Etchegoimberry y Ernst, 2018). El aflojamiento del suelo causado por el laboreo favorece la infiltración de agua, la aireación y el desarrollo de las raíces, por lo que los problemas de compactación son en cierta forma disimulados, al menos durante breves períodos de tiempo (Martino, 2001).

La tasa de infiltración puede presentar una gran variabilidad temporal, siendo muy elevada inmediatamente después de una actividad de laboreo, pero decreciendo rápidamente pasadas algunas semanas (Strudley et al., citado por Álvarez y Steinbach, 2009). Álvarez y Steinbach (2009) en su revisión sobre el efecto del sistema de laboreo de suelos sobre las propiedades físicas de estos en la Pampa Argentina observaron que la siembra directa presentó las mayores tasas de infiltración, con diferencias significativas aun cuando se la comparaba con el laboreo reducido.

Martínez et al. (2020), al analizar el efecto de diferentes secuencias de cultivos con predominio de soja y manejo de la fertilización sobre indicadores de calidad física del suelo, luego de cuatro años de instalado el experimento, no encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Explican que estos resultados coinciden con los reportados por Villamil et al., citado por Martínez et al. (2020), al analizar el efecto de la inclusión de cultivos de cobertura sobre la conductividad hidráulica (variable relacionada con la tasa de infiltración) y otras propiedades físicas.

2.5 RESPUESTA VEGETAL

2.5.1 Lectura de clorofila (SPAD)

Según Ernst et al. (2020) el efecto negativo de los años de agricultura sobre la frontera de rendimiento de trigo tiene dos componentes: en primer lugar, durante los primeros 4-5 años pos pastura, se produciría una reducción gradual en el aporte de nutrientes del suelo, denominado brecha por nutrientes, que puede ser controlado incrementando la fertilización. En segundo lugar, cuando la agricultura continua pasa los 5 años, se cuantificó una brecha de rendimiento, denominada brecha no directamente atribuible al menor aporte de nutrientes, que no fue posible controlar por aumento en la fertilización.

En el caso de maíz, Perdomo y Hoffman (2011) reportan que se ha estado evaluando en Uruguay desde 2005 la posibilidad de ampliar la ventana de aplicación de nitrógeno (N), así como predecir la respuesta a la aplicación post-V6 en base a índices foliares (concentración de N, tablas de color y lectores

de clorofila). Además, estos autores agregan que observaciones previas indicaban que es muy poco probable que las plantas muestren signos claros de deficiencia en hoja en estadio cercanos a V6 debido a que los requerimientos de absorción de N aún son bajos. Los resultados mostraron que aproximadamente un mes luego de V6 (aproximadamente V10) fue posible detectar diferencias en el status nitrogenado del cultivo con dichos indicadores.

Según Lohry y Schepers, citados por Bullock y Anderson (1998), la clorofila es el pigmento fotosintético principal en plantas en donde su contenido se correlaciona con la concentración de nitrógeno (N) en las hojas, la tasa de fertilizante N y el rendimiento. A partir del estudio realizado en el norte y centro de Illinois, Bullock y Anderson (1998) concluyeron que el medidor SPAD proporciona una medida del verdor relativo de las hojas vivas en maíz en un momento específico. Por lo que las lecturas de clorofila pueden ser útiles para detectar deficiencias de N en cultivos en crecimiento. Dicho medidor se encuentra limitado dado que no puede detectar condiciones en las que exista un exceso de nitrógeno en el suelo. A esto se le suma que una planta de maíz en V7 no requiere la cantidad de N que una planta madura necesitaría para mantener un crecimiento saludable y un buen rendimiento. Si el suelo presenta niveles de N bajos, cuando la planta de maíz está en V7 probablemente esto no se vería reflejado en la concentración de clorofila medida en las hojas, pero los niveles de N del suelo serían insuficientes para alcanzar los rendimientos óptimos de grano de una planta madura, sin embargo, podrían ser completamente suficientes para sustentar una planta joven en la etapa de crecimiento V7.

Armand Ugón y Ferrari (2014) en Uruguay, departamentos de Soriano y Colonia observaron que existió efecto de la fertilización en la lectura de indicadores indirectos como el SPAD y en el porcentaje de nitrógeno (N) en hoja. En V10 para el porcentaje de N en hoja, los menores valores se registraron para los tratamientos sin agregado de N en V6 y todos los tratamientos fertilizados tuvieron valores significativamente más altos. A su vez, dentro de los tratamientos fertilizados se diferenciaron estadísticamente aquellos que recibieron las menores dosis de fertilización (60-0-0 y 120-0-0) respecto al tratamiento que recibió la mayor dosis a V6 (240-0-0). En lo que refiere al indicador indirecto en V10, al igual que lo ocurrido para el porcentaje de N en hoja, los menores valores de SPAD se registraron para los tratamientos sin agregado de N en V6, mientras que los tratamientos fertilizados tuvieron valores

más altos, pero mediante este indicador estos tratamientos no se diferenciaron estadísticamente entre ellos. En F1 (panojado), para el porcentaje de N en hoja tanto la aplicación de 0-60-0 como 0-120-0 se diferenciaron estadísticamente del testigo, y a su vez, estas dos aplicaciones se diferenciaron estadísticamente entre ellas, obteniéndose un mayor valor en la lectura del indicador con la aplicación de 0-120-0. Sin embargo, para el medidor SPAD la aplicación de 0-120-0 tuvo valores mayores que el testigo, explicados por el agregado de N en V10, pero la aplicación de 0-60-0 no se diferenció estadísticamente del testigo. Los autores concluyen que el porcentaje de N en hoja y el SPAD responden a la fertilización nitrogenada y por tanto son herramientas válidas para estimar el status nitrogenado del cultivo.

En el mismo experimento, Armand Ugón y Ferrari (2014) estudiaron el rendimiento de maíz bajo riego en dos sitios con diferente historia de chacra y capacidad de aporte de nitrógeno (N) estimada a partir de la absorción total del testigo. El primer sitio correspondió a una chacra vieja que aportó 0,5 Kg/ha/día, mientras que el segundo sitio se trató de una chacra nueva que aportó 0,8 Kg/ha/día, un 38 % más que la chacra vieja. Como era esperable, la respuesta al N agregado en V6 fue distinta siendo el óptimo físico en la chacra vieja de 252 KgN/ha y en la chacra nueva de 189 KgN/ha. Para ambas condiciones ambientales encontraron una respuesta muy importante al agregado de N tardío (solamente en V10) siendo esta de 2.134 Kg/ha y 2.419 Kg/ha para la chacra nueva y vieja respectivamente. En la chacra nueva no existieron diferencias significativas en rendimiento entre agregar todo el N en V6 en relación a fraccionarlo o diferirlo. En la chacra vieja sí existieron diferencias significativas en cuanto al momento de aplicación de 60 Kg N/ha (mayores rendimientos con aplicaciones a V6 respecto a V10) las cuales indicarían que en suelos con menor capacidad de aporte de N las aplicaciones de N en V6 resultan fundamentales.

Por su parte Ceriani e Innella (2012), en Uruguay, en el Departamento de Soriano, encontraron que en condiciones de buena disponibilidad hídrica no existieron diferencias entre agregar el nitrógeno (N) en V6 o V10. En cambio, en condiciones de secano, fue mejor agregar el N temprano (V6), ya que los tratamientos con N en V10 rindieron casi lo mismo que el testigo.

Según Cazaban y Rubio (2014), en Uruguay, precisamente en el departamento de Soriano, definieron que es muy importante a la hora de decidir la dosis de nitrógeno (N) a agregar, tener en cuenta aspectos relacionados con

el potencial de producción de cada ambiente. De esta forma se busca evitar realizar “sobre” o “subfertilizaciones” con las consecuencias económicas y de impacto ambiental que conllevan estas decisiones. Además, estos autores determinan que ante la incertidumbre de cómo se va a desarrollar el cultivo en etapas avanzadas, los resultados obtenidos pueden indicar, que para sus condiciones y año en particular de realizado el experimento, puede ser una buena decisión aplicar 50 UN a V6 y volver a monitorear el estado del cultivo a V10-11 para definir la segunda aplicación.

En el caso de Abraham y Falco (2016), en Uruguay, precisamente en el departamento de Río Negro, determinaron que, en secano, cuando el 100% del nitrógeno (N) fue aplicado en V6, se obtuvo un rendimiento menor al logrado cuando la aplicación fue fraccionada en V6-V10 o V6-V12. En riego, por otra parte, se obtuvo el mismo rendimiento independientemente del momento de aplicación del N. Esto indicaría la posibilidad de diferir parte del N a estadios más avanzados (V10 o V12), en especial en años con abundantes precipitaciones que aumentan el riesgo de pérdidas por lixiviación.

2.5.2 Altura de planta

Según Abeles et al. (1992), restringir físicamente el crecimiento de raíces da como resultado un aumento en la producción de etileno. El crecimiento de raíces en el suelo está restringido por impedancia mecánica dado que una raíz no puede disminuir su diámetro para entrar en pequeños poros. La extensión de la raíz depende de la presión axial y radial de la misma, en donde hasta 1.4mPa puede ejercer para agrandar y entrar en los poros. La impedancia tan pequeña como 20kPa provoca una redirección de crecimiento radicular a favor de la expansión lateral (Moss et al., citado por Abeles et al., 1992).

Se desarrolló un estudio en donde los epicótilos de arveja fueron encerrados en cámaras donde su alargamiento era restringido por dos tratamientos, uno definido por un tapón de espuma neopreno y otro por un medio de perlas de vidrio (Goeschi et al., citado por Abeles et al., 1992). Estos tratamientos generaron un aumento de la evolución de etileno, expansión radial inducida y disminución de la longitud de los entrenudos. Estas respuestas aumentaron con la magnitud creciente de la restricción.

Otros experimentos determinaron que restringir el alargamiento de las plántulas de soja con un medidor de tensión resultó en un aumento de tres a siete veces en la tasa de producción de etileno a partir del hipocótilo, disminuyó la velocidad del alargamiento y aumentó la expansión del hipocótilo (Zheng y Inouye, citado por Abeles et al., 1992). En el caso de las plántulas de sorgo mostraron un aumento de siete veces en la producción de etileno cuando su crecimiento fue restringido por una placa de vidrio de cobertura (Paradies et al., citado por Abeles et al., 1992).

Etchegoimberry y Ernst (2018) en un experimento realizado en Soriano, Uruguay en chacras pertenecientes a productores de la asociación uruguaya de siembra directa (AUSID) en donde en cada una de estas chacras (bajo sistema de siembra directa) se evaluó el uso de descompactación subsuperficial con paraplow contra el tratamiento testigo sin descompactar. Se cuantificó la resistencia mecánica a la penetración, altura de planta y estado nutricional a inicio del estado reproductivo, y rendimiento en grano de soja. El pasaje de la herramienta redujo la resistencia a la penetración significativamente entre los 8 y 30 cm de profundidad, cuando esta se midió 6 meses luego de aplicado el tratamiento. En los primeros 8 cm y por debajo de 30 cm no hubo diferencias entre los tratamientos. Se observaron diferencias significativas en cuanto a la altura de planta siendo esta mayor en condiciones de descompactación, lo que podría indicar mayor crecimiento radicular. El mayor crecimiento, permite observar diferencias visuales a nivel de campo, como cultivos más vigorosos luego de utilizar descompactadores, pero que no garantiza mayores rendimientos. Aún en aquellas zonas identificadas como de mayor resistencia a la penetración no se cuantificó un incremento claro en el rendimiento del cultivo debido a la descompactación sub-superficial. Podría esperarse que los resultados fueran distintos en situaciones donde la resistencia a la penetración superará los valores críticos de referencia (2,5 MPa).

Grzesiak (2009) reporta que los resultados obtenidos en su trabajo a partir de maíz y triticale confirman que niveles moderados y severos de compactación del suelo (1.47 y 1.58 Mg m⁻³ respectivamente) condujeron a la reducción del crecimiento de brotes y raíces. Otros autores han definido que la reducción de la materia seca de los brotes de maíz bajo condiciones de suelo

compactado se debió principalmente a reducción del área foliar, diámetro del tallo y altura de la planta (Lipiec et al., citado por Grzesiak, 2009).

2.5.3 Temperatura del canopeo

En cultivos con un adecuado suministro de humedad, la temperatura del canopeo se encuentra generalmente por debajo de la del ambiente, como resultado de la pérdida de calor latente a través de la transpiración. Esto contrasta con cultivos expuestos a déficit hídrico, donde la temperatura de las hojas puede estar incluso por encima de la del ambiente al reducirse la transpiración por el cierre estomático (Idso et al., Reynolds et al., citado por Molino, 2001).

Los cultivos con adecuado suministro de humedad ante mayores déficits de presión de vapor pueden regular la temperatura foliar por incrementos de la transpiración reduciendo la temperatura foliar hasta 8 °C por debajo de la temperatura del aire (Reynolds et al., citado por Maddoni y Navarrete, 2016). Por el contrario, en cultivos bajo condiciones de déficit hídrico un aumento en el déficit de presión de vapor puede incrementar la temperatura foliar hasta 15 °C por encima de la temperatura del aire (Altschuler, citado por Maddoni y Navarrete, 2016) resultando perjudicial para la funcionalidad del aparato fotosintético (Maddoni y Navarrete, 2016).

Read y Arder, citados por Díaz-Zorita et al. (2002), indican que la disponibilidad de agua está estrechamente relacionada con las propiedades del suelo, como el contenido de COS y la textura. La forma de disminuir la inestabilidad de la producción del plan debido a la escasez de agua es ajustar las prácticas de manejo de suelos y cultivos con el objetivo de aumentar la capacidad de almacenamiento de agua (Giménez, citado por Díaz-Zorita et al., 2002). Por su parte Díaz-Zorita, citado por Molino (2001), indica que la falta de rotaciones tiende a reducir la capacidad de acumulación de agua en suelos al fomentar la pérdida de carbono y de estructura de los horizontes superficiales.

Ergo et al. (2017) realizaron un experimento en INTA Manfredi, donde evaluaron los procesos fisiológicos involucrados en la fotosíntesis bajo

condiciones de estrés térmico e hídrico en soja donde encontraron que el estrés hídrico, independientemente del estrés térmico, redujo la fotosíntesis (52%), la conductancia estomática (70%) e incrementó la temperatura de hoja (8%) con respecto al control. Concluyeron que el estrés hídrico durante el llenado de granos afectó negativamente la fotosíntesis a través, no sólo de factores estomáticos, sino también a través de alteraciones en el flujo de electrones.

Navarrete Sánchez et al., citado por Maddoni y Navarrete (2016), estudiaron la incidencia conjunta de alta temperatura y estrés hídrico en la etapa previa al período crítico, determinando una mayor reducción (39.5%) en el crecimiento de los cultivos de maíz que los estreses aislados (11%). Los efectos de los estreses principalmente sobre la EUR explicaron los cambios en la tasa de crecimiento y estuvieron asociados a la menor capacidad de disipación de la temperatura foliar de los cultivos sometidos a estrés hídrico. Luego del período de imposición de los estreses, la capacidad de recuperación de la EUR durante el período crítico compensó total o parcialmente, los efectos tempranos, reflejándose en pocos cambios de la tasa de crecimiento alrededor de floración y en la fijación de granos.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EXPERIMENTO

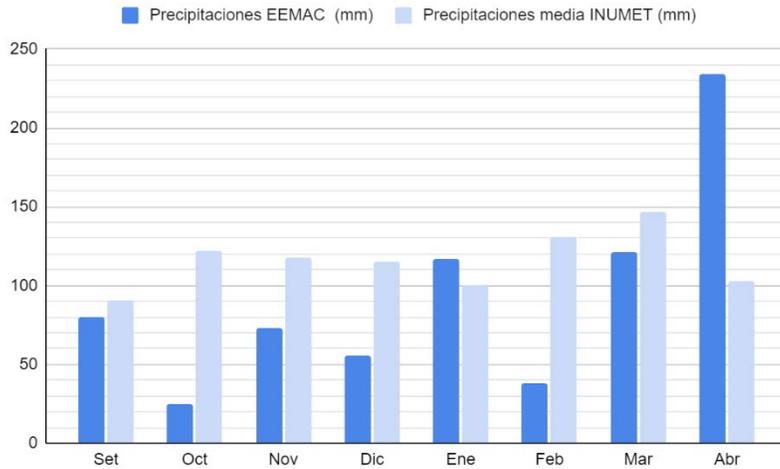
El trabajo se realizó en el verano correspondiente a la zafra 2020/2021 sobre los cultivos de maíz (*Zea mays*) y soja (*Glycine max*), en un experimento de largo plazo iniciado en 1992 en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni, ubicada sobre la ruta 3, km 363 del Departamento de Paysandú.

El suelo corresponde a la unidad San Manuel, según la carta de suelos 1:1000.000 (MAP. DSF, 1976), y grupo CONEAT 10.9. Las características del experimento y las propiedades del suelo definidas por la historia de manejo fueron analizadas por Ernst et al., 2020.

3.2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

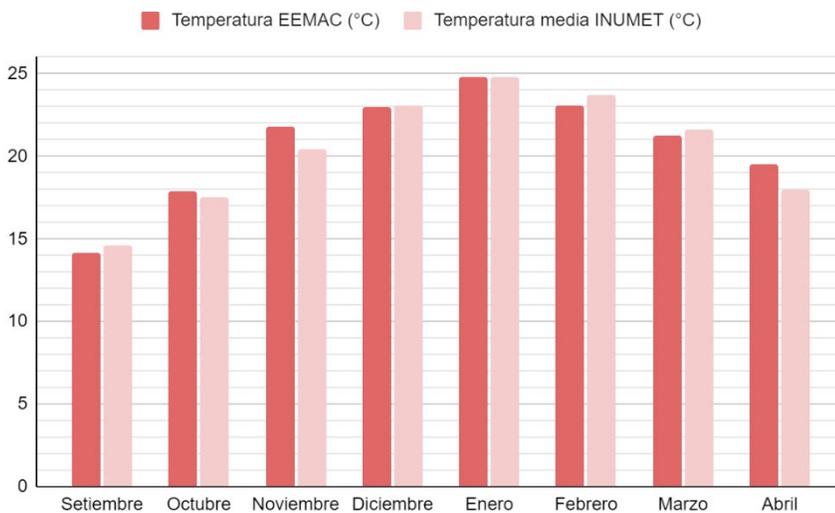
Las precipitaciones ocurridas en el período comprendido entre setiembre de 2020 y abril 2021 en la EEMAC estuvieron muy por debajo de la media histórica para el Departamento de Paysandú (Figura No.1). Durante el período vegetativo llovieron 150,4 y 83,2 mm en soja y maíz respectivamente. En tanto, durante el periodo crítico de definición de los componentes numéricos del rendimiento más relevantes, fueron 38,6 y 144,2 respectivamente. Durante enero y abril llovió por encima de la media, incluso, en el mes de abril las precipitaciones duplicaron el valor de la media (Ver anexo No.3). Estas condiciones definen un año con limitantes hídricas mayores en soja que en maíz, dado por la cantidad de lluvias registradas como diferencias en la ubicación temporal del período crítico.

Figura No.1. Precipitaciones para el período 09/2020 – 04/2021 registradas en la EEMAC vs media histórica de INUMET para Paysandú



En relación a la temperatura, el año se podría calificar como año promedio (Figura No.2), con salvedad de los meses de noviembre y abril, donde la temperatura fue aproximadamente 1°C mayor que el promedio (Ver anexo No.3).

Figura No.2. Temperatura media para el período 09/2020 – 04/2021 registradas en la EEMAC vs media histórica de INUMET para Paysandú



3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

El rediseño del sistema de cultivo consiste de cuatro tratamientos con cuatro repeticiones en un diseño de bloques completos al azar, todos bajo siembra directa con un tamaño de parcela de 50*10m. Los tratamientos corresponden a sistemas de cultivo (ver anexo No.6) aplicados sobre un gradiente de degradación de la calidad del suelo generado por 20 años de una combinación de manejo de suelos (laboreo convencional y siembra directa) por agricultura rotando con pasturas contra agricultura continua (Cuadro No.1).

El tratamiento correspondiente a agricultura continua bajo siembra directa (ACSD) solo modificó la secuencia de cultivos (Cuadro No.1).

El tratamiento manejado con agricultura rotando con pasturas largas que ocuparon el 50% de tiempo bajo siembra directa (APSD) fue tomado como el tratamiento de referencia, ya que tuvo los mejores indicadores de calidad de suelo (Ernst et al., 2020), mayores rendimientos y menores requerimientos de fertilizante nitrogenado. Por tanto, se mantiene bajo este manejo, pero ajustando la secuencia de cultivos de la fase agrícola. De aquí en más, corresponde a agricultura rotando con pasturas de larga duración (APLtestigo) (Cuadro No.1).

El tratamiento de agricultura continua sin labranza con alta frecuencia de cultivos estivales de metabolismo C4 (sorgo y maíz) (ACSDC4), que se diferenció de APSD por su menor capacidad de suministro de nitrógeno, pero que logró similares rendimientos ajustando los requerimientos de fertilizante nitrogenado, paso a un sistema de agricultura rotando con praderas de corta duración (APC), compuesta por trébol rojo, de manera de evaluar la capacidad de revertir el proceso con propiedades del suelo (Cuadro No.1).

Los tratamientos de agricultura continua con alta frecuencia de cultivos estivales con metabolismo C3 (girasol y soja) sin labranza (ACSDC3) o rotando con pasturas, pero con labranza (APLCC3), que generaron un deterioro en la calidad del suelo cuantificado en su contenido de carbono orgánico superficial, velocidad de infiltración del agua y estabilidad de los agregados del suelo, fueron sustituidos por agricultura rotando con pasturas largas (APLdegradado). Para evaluar el efecto de la eliminación de la labranza y de la diversificación de la fase

agrícola con la inclusión de cultivos de maíz y trigo, así como la inclusión del cultivo de servicio de avena (Cuadro No.1).

El sistema de cultivos que generó la máxima degradación de propiedades físicas y químicas del suelo, agricultura continua con labranza (ACLC) fue sustituido por la siembra de un cultivo perenne (switchgrass), pero no forma parte de este estudio.

Cuadro No.1. Tratamientos actuales, antecesores y objetivo del rediseño aplicado.

Tratamiento actual	Referencia histórica	Objetivo del rediseño			
		Disponibilidad de N con pastura corta	Recuperación con pastura larga	Diversidad de cultivo	Recuperación eliminando labranza
ACSD	ACSD			X	
APC	ACSDC4	X			
APLdegradado	APLCC3+ACSD C3		X	X	X
APLtestigo	APSD			X	

Las “pasturas largas” incluidas en los tratamientos APLtestigo y APLdegradado corresponden a una mezcla compuesta por festuca (*Festuca arundinacea*), trébol blanco (*Trifolium repens*) y lotus (*Lotus corniculatus*), mientras que el tratamiento APC corresponde a trébol rojo (*Trifolium pratense*).

La secuencia de cultivos para el tratamiento con agricultura continua se compone de maíz-trigo/soja-avena, este último se utiliza como cultivo de cobertura invernal. En el caso de la secuencia de cultivos de la rotación con pastura corta, la secuencia fue maíz-trigo/soja.

Como los tratamientos están desfasados en el tiempo, en el verano 2020-21 los tratamientos ACSD y APC fueron sembrados con maíz y APLtestigo y APLdegradado, con soja.

3.4 MANEJO GENERAL DEL ENSAYO

Todo el experimento se maneja sin labranza. La soja se sembró sobre rastrojos de avena, la cual es utilizada como cultivo de cobertura invernal en los tratamientos APLtestigo y APLdegradado. La distancia entre surcos fue de 38 cm con una población objetivo de 30 plantas m⁻².

El maíz en el tratamiento ACSO se sembró sobre rastrojo de avena como cultivo de cobertura invernal, mientras que para el tratamiento APC se sembró luego de una fase de pradera corta de trébol rojo. La distancia entre surcos fue de 50 cm con una población objetivo de 7 pl m⁻².

En ambos cultivos el manejo de malezas, plagas y de fertilización se realizó de forma homogénea, buscando que los factores reductores del rendimiento no interfirieran en los resultados.

La fertilización a la siembra fue de 110 kg/ha de 7-40-0. En el caso del maíz se adicionó 80 kg/ha de UREA a la siembra y 100kg UREA azufrada (40-0/0-0 + 5S) en el estadio V6.

3.5 DETERMINACIONES

3.5.1 Determinaciones en el suelo

3.5.1.1 Resistencia a la penetración

Se cuantificó la resistencia a la penetración del suelo (Rp) en cinco muestras al azar por parcela. Se utilizó el penetrómetro FieldScout SC-900, registrando la Rp en kPa a intervalos de 2,5 cm hasta los 45 cm de profundidad.

3.5.1.2 Estabilidad de agregados

Se determinó la estabilidad de agregados, tomando cinco muestras imperturbadas al azar por parcela de los primeros 10 cm del suelo. El método utilizado fue Yoder (1936) modificado por Kemper y Rosenau (1986). Para el muestreo se utilizó un calador con un diámetro de 15 cm a 10 cm de profundidad.

3.5.1.3 Carbono orgánico

Las determinaciones del porcentaje de carbono orgánico del suelo (Walkley y Black, 1934) se realizaron sobre una muestra compuesta por cinco submuestras al azar por parcela a dos profundidades: 0-5 cm y 5-20 cm. Se utilizó un calador de 2,5 cm de diámetro.

3.5.1.4 Densidad aparente

Se realizaron determinaciones de la Densidad Aparente (DAp), en donde se tomaron cinco muestras al azar por parcela, generando una muestra compuesta. Se utilizó un calador con un volumen de 98 cm³. Finalmente, se midió el peso de las muestras compuestas y luego se calculó la humedad de las mismas para obtener el peso seco de toda la muestra. El peso seco se dividió entre volumen muestreado para obtener el resultado de la determinación.

3.5.1.5 Evaluación visual de la estructura del suelo

Se determinó una evaluación visual de la estructura del suelo mediante el método VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) desarrollado por Guimarães et al., citado por Guimarães et al. (2013). Se tomaron tres muestras con una pala que realizó un corte de 25 cm de profundidad. Esta evaluación da como resultado un puntaje que se encuentra entre 1 y 5. Para construir este puntaje de calidad, se separó la muestra en dos mitades en las que se evaluó cualitativamente la resistencia de los agregados, la cantidad de poros, cantidad y distribución de raíces, así como el tamaño y forma de los agregados.

3.5.1.6 Infiltración

La tasa de infiltración de agua se llevó a cabo utilizando el método desarrollado por el Soil Quality Institute (1999). Se trata de un anillo de 15 cm de diámetro que se insertó verticalmente 5 cm en la capa superior del suelo. El anillo se forró con una envoltura de plástico y se agregó una hoja de agua destilada de 2,5 cm. Luego se retiró la envoltura de plástico para comenzar a humedecer y homogeneizar la humedad del suelo registrando el tiempo que demoraba el agua en infiltrar. Si en 45 minutos no desaparecía el agua que se había agregado al cilindro, se procedía a medir la altura de la lámina de agua excedente en ese preciso momento. En el caso de que el agua desapareciera antes de los 45 minutos, se agrega nuevamente una lámina de 2,5cm de agua midiéndose nuevamente el tiempo que esta demora en desaparecer, expresando la tasa de infiltración con el suelo a capacidad de campo en esta instancia. Si en 45 minutos no desaparecía el agua que se había agregado al cilindro, se procedía a medir la altura de la lámina de agua excedente.

3.5.2 Determinaciones en planta

3.5.2.1 Lectura de clorofila

Se llevó a cabo la lectura de clorofila a partir del SPAD 502 Minolta en maíz, realizando las lecturas en la hoja opuesta a la mazorca en 10 plantas consecutivas por cada parcela. Se encontraron las diferentes repeticiones entre los estadios R3 y R4.

3.5.2.2 Temperatura del canopeo

Se determinó la temperatura del canopeo así como la del aire, tanto para el cultivo de maíz como el de soja a partir de un termómetro láser. Se tomó una determinación de la temperatura ambiente y veinte medidas de temperatura del canopeo por repetición de cada tratamiento.

3.5.2.3 Número de plantas logradas, altura y nudos por planta en soja

Se contó el número de plantas logradas en dos surcos consecutivos de 10 metros lineales, en los mismos también se cuantificó el número de nudos por planta. Se midió la altura de las mismas en 10 plantas por parcela.

3.5.2.4 Número de plantas logradas, altura y espigas por planta en maíz

En dos surcos consecutivos de 10 metros lineales se contó el número de plantas logradas, y el número de espigas de las mismas. En cuanto a la altura, se midió en 10 plantas consecutivas.

3.5.3 Determinaciones a cosecha

Se determinó el rendimiento de cada una de las repeticiones de cada tratamiento tanto para los cultivos de soja como los de maíz.

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico se llevó a cabo con el software R studio utilizando un diseño de bloques completos al azar. Las propiedades del suelo se analizaron utilizando todos los tratamientos juntos, pero como los cultivos sembrados dependen de la fase de la rotación en la que se encuentran (tratamientos desfasados en el tiempo), la respuesta vegetal se analizó dentro de cada cultivo por separado. Por un lado, los componentes del rendimiento medidos, ya que difieren entre los cultivos (N° de nudos por planta en soja y N° de espigas por planta en maíz). Por otro lado, las variables que ambos cultivos compartían (temperatura del canopeo, rendimiento, altura de planta) igualmente fueron analizadas por separado para no atribuirle a los tratamientos diferencias propias los cultivos.

3.6.1 Diseño en bloques completos al azar

Se utilizó un diseño en bloques completos al azar, contando con 4 tratamientos y 4 repeticiones para cada uno de estos. Los bloques fueron creados en función de la posición que estos ocupaban en la pendiente y la profundidad del suelo en cada sitio.

Las variables analizadas bajo este diseño experimental fueron rendimiento, plantas por metro cuadrado, altura de planta, lectura de clorofila, nudos por planta, nudos por metro cuadrado, espigas por planta, espigas por metro cuadrado, temperatura del canopeo, estabilidad de agregado, perfil cultural, infiltración y densidad aparente.

Las salidas del software R studio fueron las medias ajustadas para cada una de las variables, sobre las cuales se realizó el análisis de la varianza (ANAVA) y test de Tukey para constatar la existencia o no de diferencias significativas entre tratamientos.

3.6.2 Análisis de varianza (ANAVA)

Para todas las variables mencionadas anteriormente, se realizó el análisis de la varianza con el objetivo de detectar la existencia o no de diferencias significativas entre los distintos tratamientos o estratos por tratamiento según corresponda. En aquellos casos donde se encontraron diferencias significativas se realizó una comparación de medias utilizando el test de Tukey.

3.6.3 Test de Tukey

Se trabajó con valores de alfa de 0.05 y 0.1, es decir con niveles de confianza del 90 y 95%. Cuando se detectaban diferencias significativas a través del ANAVA pero el test de Tukey no arrojaba diferencias entre las medias trabajando con una confianza del 95%, se realiza nuevamente el test bajando la confianza a 90%. Este cambio en la confianza utilizada, permite que el estadístico W exija una menor distancia entre medias siendo más probable

encontrar diferencias entre medias. Cuando se agrupaban las medias usando una confianza del 95%, se consideró que las medias sí eran diferentes estadísticamente. Si esto ocurría al trabajar con 90% de confianza, se trató como una tendencia.

3.6.4 Análisis de Covariables

Dado que el número de plantas por metro cuadrado medido en R3-R4 para soja y en R3-R4 y a la cosecha para maíz no tuvo diferencias significativas entre tratamientos, se concluye que éste no es afectado por el tratamiento por lo que puede ser utilizado como covariable. Este valor fue utilizado para corregir el rendimiento en función del número de plantas en los estados mencionados para ambos cultivos.

4 RESULTADOS

4.1 PROPIEDADES DE SUELO

4.1.1 Carbono orgánico en el suelo

El único sistema de cultivo que mostró significativamente menor concentración de COS en los primeros 5 cm del suelo fue APLdegradado ($p \leq 0,05$) cuando se lo compara con ACSD y APLtestigo.

En tanto, en el estrato 5-20 cm, se registraron diferencias significativas entre los tratamientos ACSD y APLtestigo siendo el primero quien registró los menores valores de COS (Cuadro No. 2).

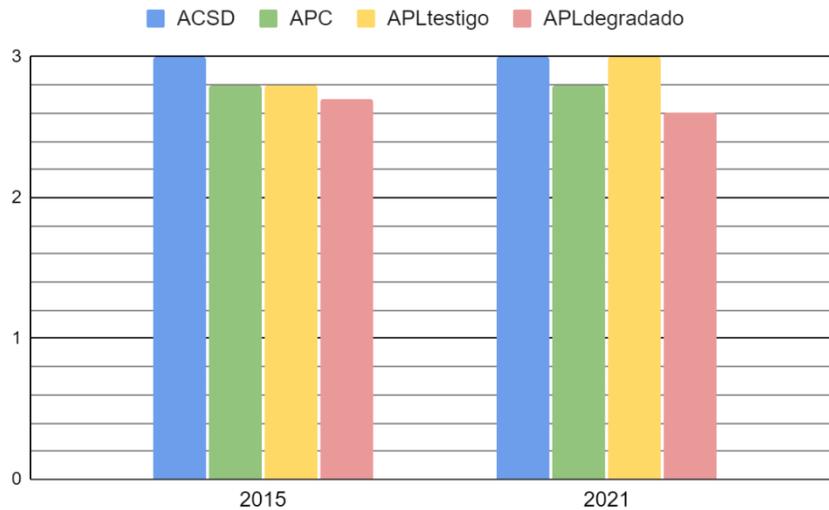
La Estratificación del carbono en el suelo, calculada como la relación entre el carbono en los primeros 5 cm del suelo y entre 5-20 cm, fue mayor en el sistema de cultivo ACSD, mientras que APC, APLtestigo y APLdegradado fueron significativamente menores.

Cuadro No. 2. Efecto del sistema de cultivo sobre la concentración de carbono orgánico en el suelo en el estrato 0-5 cm y 5-20 cm de profundidad

Sistema de cultivo	ACSD		APC		APLtestigo		APLdegradado		
	Año	2021	2015	2021	2015	2021	2015	2021	2015
Carbono 0-5 (%)		3.0 A	3.0 a	2.8 AB	2.8 a	3.0 A	2.8 a	2.6 B	2.7 b
Carbono 5-20 (%)		1.7 B	1.8 a	1.9 AB	1.9 a	2.1 A	1.9 a	2.0 AB	1.9 a
Estratificación		1.77 A	1.67	1.45 B	1.47	1.43 B	1.47	1.29 B	1.42

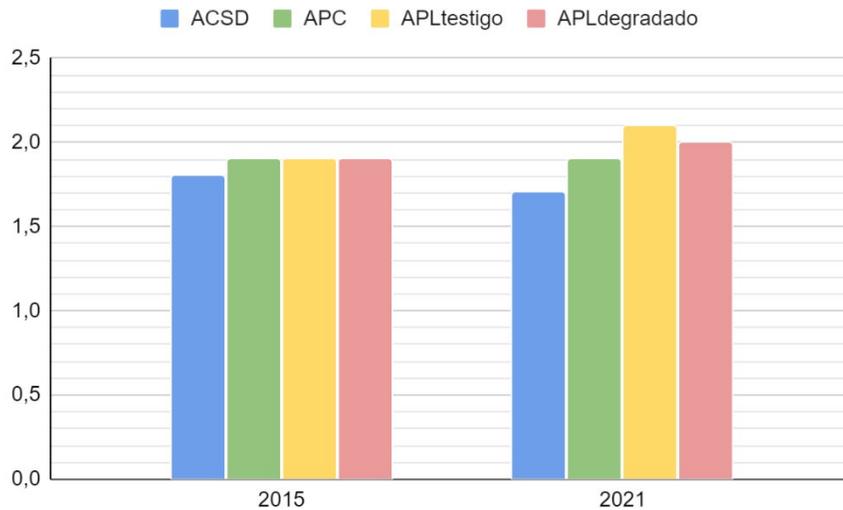
Valores seguidos por la misma letra dentro de fila para cada año de medición de forma independiente no difieren entre sí ($p \leq 0.05$).

Figura No. 3. Evolución del Carbono Orgánico de 0-5cm



Analizando la evolución en el tiempo, el único sistema de cultivo que disminuyó su contenido de carbono orgánico respecto a 2015 en el estrato de 0-5cm fue APL degradado. En tanto, APC y ACSD se mantuvieron, siendo mayores los niveles de este último. El sistema de cultivo de mejor comportamiento en el 2015 (APLtestigo) fue el único que incrementó los niveles de carbono en dicho estrato.

Figura No. 4. Evolución del Carbono Orgánico de 5-20cm



El sistema de cultivo ACSD fue el único que disminuyó el contenido de COS de 5-20cm, así como el único que se mantuvo en similares niveles fue el tratamiento APC. Los restantes tratamientos aumentaron el carbono, siendo mayor el aumento en el tratamiento APL testigo.

4.1.2 Propiedades físicas del suelo

La tasa de infiltración de agua y la evaluación visual del perfil del suelo detectaron diferencias significativas entre sistemas de cultivos. En tanto, la Dap, EA y Rp no difirieron entre manejos (Cuadro No.3).

Cuadro No. 3. Propiedades físicas del suelo medidas en cada tratamiento

Tratamiento	ACSD	APC	APLtestigo	APLdegradado
Densidad Aparente (Mg m⁻³)*	1.2 ns	1.1 ns	1.1 ns	1.0 ns
Tamaño medio ponderado de agregados estables al agua (mm) *	1.53 ns	1.79 ns	1.75 ns	1.41 ns
Tasa de Infiltración (cm/min) *	0.706 a	0.45 ab	0.208 b	0.118 b
Perfil Cultural **	1.415 ab	1.13 b	1.375 ab	1.585 a
Resist. a la penetración 0-45cm (Kpa) *	822 ns	818 ns	872 ns	883 ns

Valores seguidos por la misma letra dentro de fila no difieren entre sí (* $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.10$)

No existieron diferencias significativas en densidad aparente entre los distintos tratamientos en ninguno de los niveles de confianza utilizados. El valor máximo registrado fue de 1,2 Mg m⁻³ siendo éste inferior al umbral establecido como limitante al crecimiento radicular para suelos con similares características de 1,50 Mg m⁻³ (USDA, 1996).

El tamaño ponderado de agregados estables al agua tampoco registró diferencias significativas entre tratamientos, variando en un rango entre 1,41 mm (APLdegradado) y 1,79 mm (APC).

La tasa de infiltración fue evaluada con un $p \leq 0.05$ presentando diferencias significativas entre tratamientos. ACSD y APC no presentaron diferencias entre sí siendo el primero el valor más alto registrado. Tampoco se registraron diferencias entre APC, APLtestigo y APLdegradado.

El perfil cultural (VESS) presentó diferencias significativas entre tratamientos cuando se utilizó un p valor ≤ 0.10 . ACSD, APL degradado y APC no presentaron diferencias significativas entre sí (siendo APC el que presentó menor valor), así como ACSD, APL testigo y APL degradado tampoco registraron diferencias (siendo APL degradado el de mayor valor). Las diferencias se encontraron al comparar APC y APL degradado.

Los tratamientos no tuvieron efecto en la resistencia a la penetración. En el cuadro No. 3 se muestran los valores promedio de todo el perfil. Adicionalmente, se analizó en cada estrato de profundidad con el fin de analizar si había efecto del tratamiento en alguna profundidad en particular, aunque los resultados fueron los mismos.

4.2 RESPUESTA DEL CULTIVO

Estas mediciones fueron realizadas en el estadio R3-R4 y a cosecha para el cultivo de maíz y en R3-R4 en el caso de soja. Cabe destacar que el análisis estadístico se realizó por separado para las variables medidas en cada uno de los cultivos al igual que para el rendimiento, ya que si se realizara el análisis en conjunto se atribuirían a los tratamientos diferencias propias de estos.

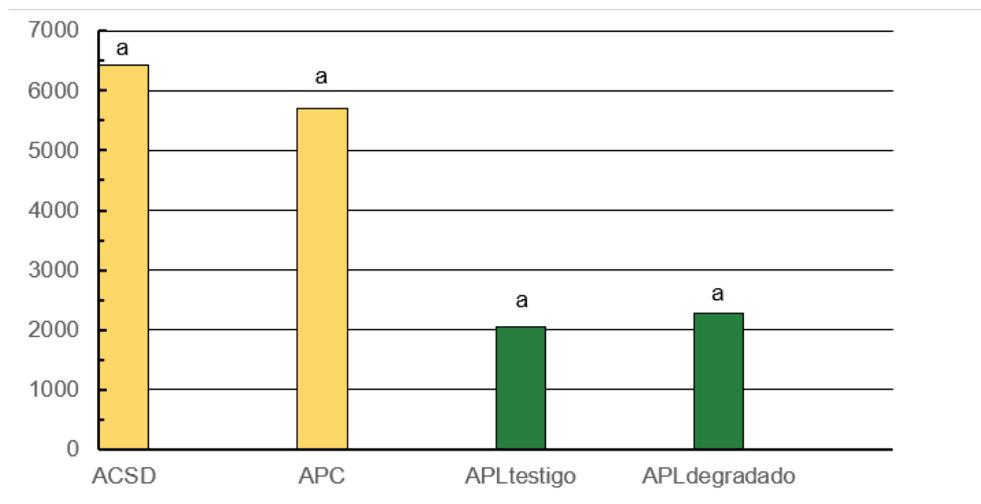


Figura No. 5. Rendimiento de maíz (amarillo) y soja (verde) en kg/ha por tratamiento.

Para aquellos tratamientos en que se llevó a cabo el cultivo de soja (Cuadro No. 4), no hubo efecto sobre el número de plantas logradas. En cuanto al rendimiento, tampoco se halló efecto del tratamiento, incluso cuando se utilizó como covariable el número de plantas m^{-2} (Figura No. 5). Como se mencionó anteriormente, dicha variable no fue afectada por los tratamientos, lo que posibilita su uso como covariable. No hubo diferencias en el número de nudos por planta entre tratamientos, aunque sí existió una tendencia (al utilizar un $p \leq 0.10$) a un menor número de nudos por metro cuadrado a favor del tratamiento APLdegradado, explicada por un mayor número de plantas por unidad de superficie.

En los tratamientos en que se llevó a cabo el cultivo de maíz (Cuadro No. 4), no hubo diferencias significativas en el número de plantas medidas en torno al estadio R3-R4 ni en el número de plantas a cosecha. Las diferencias dadas entre el número de plantas a cosecha y el número de plantas a R3-R4, siendo mayor el primero, pueden estar relacionadas a que tanto el método de muestreo, así como los operarios, difirieron a causa de la situación sanitaria del momento. Por tal motivo ambos indicadores fueron utilizados como covariable para corregir el rendimiento en función de la población. Al analizar el rendimiento del cultivo sin la covariable mencionada se encontraron diferencias significativas con 731 kg/ha a favor del tratamiento ACSD (Figura No. 5). Cuando se incluyó la covariable no se observaron diferencias significativas entre tratamientos por lo que se concluye que la superioridad del tratamiento ACSD no fue un efecto del tratamiento sino del número de plantas (Anexo 2).

El número de espigas por metro cuadrado medido en R3-R4 y a cosecha mostraron diferencias significativas para todos los niveles de confianza utilizados, siendo el tratamiento ACSD superior para ambas mediciones. El número de espigas por planta presentó diferencias significativas en R3-R4 para todos los niveles de confianza, con un menor número de espigas por planta en el tratamiento APC, mientras que para la determinación a cosecha únicamente se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.10$), también con un menor número de espigas por planta en el tratamiento APC.

Cuadro No. 4. Componentes del rendimiento por cultivo en cada tratamiento

Sistema de cultivo	APLtestigo	APLdegradado	ACSD	APC
Plantas m-2 R3-R4 *	27.4 ns	31.0 ns	6.65 ns	6.30 ns
Plantas m-2 a cosecha *	-	-	7.9 ns	7.2 ns
Nudos m-2 **	417.5 b	470.7 a	-	-
Nudos / planta *	15.43 ns	15.33 ns	-	-
Espigas m-2 en R3-R4 *	-	-	12.48 a	10.13 b
Espigas m-2 a cosecha *	-	-	7.69 a	6.91 b
Espigas / planta en R3-R4 *	-	-	1.88 a	1.65 b
Espigas / planta a cosecha **	-	-	0.98 a	0.97 b

Valores seguidos por la misma letra dentro de fila no difieren entre sí (* $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.10$).

En la siguiente tabla se presentan aquellas variables medidas en planta que se relacionan directamente con propiedades físicas del suelo. El análisis estadístico para la altura fue realizado por separado para los diferentes cultivos, al igual que para la temperatura del canopeo.

Cuadro No. 5. Respuesta del cultivo

Sistema de cultivo	APLtestigo	APLdegradado	ACSD	APC
Altura (m)*	0.98 ns	0.96 ns	1.715 ns	1.693 ns
Temp. del canopeo (°C) **	28.93 a	25.96 b	26.75 ns	27.63 ns
L. clorofila *	-	-	43.1 ns	37.4 ns

Valores seguidos por la misma letra dentro de fila no difieren entre sí (* $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.10$).

Ni el cultivo de maíz ni soja presentaron diferencias significativas en altura. En cuanto a temperatura del canopeo existieron diferencias estadísticas dentro de los tratamientos que contaban con el cultivo de soja siendo APL testigo el de mayor temperatura, en aquellos tratamientos bajo cultivo de maíz no hubo diferencias significativas. Las mediciones de lectura de clorofila realizadas en el cultivo de maíz tampoco tuvieron diferencias significativas entre tratamientos.

5 DISCUSIÓN

5.1 PROPIEDADES DEL SUELO

Las diferencias en propiedades del suelo entre los sistemas de cultivos presentes en el 2021 corresponden al efecto acumulado desde el inicio del experimento, más las modificaciones realizadas en 2016. El sistema APLtestigo está bajo un sistema de rotación cultivos pasturas en una relación 50% del tiempo de cada componente desde 1992. En tanto, mientras que ACSD corresponde a agricultura continua bajo doble cultivo anual con alta frecuencia de soja durante el mismo período, APC estuvo bajo agricultura continua con alta frecuencia de sorgo como cultivo estival hasta el 2016, año en que se sembró una pastura de trébol rojo.

El rediseño de los sistemas fue planteado buscando revertir los problemas detectados en el 2015 y/o seguir capitalizando las ventajas de los mejores manejos. Como consecuencia, ninguno de los sistemas de cultivos rediseñados muestra defectos *a priori* en cuanto al uso del suelo y la secuencia de cultivos (Anexo X). En el tratamiento APC se buscó levantar, incorporando una pradera corta de leguminosas, la principal limitante detectada, como lo era el suministro de N desde el suelo. La proporción de esta fase dentro de la rotación paso de cero a 56% del tiempo (Anexo X). La relación de cultivos anuales consecuentemente tuvo una gran disminución, lo cual beneficia la acumulación de biomasa de residuos en el sistema al bajar la cantidad de cultivos C3

APLdegradado, que habían generado la mayor pérdida de COS hasta 2015, fue modificado a un sistema cultivos-pastura compuesta por festuca, trébol blanco y lotus. El objetivo fue iniciar un proceso de restauración de la fertilidad perdida, eliminando el efecto negativo de los barbechos invernales y el laboreo. A esto se le suma el aporte de carbono que realiza la festuca como gramínea perenne a través de su sistema radicular. El resultado se reflejó en el COS de 5 a 20cm donde se logró un incremento en el año 2021 en relación a 2015. De 0 a 5cm por el contrario hubo una leve disminución posiblemente asociada a la disminución de la proporción de cultivos dentro de la rotación.

La inclusión de pasturas en la rotación del tratamiento APC y la continuidad de las mismas en el tratamiento APLtestigo no provocaron diferencias en la concentración de carbono de los primeros centímetros del suelo, por lo que se mantuvieron sus propiedades. Atribuimos esta falta de respuesta al corto período de funcionamiento del sistema de cultivo (Cuadro No. 2). A su vez, la mayor cantidad de residuos acumulados en superficie en sistemas de cultivo continuo en relación a los sistemas que rotan con pasturas que son pastoreadas (Ernst y Siri-Prieto., 2009). El tratamiento APLdegradado mantuvo la menor concentración de COS, por lo que con solo 3 años no logró recuperar la fertilidad de un suelo degradado por el sistema de cultivo aplicado en el período anterior (Cuadro No. 2). El carbono medido entre 5 y 20 centímetros, por el contrario, fue significativamente mayor en aquellos tratamientos bajo rotación de cultivos con pasturas largas que incluyen festuca (APLarga y APLdegradado) que en los que venían en agricultura continua hasta el 2016 (ACSD y APC). La mayor concentración de carbono en profundidad puede explicarse por un mayor ingreso de carbono proveniente de la biomasa radicular generada por gramíneas perennes (Liang et al., citado por Ernst y Siri-Prieto, 2009).

En relación a la estratificación del carbono, Duval et al. (2016), comparando sistemas de cultivo con un fuerte componente de soja con sistemas más balanceados, con inclusión de cultivos de invierno y en ocasiones cultivos de servicio, hallaron una mayor estratificación en los últimos en buena parte de los sitios experimentales. Los valores obtenidos fluctuaron entre 1.8 y 1.92 lo que es coincidente con el valor del tratamiento ACSD. En este sentido, Costantini et al. (2010) hallaron resultados similares al comparar el monocultivo de soja con rotación de maíz y soja, tanto para sistemas con barbecho invernal como aquellos con cultivos de cobertura. En el tratamiento APLdegradado, se puede observar que este indicador (a pesar del cambio en el sistema de cultivos en 2016) deja en evidencia el pasado de dichos tratamientos, es decir, el efecto del laboreo y de la alta frecuencia de soja con barbecho invernal que tuvieron desde 1992 hasta 2016. En los tratamientos APC y APLtestigo, que también tuvieron una estratificación significativamente menor que ACSD, puede explicarse por las características de dichos sistemas de cultivo. Dado que la pastura es pastoreada, los restos en superficie son menores en relación a los producidos

por los sistemas exclusivamente agrícolas, mientras que son mayores en el estrato de 5-20 cm como se explicó anteriormente.

La estratificación del carbono se relaciona positivamente tanto con la infiltración de agua como con la densidad aparente del suelo, siendo ampliamente mayor el impacto en la infiltración que en la densidad aparente (Franzluebbers, 2002), lo que se puede observar al comparar la infiltración de ACSD en relación a los demás tratamientos, en el caso de la densidad aparente, en este caso no es visible, dado que los incrementos reportados por Franzluebbers (2002) en dicha propiedad apenas alcanzan el 10% comparando manejos antagónicos como la siembra directa y el laboreo convencional.

Las diferencias en propiedades físicas (densidad aparente, estabilidad de agregados y resistencia a la penetración) no fueron significativas. Los valores de densidad obtenidos se asemejan parcialmente a los reportados por Aparicio y Costa (2007) en sistemas argentinos bajo agricultura continua (1.26Mg/m^3) y pasturas (1.16Mg/m^3). En todos los tratamientos, los valores de densidad se acercan más al valor reportado para pasturas y en ninguno de los casos supera el umbral de restricción para el crecimiento vegetal de 1.5Mg/m^3 (Hassan et al., citados por Álvarez y Steinbach, 2009) por lo que los rendimientos no deberían verse afectados por dicha propiedad del suelo.

Estos resultados no se condicen con los obtenidos por Terra y García Préchac (2001) en el experimento de largo plazo instalado en Inia Treinta y Tres, en el que los sistemas sin laboreo con agricultura continua mostraron mayores valores de densidad aparente ($1,35\text{-}1,4\text{ Mg m}^{-3}$) que aquellos que rotaban con pasturas largas ($1,25\text{-}1, \text{Mg m}^{-3}$) y cortas ($1,3\text{-}1,35\text{ Mg m}^{-3}$). Los mismos autores, hallaron una elevada correlación entre el contenido de carbono orgánico y la densidad aparente, donde el contenido de carbono orgánico explicaba un 66% de la variabilidad de la densidad aparente. Dicha relación permite explicar las diferencias obtenidas con las del experimento mencionado.

En relación a la infiltración, se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento ACSD fue el que presentó la mayor tasa de infiltración, seguido por APC que no mostró diferencias con ninguno de los tratamientos. Tanto APLtestigo como APLdegradado sí fueron inferiores en relación a ACSD. Dichos resultados no son coincidentes con los recabados por

Ernst y Siri Prieto (2009) en el mismo sitio experimental. Dichos autores utilizando el simulador de lluvia detectaron que, dentro de los tratamientos sin labranza, el tratamiento que rotaba con pasturas demoró más tiempo en comenzar la escorrentía y perdiendo por este medio un menor porcentaje del agua que se suministró en relación al tratamiento AC. Por lo tanto, indirectamente, se puede inferir que la infiltración que rotaba con pasturas fue mayor que el tratamiento con agricultura continua.

En cuanto al perfil cultural, únicamente se obtuvo una tendencia ($p \leq 0.10$) estadística, presentando el tratamiento APC un menor valor de perfil cultural (correspondiéndose con una mejor estructura de suelo) lo que es de esperarse dado que el tratamiento APC posee una fase pastura más prolongada que la agrícola, y una fase agrícola con predominancia de cultivos gramíneas. Adicionalmente, dicho tratamiento tiene como antecesor un tratamiento que constaba de agricultura continua con alta frecuencia de cultivos C4 en la secuencia. El tratamiento APL degradado fue el que presentó el mayor valor, (correspondiéndose con una peor estructura de suelo) lo que puede justificarse por sus antecesores. Por un lado, un tratamiento con predominancia de cultivos C3 (soja y girasol) bajo siembra directa, y, por otro, un tratamiento que rotaba pasturas con cultivos bajo laboreo convencional. Como valores intermedios se encuentran los tratamientos ACSD y APLtestigo.

La estabilidad de agregados no tuvo diferencias significativas entre los tratamientos, tanto al trabajar con un p valor ≤ 0.05 , así como con un p valor ≤ 0.10 . El tipo de labranza y su interacción si bien fueron los factores que más afectaron este indicador (Ernst y Siri-Prieto, 2009, Aparicio y Costa, 2007) escapan a este estudio. Ernst y Siri-Prieto (2009) al analizar en el mismo sitio experimental dicho indicador para contrastar sistemas de rotaciones y de agricultura continua con y sin labranza obtuvieron resultados similares. En dicho estudio el mayor valor de estabilidad de agregados fue obtenido en los sistemas que rotaban con pasturas sin laboreo. Sin embargo, los sistemas bajo agricultura continua sin laboreo no se diferenciaron estadísticamente, dato que es coincidente con los resultados obtenidos. Cabe destacar, que los autores obtuvieron valores de 2 milímetros o más en los sistemas sin laboreo, mientras que, en el presente estudio, el máximo valor alcanzado fue de 1,8 milímetros. Esta diferencia puede explicarse por la asociación de dicho indicador con los años del sistema bajo agricultura, tal como fue reportado por Aparicio y Costa (2007), explicando un 36% de la variabilidad,

lo que aplicaría tanto para el tratamiento ACSO como para el APLtestigo y APLdegradado que fueron muestreados luego del último cultivo de la fase agrícola. Otra explicación factible es que los cambios impuesto en el SC hayan modificado el indicador, dado que se trata de un indicador sensible en el corto plazo.

La resistencia a la penetración no fue afectada por el efecto tratamiento, tanto analizando el promedio de 0-45cm de profundidad, como desglosándolo de a 2,5cm y analizando cada estrato en particular. Como se puede observar en el Anexo No. 1 las curvas obtenidas de resistencia a la penetración en función de la profundidad se asemejan bastante entre tratamientos. En ningún tratamiento ni estrato de profundidad se superó el valor crítico que impide la elongación radical de 2 MPa (Eavis et al., citado por Rangeon et al., 2008).

5.2 RESPUESTA VEGETAL

Se cuantificó la respuesta de los cultivos a posibles diferencias en condición física y disponibilidad de agua a través de la altura de planta y la temperatura del canopeo. No hubo diferencias significativas entre sistemas de cultivo en ninguna de ellas. Interpretamos los resultados por los valores absolutos de densidad aparente y resistencia a la penetración cuantificados, ambos muy por debajo de los valores críticos de referencia. Por ejemplo, Colombi et al. (2018) hallaron diferencias en la altura del cultivo 77 días post siembra al comparar laboreo convencional contra siembra directa, en suelos donde la resistencia a la penetración era mayor a 2 MPa. Para explicar la ausencia de efecto tratamiento sobre las variables medidas, debemos tener en cuenta que la resistencia a la penetración depende principalmente del tipo de suelo (textura), densidad aparente y el contenido de humedad (Taylor y Gardner, Camp y Lund, Taylor y Ratliff, Ayers y Perumpral, Henderson et al., citados por Martino, 2001). A partir de los resultados obtenidos observamos que tanto la resistencia a la penetración como la densidad aparente no difieren entre tratamientos, al igual que la textura por tratarse del mismo suelo, por lo tanto, teniendo en cuenta las relaciones mencionadas, podemos suponer que no existan diferencias en el contenido de humedad. La temperatura del canopeo tampoco difirió entre tratamientos, dato esperable dados los demás indicadores en planta evaluados y las propiedades físicas del suelo evaluadas.

La ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos ACSD y APC en cuanto al valor de lectura de clorofila en el estadio de R3-R4 también puede ser atribuido a la inclusión de pasturas cortas (correspondientes a trébol rojo). El tratamiento antecesor a APC (ACSDC4) fue el que presentó la menor capacidad de suministro de nitrógeno (Ernst y Siri-Prieto, 2009). Los valores registrados en este indicador pueden deberse a que la pastura corta aumentó el contenido de nitrógeno en el tratamiento más deficiente igualando los valores actuales a los del tratamiento ACSD. Estas suposiciones podrían haber sido confirmadas mediante el análisis del contenido de nitrógeno en el suelo y potencial de mineralización del nitrógeno.

5.2.1 Respuesta diferencial en la composición del rendimiento

Analizando las causas que determinaron un mayor número de espigas ($p \leq 0,05$) en R3-R4 para el tratamiento ACSD, es de esperarse que no haya actuado en mayor medida la prolificidad del cultivar como consecuencia de la similar población entre tratamientos. Tampoco es esperable que el tratamiento ACSD haya logrado una mayor biomasa que APC previo a floración como consecuencia de las propiedades físicas que expliquen un mayor crecimiento radicular y como consecuencia una mejor condición hídrica que el tratamiento APC, dado que no existieron diferencias entre las propiedades físicas de ambos tratamientos. Una posible opción de una diferente oferta hídrica entre ambos tratamientos puede deberse al rastrojo que presentó cada uno, siendo el del tratamiento ACSD de un cultivo de servicio de avena, mientras que el tratamiento APC se sembró sobre un rastrojo de trébol rojo, pudiendo diferir la velocidad de descomposición entre ambos antecesores y como consecuencia existir pérdida del agua del perfil diferencial como consecuencia de una mayor evaporación en el tratamiento APC. Por último, haber obtenido un mayor aporte de N por parte del suelo podría ser descartado como consecuencia de la ausencia de diferencias significativas para la lectura de clorofila en el estadio R3-R4, recordando que el manejo de la fertilización fue el mismo para ambos tratamientos.

Analizando el caso espigas por planta en R3-R4 para el tratamiento ACSD, existió un mayor número ($p \leq 0,05$) con respecto al tratamiento APC, pero una vez hecha la determinación a cosecha no se encontraron diferencias significativas para la misma confianza. Una posible explicación es que el manejo de la

fertilización nitrogenada haya sido la limitante para alcanzar mayores tasas de crecimiento por parte del cultivo en el período desde R3-R4 a cosecha, lo que le imposibilitó haber mantenido ese mayor número de espigas por planta, así como obtener mayores rendimientos del tratamiento ACSD en relación al tratamiento APC. No se puede afirmar con seguridad que el aporte de N fue la limitante, dado que otra causa que pudo haber afectado la tasa de crecimiento del tratamiento ACSD para alcanzar el mayor potencial existente en R3-R4 pudo haber sido el régimen pluviométrico, dado que en el mes de febrero existieron precipitaciones muy por debajo de las medias históricas aportadas por INUMET para el departamento de Paysandú (Figura No.1).

Baráibar et al. (2014) en el mismo sitio experimental con los tratamientos que antecedieron a los presentes, detectaron un efecto significativo de la historia de manejo del suelo. Dicho efecto repercutió en el rendimiento de soja, siendo mayor el rendimiento en aquellos tratamientos (actual APC, APLtestigo y ACSD) que presentaron entre otras características, elevada infiltración y carbono. El peso de 100 granos fue el componente del rendimiento que los autores evaluaron, hallando una tendencia que prácticamente copiaba la de rendimiento.

6 CONCLUSIONES

En relación al testigo tecnológico (APLtestigo) para el tratamiento APC y APLdegradado no presentaron diferencias significativas en Resistencia a la penetración, Densidad Aparante, y Estabilidad de Agregados, lo que refleja un efecto positivo del rediseño de la rotación.

No se observaron respuestas del cultivo en términos de altura de planta y temperatura del canopeo. Esto indicaría que las propiedades del suelo de los sistemas de cultivo evaluados estuvieron en un rango en el que no generaron diferencias en el desarrollo de los cultivos.

Los tratamientos APLdegradado y APLtestigo lograron un aumento en el contenido de Carbono Orgánico en el estrato de 5-20cm, lo que le permitió no diferenciarse significativamente de los demás tratamientos, levantando la limitante en el contenido de carbono que presentaba el tratamiento APLdegradado en dicho estrato. Por el contrario, en el estrato de 0-5cm APLdegradado tuvo una leve disminución, mientras que el APLtestigo tuvo un leve incremento, manteniéndose las relaciones entre sistemas que lo ocurrido en 2015.

Los tratamientos ACSD y APC no presentaron diferencias significativas en la lectura de clorofila llevada a cabo en el estadio de R3-R4, lo que supone que el rediseño del sistema de cultivo en el tratamiento APC permitió levantar la limitante del aporte de N a partir del suelo.

7 RESUMEN

Los sistemas productivos en Uruguay a partir de mediados del siglo 20 han cambiado incesantemente. Comenzando por un sistema de agricultura continua bajo laboreo convencional en el que primaba el cultivo de invierno, posteriormente, un sistema de rotaciones pastura-cultivos hasta el sistema productivo predominante hoy en día: Agricultura continua bajo siembra directa sin inclusión de pasturas. Si bien se espera que este sistema resulte en menores pérdidas de suelo y conduzca a una menor degradación de sus propiedades físicas y químicas, el mismo debería cumplir con ciertos requisitos, entre otras cosas para sustituir el efecto benéfico de la pastura en la rotación. En este contexto se plantea el presente trabajo con dos objetivos principales: Detectar el efecto de distintos sistemas productivos (todo sin laboreo de suelo) sobre las propiedades físicas y el carbono orgánico del suelo (COS); Cuantificar la respuesta del cultivo de maíz y soja a los cambios ocasionados en las propiedades del suelo. Se planteó el trabajo sobre un experimento de largo plazo en el departamento de Paysandú, Uruguay. El diseño experimental fue de bloques al azar y constó de cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. El COS y su estratificación mostró diferencias entre los sistemas productivos, al igual que la tasa de infiltración y la evaluación visual de la estructura del suelo. Sin embargo, no existieron respuestas del cultivo en términos de rendimiento tanto para maíz como para soja. Sí se detectó diferencia en el número de espigas por planta en el cultivo de maíz en el estadio de R3-R4, mientras que en soja no se detectaron diferencias.

Palabras clave: Propiedades físicas, carbono orgánico del suelo, respuesta del cultivo, sistema de cultivo, maíz, soja.

8 SUMMARY

Uruguayan farming systems have been constantly changing since the 1950s. At first, the system was basically monoculture under plow tillage where the most important cash crop was the wheat during winter. Then, the system turned into a system based on crop - pasture rotation. At the beginning this system used plow tillage, but then, in the 2000s were done with no tillage. Nowadays, the predominant farming system is based on continuous cropping with neither tillage nor pasture. Even though it is expected that this kind of farming system generate less soil loss through erosion, in order not to jeopardize soil's chemical and physical properties, this system must follow some requisites. Among others, managing the system in a way that the beneficial effect of the pasture (which is not included) is replicated. Within this context, appears the present study which has to main objectives: 1) To detect the effects of different no till farming systems over the soil's physical properties and soil organic carbon (SOC); 2) To quantify the response of maize and soybean crop to the changes in soil's properties due to the different farming systems. The study was done in a long term experiment site in Paysandú department, Uruguay, most precisely in the "Estación Experimental Mario Alberto Cassinoni" of UDELAR's Facultad de Agronomía. The experimental design used was randomized complete blocks design with four treatments with four repetitions each. SOC and its stratification showed significant differences among the different farming systems as well as the infiltration rate and the visual evaluation of soil structure. However, there was not a significant response of either crop in terms of yield. Significant difference was detected in the number of ears per plant in R3-R4 stage, while in soybean there were no differences in the yield components.

Keywords: Physical properties, soil organic carbon, crop response, farming system, maize, soybean.

9 BIBLIOGRAFÍA

1. Abeles, F.; Morgan, P.; Saltveit, M. 1992. Ethylene in Plant Biology. 2da. ed. San Diego, Academic Press. 414 p.
2. Abraham, I.; Falco, N. 2016. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-V12) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 58 p.
3. Acton, D. F.; Gregorich, L. J. 1995. The health of our soils: toward sustainable agriculture in Canada. Ottawa, Centre for Land and Biological Resources Research. 138 p.
4. Álvarez, C.; Álvarez, C.; Costantini, A.; Basanta, M. 2014. Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa. *Soil and Tillage Research*. 142: 25 - 31.
5. Álvarez, R. 2006. Balance de carbono en los suelos. Información técnica de trigo campaña. Publicación Miscelánea. no. 115: 36 - 43.
6. _____; Steinbach, H. S. 2006. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in Pampean agroecosystems. *Journal of Environmental Quality*. 35(1): 3 - 13.
7. _____; _____. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*. 104(1): 1 - 15.
8. Andriulo, A. E.; Irizar, A. B. 2017. La materia orgánica como indicador base de calidad del suelo. In: Wilson, M. G. Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina. Entre Ríos, INTA. pp. 65 - 71.
9. Aparicio, V.; Costa, J. L. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research*. 96(1-2): 155 - 165.
10. Armand Ugón, M.; Ferrari, G. 2014. Respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz bajo riego. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 65 p.

11. Baráibar, S.; Freiría, D.; Rizzo, G. 2014. La calidad del suelo como determinante de la brecha de producción de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 47 p.
12. Bengough, A. G.; Bransby, M. F.; Hans, J.; McKenna, S. J.; Roberts, T. J.; Valentine, T. A. 2006. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*. 57(2): 437 - 447.
13. Bullock, D. G.; Anderson, D. S. 1998. Evaluation of the Minolta SPAD-502 chlorophyll meter for nitrogen management in corn. *Journal of Plant Nutrition*. 21(4): 741 - 755.
14. Castiglioni, M. G.; Reddel, T. 2021. Variación temporal y espacial de la resistencia a la penetración en un lote bajo siembra directa. *Ciencia del suelo*. 39(1): 12 - 29.
15. Cazaban, M.; Rubio, D. 2014. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-V11) sobre el rendimiento de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 84 p.
16. Ceriani, M.; Innella, J. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-V11) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 66 p.
17. Colombi, T.; Torres, L. C.; Walter, A.; Keller, T. 2018. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth: a vicious circle. *Science of the Total Environment*. 626: 1026 - 1035.
18. Costantini, A.; Álvarez, C.; Álvarez, C. R.; Martellotto, E.; Lovera, E. 2010. Uso de la relación de estratificación del carbono orgánico como indicador de efectos del manejo sobre el suelo y el secuestro de carbono. *In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (22^a, 2010, Rosario, Argentina). Trabajos presentados. Rosario, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. 4 p.*
19. Díaz-Zorita, M.; Grove, J. H. 2002. Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic PaleudalFs. *Soil and Tillage Research*. 66(2): 165 - 174.

20. _____.; Duarte, G. A.; Grove, J. H. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and tillage research*. 65(1): 1 - 18.
21. _____.; Barraco, M.; Alvarez, C. 2004. Efectos de doce años de labranzas en un Hapludol del Noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del suelo*. 22(1): 11 - 18.
22. Droogers, P.; Bouma, J. 1997. Soil survey input in exploratory modeling of sustainable soil management practices. *Soil Science Society of America Journal*. 61(6): 1704 - 1710.
23. Durán, A.; García Préchac, F. 2007. Suelos del Uruguay: Origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. v. 2, 358 p.
24. Duval, M. E.; Galantini, J.; Martinez, J. M.; Iglesias, J. O. 2016. Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. *Ciencia del suelo*. 34(2): 197 - 209.
25. Ergo, V. V.; Veas, R.; Lascano, R.; Vega, C.; Mattio, J.; Somale, N.; Carrera, C. 2017. Evaluación de procesos fisiológicos involucrados en la fotosíntesis bajo condiciones de estrés térmico e hídrico en soja. In: Workshop Internacional de Ecofisiología de Cultivos (3^a, 2017, Mar del Plata, Argentina). Actas. Mar del Plata, Red Raíces de Ecofisiología MINCyT y el Área Estratégica de Ecofisiología del INTA. s.p.
26. Ernst, O.; Bentancur, O.; Borges, R. 2002. Descomposición de rastrojo de cultivos en siembra sin laboreo: trigo, maíz, soja y trigo después de maíz o de soja. *Agrociencia (Uruguay)*. 6(1): 20 - 26.
27. _____.; 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.
28. _____.; _____. 2011. La agricultura en Uruguay: su trayectoria y consecuencias. In: Simposio Nacional de Agricultura (2^o, 2011, Paysandú). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 149 - 162.

29. _____.; Kemanián, A.; Mazzilli, S.; Siri-Prieto, G.; Dogliotti, S. 2020. The dos and don't's of no till continuous cropping: evidence from wheat yield and nitrogen use efficiency. (en línea). *Field Crops Research*. 257: 107934. Consultado 9 may. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107934>.
30. Etcheagoimberry, P.; Ernst, O. 2018. Respuesta del cultivo de soja a la des-compactación sub_superficial del suelo. *Cangüé*. no. 41: 4 - 9.
31. Franzluebbbers, A. J. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage research*. 66(2): 197 - 205.
32. Gabioud, E.; Wilson, M. G.; Sasal, M. C. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de le bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del suelo*. 29(2): 129 - 139.
33. García, F. 2004. *Agricultura Sustentable y Materia Orgánica del Suelo: Siembra Directa, Rotaciones y Fertilidad*. (en línea). Argentina, s.p. Consultado 2 may. 2022. Disponible en https://www.produccion-animal.com.ar/sustentabilidad/13-agricultura_sustentable_y_materia_organica.pdf.
34. García Lamothe, A.; Díaz, R.; Morón, A.; Sawchick, J.; Quincke, A. 2009. El balance de N y la sostenibilidad de los agro ecosistemas. In: *Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas (2009, Montevideo)*. Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 7 - 16. (Serie Actividades de Difusión no. 587).
35. García Préchac, F. 1992. Propiedades físicas y erosión en rotaciones de cultivos y pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas*. 1(1): 127 - 140.
36. Grzesiak, M. T. 2009. Impact of soil compaction on root architecture, leaf water status, gas exchange and growth of maize and triticale seedlings. *Plant Root*. 3: 10 - 16.
37. Guimarães, R.; Ball, B.; Tormena, C.; Giarola, N.; da Silva, Á. 2013. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. *Soil and Tillage Research*. 127: 92 - 99.

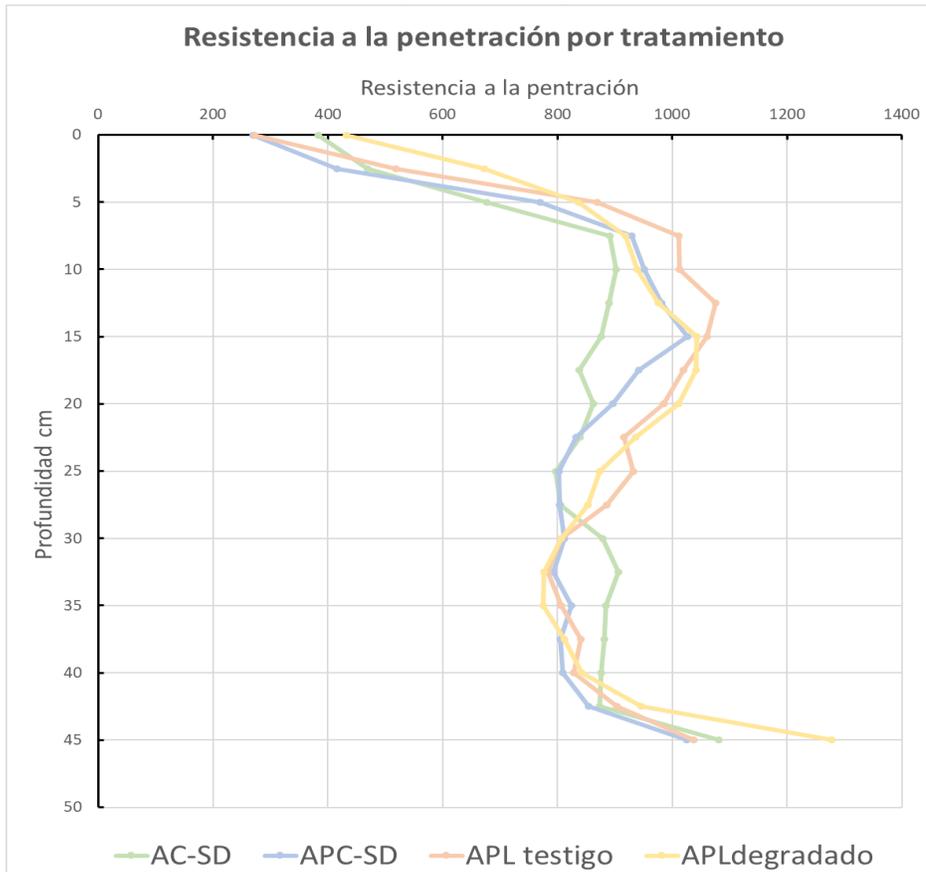
38. Hillel, D. 2004. Introduction to environmental soil physics. California, Elsevier Science. 498 p.
39. Janzen, H.; Campbell, C.; Izaurre, R.; Eller, B.; Juna, N.; McGill, W.; Zentner, R. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. Soil and Tillage Research. 47(3-4): 181 - 195.
40. Karlen, D.; Wollenhaupt, N.; Erbach, D.; Berry, E.; Swan, J.; Eash, N.; Jordahl, J. 1994. Long-term tillage effects on soil quality. Soil and Tillage Research. 32(4): 313 - 327.
41. Kemper, W. D.; Rosenau, R. C. 1986. Aggregate Stability and Size Distribution. In: Klute, A. ed. Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. Madison, ASA. pp. 425 - 442.
42. Letey, J. 1985. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. Advances in Soil Science. 1: 273 - 294.
43. Maddoni, G.; Navarrete, R. 2016. Altas temperaturas y déficit hídrico en maíz: respuestas fisiológicas y estrategias de manejo del cultivo. In: Resiliar, Congreso Aapresid (24^a, 2016, Buenos Aires). Trabajos presentados. Buenos Aires, AAPRESID. 11 p.
44. Mailhos, A.; Ramos, M. 2017. Efecto del cultivo cobertura con y sin pastoreo sobre las propiedades físicas del suelo y rendimiento de la soja posterior. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 53 p.
45. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1976. Carta de reconocimiento de Suelos del Uruguay. (en línea). Montevideo. Esc. 1:1.000.000. Color. Consultado may. 2022. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/carta-reconocimiento-suelos-del-uruguay-escala-11000000>.
46. Martínez, J. P.; Crespo, C.; Cuervo, M.; Sainz Rozas, H. R.; Echeverría, H.; Martínez, F.; Cordone, G.; Barbieri, P. 2020. Secuencias de cultivos con predominio de soja: efecto sobre indicadores de calidad física del suelo. Ciencia del suelo. 38(2): 224 - 235.

47. Martino, D. L. 2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. *In*: Díaz Rossello, R. coord. Siembra directa en el cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 225 - 257.
48. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Estadísticas Agropecuarias, UY). 2018. Encuesta agrícola "Primavera 2017". (en línea). Montevideo, MGAP. 26 p. (Serie Encuestas no. 349). Consultado 2 may. 2022. Disponible en https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/publicacion_primavera2017.pdf.
49. Molino, J. 2001. Estrés térmico por alta temperatura en soja (*Glycine max* (L.) Merr.): análisis de la dinámica de producción y fijación de vainas y su efecto sobre la determinación del rendimiento. Tesis Mag. en producción vegetal. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 79 p.
50. Pelegrin, F.; Moreno, F.; Aranda, J. M.; Fernández, J. E. 1996. Influencia del sistema de laboreo en la resistencia a la penetración y otras propiedades físicas del suelo. *Investigación agraria: Producción y protección vegetal*. 11(3): 409 - 425.
51. Perdomo, C.; Hoffman, E. 2011. Manejo del nitrógeno en maíz: actualidad y perspectivas. *In*: Simposio Nacional de Agricultura (2°. , 2011, Paysandú). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 61 - 75.
52. Ramírez, R. 1997. Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Santafé de Bogotá, Produmedios. 24 p.
53. _____; Taboada, M. A.; Gil, R. 2006. Efectos a largo plazo de la labranza convencional y la siembra directa sobre las propiedades físicas de un argiudol típico de la pampa ondulada Argentina. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 59(1): 3237 - 3256.
54. Rangeon, N. I.; Aciar, L. M.; Osinaga, R.; Arzeno, J. L.; Sánchez, C. S. F. 2008. Análisis de la resistencia a la penetración y humedad de suelo como indicadores de calidad en distintos sistemas de labranza. *In*: Congreso Argentino de la ciencia del suelo (21°. , 2008, Potrero de los Funes, Argentina). Trabajos presentados. s.n.t. 7 p.

55. Robert, M. 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. Rome, FAO. 75 p.
56. Rucks, L.; García, F.; Kaplán, A.; Ponce de León, J. 2004. Propiedades físicas del suelo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 73 p.
57. Saffih-Hdadi, K.; Mary, B. 2008. Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*. 40(3): 594 - 607.
58. Terra, J. A.; García Préchac, F. eds. 2001. Siembra directa y rotaciones forrajeras en las Lomadas del Este: síntesis 1995-2000. Montevideo, INIA. 100 p. (Serie Técnica no. 125).
59. USDA (United States Department of Agriculture). 1996. Soil Quality Resource Concerns: Compaction. (en línea). Washington. 2 p. Consultado 4 may. 2022. Disponible en https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051594.pdf.
60. Venanzi, S.; De Sa Pereira, E.; Krüger, H. 2002. La siembra directa y ganadería: efectos del pastoreo sobre la compactación a corto plazo. (en línea). Argentina, s.p. Consultado 2 may. 2022. Disponible en https://www.produccion-animal.com.ar/suelos_ganaderos/57-santi5.pdf.
61. Walkley, A.; Black, A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29 - 38.
62. Wilson, M.; Sasal, M. 2017. Aplicación de indicadores de calidad de suelo para el monitoreo agroambiental. In: Wilson, M. ed. Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina. 1ª ed. Entre Ríos, INTA. pp. 23 - 27.
63. Yoder, R. E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy*. 28(5): 337 - 351.

10 ANEXOS

Anexo No. 1. Resistencia a la penetración por tratamiento



Anexo No. 2. Significancia de los rendimientos con y sin covariable

Rendimiento	2038	2272	6425	5694
S / cov *	ns	ns	a	b
C / cov pl R3-R4 *	ns	ns	ns	ns
C/ cov pl a cosecha *	-	-	ns	ns

Anexo No.3. Precipitaciones y temperaturas promedio registradas en la EEMAC entre 09/2020 y 04/2021, y medias históricas de INUMET para Paysandu.

	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	PP acumuladas / Temp. media
Pps EEMAC (mm)	80	25	73	55	117	38	121	234	744
Pps media INUMET (°C)	91	122	118	115	100	131	147	103	927
Temp. EEMAC (°C)	14	18	22	23	25	23	21	20	21
Temp. media INUMET (°C)	15	18	20	23	25	24	22	18	20,5

Anexo No.4. Componentes rotaciones actuales.

Año	1		2		3		4		5		6	
	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I
ACSD	Maíz	Trigo	Soja2	Avena	Soja1	Avena						
APC	Maíz	Trigo	Soja2	PC	PC	PC	PC	PC				
APL test.	Maíz	Trigo	Soja2	Avena	Soja1	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL
APL deg.	Maíz	Trigo	Soja2	Avena	Soja1	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL

Anexo No.5 Tratamientos actuales y anteriores. Componentes de rotaciones anteriores.

Trat. actual	Trat. anterior	Rotaciones anteriores				
ACSD	ACSD	trigo	soja 2da	trigo	soja 2da	PL
APC	ACSDC4	trigo	sorgo	trigo	sorgo	PL
APLtestigo	APSD	trigo	soja 2da	trigo	soja 2da	PL
APLdegradado	APLCC3+	trigo	soja 2da	trigo	soja 2da	PL
	ACSDC3	trigo	soja 2da	bch	soja 1ra	

Anexo No.6. Cuadro de indicadores de rotaciones actuales y antecesoras.

	Sistema de cultivo anterior				Nuevo sistema de cultivo			
	APSD	ACSDC4	ACSD	APLCC3+ACSDC3	APLestilgo	APC	ACSD	APLdegradado
Cultivos por año	0,85	1,65	1,1	1,25	0,67	0,75	1,33	0,67
Fracción del tiempo de la rotación								
Pastura	0,500	0	0,250	0,250	0,580	0,560	0	0,580
Cultivos anuales	0,425	0,825	0,550	0,625	0,355	0,322	0,816	0,355
IUS	0,925	0,825	0,800	0,875	0,935	0,882	0,816	0,935
Barbecho	0,075	0,175	0,200	0,125	0,065	0,118	0,184	0,065
Ocurrencias respecto a la cantidad de periodo de crecimiento en la rotación								
C4	0,075	0,400	0,075	0,075	0,083	0,125	0,167	0,08
C3	0,200	0,750	0,400	0,300	0,167	0,125	0,333	0,167
Trigo, cebada o cultivo de servicio	0,150	0,350	0,075	0,250	0,167	0,125	0,500	0,167
Barbechos de invierno	0,075	0,175	0,300	0,125	0,065	0,118	0,184	0,065
Total	0,500	1,00	0,850	0,750	0,482	0,493	1,00	0,482

