



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTOR EN AGRONOMÍA

**IMPACTO DE LA ESTRUCTURACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL DEL
SUELO SOBRE LA ECONOMÍA DEL AGUA EN CULTIVOS INVERNALES
DEL SEMIÁRIDO AUSTRAL PAMPEANO**

Luciano Zubiaga

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2022

Prefacio

Esta tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Agronomía, de la Universidad Nacional del Sur (UNS) y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Campo Experimental de la Estación Agropecuaria (EEA) Hilario Ascasubi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), en establecimientos de productores del secano de los partidos de Villarino y Patagones (área de influencia de la EEA INTA H. Ascasubi) y el Departamento de Agronomía (UNS), durante el período comprendido entre el 16 de mayo de 2017 y 15 de noviembre de 2022, bajo la dirección del Dr. Juan Alberto Galantini ¹ y codirección del Dr. Miguel Ángel Cantamutto ².

¹ Comisión de Investigaciones Científicas (CIC-PBA), CERZOS (UNS-CONICET).

² EEA INTA Hilario Ascasubi.

Ing. Agr. Luciano Zubiaga



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el / / , mereciendo la calificación de (.....)

Dedicatoria

Le dedico esta tesis a mi hijo y compañera de vida, mis grandes amores,
Gabriel y Josefina.

A mis papás, grandes ejemplos y a quienes admiro, Marisa y Alberto.

Agradecimientos

A mi familia y amigos, quienes me brindaron su tiempo, amor y apoyo incondicional para crecer y ser una persona de bien.

A mis directores, Juan Galantini y Miguel Cantamutto por su invaluable ayuda, enseñanza, estímulo y por brindarme la libertad de expresar mis ideas.

A Juan Vanzolini por su amistad y por ser quien impulsó y trabajó para que tuviera la oportunidad de esta etapa profesional y laboral, acompañándome en este camino con total desinterés e integrarme en un espacio con un enfoque de trabajo en equipo.

A mis compañeros del Laboratorio de Suelos y Agua (LSA) del INTA EEA Hilario Ascasubi, Luciana Dunel, Romina Storniolo y Diego Ombrosi, por su apoyo y acompañamiento desde los muestreos hasta los análisis sin importar el tiempo, el trabajo y las distancias.

A la secretaria de dirección y a la administración del INTA EEA Hilario Ascasubi, Gisela Rodríguez, Estela Usuldinger, Marcela Castillo, Pamela Mayer y Danilo Montoya, por su paciencia y ayuda constante para que se puedan llevar adelante las actividades. Sumo a quienes emprendieron otro camino y se los extraña, Susana García, Elio Ruppel y Patricia Dumrauf.

Al personal de campo del INTA EEA Hilario Ascasubi, Adrián Logiúdice, Julián Castillo, Jorge Vera, Gustavo Lebed, Darío y Daniel Russo, Paulo Mamani, Javier y "Tati" Gristman, por facilitar y apoyar la realización de los ensayos y seguimientos en los establecimientos de productores del secano de Villarino y Patagones.

A la Asociación Cooperadora de la EEA Hilario Ascasubi (ACOOPA), Gustavo Urrutia por facilitar el espacio, las herramientas, insumos y la logística para la realización de los ensayos.

A Gustavo Zura del Departamento de agrometeorología del INTA EEA Hilario Ascasubi, por su predisposición y brindar la información meteorológica.

Al personal del Laboratorio de Semillas del INTA EEA Hilario Ascasubi a cargo de Juan Renzi, Omar Reinoso y Matías Bruna, por su apoyo en el análisis de la calidad de la semilla a sembrar cada año.

Al todo el INTA EEA Hilario Ascasubi por el agradable ambiente de trabajo y buena predisposición.

A los productores del secano de los partidos de Villarino y Patagones por su tiempo y por abrir las tranqueras de sus campos para realizar evaluaciones para la construcción en conjunto.

A la administración del Departamento de Agronomía de la UNS, a Mercedes Miller por su ayuda y apoyo para que todo se pueda presentar en tiempo y forma.

¡¡A todos muchas gracias!!

Organización de la tesis

La presente tesis intenta brindar información sobre aspectos poco conocidos en el manejo de la estructura de los rastrojos en suelos bajo labranza cero (L0) del semiárido austral pampeano, que permita evaluar el impacto y proponer una mejora en la implementación del barbecho en estos ambientes. Se realizó un análisis amplio de los agroecosistemas en lotes bajo L0 en establecimientos del secano de Villarino y Patagones; y ensayos en el campo experimental de la EEA Hilario Ascasubi. Se estudiaron varios componentes relacionados con la productividad de los cultivos de invierno implementados; la biomasa y estructura de la cobertura de los rastrojos que generan y el planteo de diferentes disposiciones del rastrojo; la dinámica del agua del suelo; el desarrollo de un prototipo de escáner de coberturas y su aplicación para la evaluación de la estructura del rastrojo. La tesis se organizó en una Introducción general, cinco Capítulos de resultados (Capítulos I a V) y, por último, un Capítulo de Discusión general y Conclusiones (Capítulo VI). Los Capítulos I, II, III, IV y V se redactaron según el siguiente esquema: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones. Al final de la tesis se encuentra toda la Bibliografía consultada y los Anexos.

En el Capítulo I se analizó el impacto de los cultivos de gramíneas invernales como antecesores en la generación de cobertura de rastrojos y el manejo del rastrojo durante el barbecho, sobre la productividad del cultivo de trigo.

En el Capítulo II, se evaluó el impacto de los antecesores y el manejo del rastrojo sobre los componentes de la interfase suelo-atmósfera y, en consecuencia, en la dinámica del agua durante el barbecho.

En el Capítulo III se desarrolló un prototipo de escáner como instrumento de medición de la estructura o tridimensionalidad de la cobertura vegetal del suelo.

En el Capítulo IV se evaluó el prototipo de escáner para determinar la estructura del rastrojo de cultivos de invierno, su relación con las variables que definen la interfase suelo-atmósfera y, en consecuencia, sobre la eficiencia de barbecho.

En el Capítulo V se evaluó la generación de cobertura y el impacto de la estructura del rastrojo de cultivos de invierno sobre la eficiencia de barbecho en lotes bajo L0 del secano de los partidos de Villarino y Patagones.

Finalmente, el Capítulo VI presenta la Discusión general, la validación de las hipótesis y las principales Conclusiones, teniendo en cuenta los resultados de los cinco Capítulos precedentes.

Índice de contenidos

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Organización de la tesis.....	v
Índice de contenidos	vii
Resumen	xiii
Abstract	xv
Lista de abreviaturas.....	xvii
Índice de tablas.....	xix
Índice de figuras	xxi
Introducción general	1
Características agroclimáticas del área de estudio.....	1
Características productivas	3
Labranza cero	5
Rastrojos de los cultivos.....	7
Problemática planteada.....	9
Hipótesis general	9
Objetivo general	9
Hipótesis y objetivos de cada capítulo.....	9
Capítulo I	12
Efecto del cultivo precedente y barbecho previo sobre la acumulación y partición de biomasa del trigo	12
Introducción	13
Materiales y Métodos.....	16
Sitio de estudio.....	16

Descripción del ensayo	16
Suelo y clima.....	19
Biomasa aérea	20
Ciclo del cultivo.....	20
Barbecho	21
Análisis estadístico.....	22
Resultados y Discusión.....	22
Condiciones agroclimáticas.....	22
Estructura del rastrojo	26
Caracterización del rastrojo de los antecesores:.....	26
Manejo del rastrojo	29
Efecto de los antecesores sobre el cultivo de trigo.....	32
Efecto aditivo de la disposición del rastrojo sobre tres años de trigo continuo.....	35
Efecto acumulado de las secuencias de antecesores y disposiciones del rastrojo sobre las condiciones de la cobertura al finalizar el barbecho	40
Conclusiones	43
Capítulo II	44
Efecto del rastrojo sobre el microclima de la interfase suelo-atmósfera y la dinámica del agua durante el barbecho*	44
Introducción	45
Materiales y Métodos.....	47
Condiciones de estudio	47
Estructura del rastrojo	48
Parámetros físicos durante el barbecho	48
Temperatura del suelo.....	48
Velocidad laminar del viento	49
Humedad del suelo.....	50
Evento de una precipitación extrema	50

Clima.....	51
Análisis estadístico.....	51
Resultados y Discusión.....	51
Estructura del rastrojo	51
Biomasa de rastrojo.....	51
Índice de área del tallo (IAT).....	53
Parámetros físicos durante el barbecho	54
Temperatura del suelo	54
Velocidad laminar del viento	57
Humedad del suelo.....	60
Eficiencia de barbecho.....	62
Dinámica del agua en el suelo: el caso de una precipitación extrema	64
Conclusiones	65
Capítulo III	67
Desarrollo de un prototipo de escáner LiDAR aplicado al análisis tridimensional de la cobertura vegetal del suelo.....	67
Introducción	68
Materiales y Métodos.....	71
Diseño técnico del prototipo	71
Pruebas experimentales.....	73
Evaluaciones.....	75
Frecuencia de muestreo y análisis de error	75
Posicionamiento del escáner	75
Influencia de la luz solar	76
Porcentaje de cobertura.....	76
Resultados y Discusión.....	76
Frecuencia de muestreo y análisis de error	76

Posicionamiento del escáner.....	77
Influencia de la luz solar.....	78
Porcentaje de cobertura.....	79
Imagen 3D de la estructura de la cobertura vegetal.....	80
Conclusiones.....	83
Capítulo IV.....	84
Aplicación del prototipo de escáner LiDAR para el análisis de la interfase suelo-atmósfera en barbecho con rastrojo de cultivos de invierno.....	84
Introducción.....	85
Materiales y Métodos.....	87
Descripción del ensayo.....	87
Evaluaciones durante el barbecho mediante métodos tradicionales.....	88
Estructura del rastrojo: altura del rastrojo, índice de área de tallo y biomasa aérea de rastrojo.....	88
Impacto de la estructura sobre parámetros físicos: temperatura del suelo, velocidad laminar del viento, humedad a la siembra y eficiencia de barbecho.....	88
Evaluaciones durante el barbecho mediante la tecnología LiDAR propuesta.....	88
Análisis estadístico.....	89
Resultados y Discusión.....	89
Modelos 3D obtenidos mediante el escáner LiDAR.....	89
Barbecho con rastrojos de antecesores (2018).....	89
Barbecho con rastrojo de trigo en tres disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo, 2019 y 2020).....	92
Relación entre el volumen aparente y las evaluaciones sobre la estructura del rastrojo (altura, biomasa y IAT) y los parámetros físicos (temperatura del suelo, velocidad laminar del viento, humedad a la siembra y eficiencia de barbecho).....	93
Altura del rastrojo.....	93
Biomasa de rastrojo.....	95
Índice de área de tallo (IAT).....	97
Temperatura del suelo.....	99

Velocidad laminar del viento	100
Humedad del suelo a la siembra.....	102
Eficiencia de barbecho.....	103
Conclusiones	106
Capítulo V	107
Eficiencia hídrica en suelos bajo labranza cero del semiárido austral pampeano	107
Introducción	108
Materiales y Métodos.....	110
Sitios de estudio.....	110
Descripción del seguimiento.....	111
Suelo y clima.....	112
Biomasa aérea durante el ciclo del cultivo.....	113
Estructura del rastrojo durante el barbecho.....	113
Análisis estadístico.....	114
Resultados y Discusión.....	114
Condiciones agroclimáticas durante los ciclos.....	114
Caracterización del rastrojo de los antecesores	116
Conclusiones	121
Capítulo VI	122
Discusión general y Conclusiones	122
Discusión general	123
Validación de las hipótesis.....	126
Conclusiones	127
Bibliografía	128
Anexos	147

Anexo 1. Calidad de la semilla y densidad de siembra.....	147
Anexo 2. Precipitaciones en sitio experimental Hilario Ascasubi	147
Anexo 3. Temperatura en sitio experimental Hilario Ascasubi	148
Anexo 4. Heladas en sitio experimental Hilario Ascasubi	150
Anexo 5. Estructura del rastrojo: Biomasa de rastrojo de trigo del Ciclo II.....	150
Anexo 6. Temperatura del suelo durante el barbecho para los antecesores del Ciclo II.....	151
Anexo 7. Velocidad laminar del viento durante el barbecho para los antecesores del Ciclo II.....	154
Anexo 8. Dinámica del nivel freático.....	155
Anexo 9. Dinámica del agua en el suelo: el caso de una precipitación extrema	158
Anexo 10. Precipitaciones en establecimientos de productores del secano de Villarino y Patagones.....	161
Anexo 11. Estadística descriptiva de las evaluaciones realizadas en lotes de productores de Villarino y Patagones	162

Resumen

El grado de cobertura del suelo y las características geométricas o estructura del rastrojo pueden impactar sobre el microclima de la interfase suelo-atmósfera e influir en la dinámica de uso del agua por los cultivos. Aunque se conoce el efecto benéfico de los rastrojos en ambientes semiáridos, aún no está claro cómo impacta la cantidad y la estructura del material vegetal muerto dispuesto sobre el suelo. El objetivo general de esta tesis fue dilucidar el modo en que los parámetros físicos de la estructura de los rastrojos impactan sobre la conservación y uso del agua y el suelo bajo labranza cero en el secano del extremo austral pampeano.

Bajo condiciones de labranza cero en secano se realizó un ensayo de rotaciones de cuatro ciclos de duración con cereales invernales y evaluaciones en 31 cultivos comerciales de cereales invernales localizados en Villarino y Patagones. En dos ciclos consecutivos de rotaciones agrícolas bianuales se evaluó el efecto combinado del rastrojo de cultivos de invierno de trigo, centeno y avena bajo tres disposiciones o arreglos espaciales; vertical (sin tocar), horizontal (rolado) y pastoreo mecánico. El centeno tuvo una altura final (> 150 cm) equivalente al doble de los otros antecesores. La biomasa de rastrojo aportada superó 8 Mg ha^{-1} en cada ciclo y fue un 20 % superior al acumulado en la secuencia de cuatro ciclos, que los otros dos antecesores (6 Mg ha^{-1}). Además, contrariamente a trigo y avena, más de la mitad de la biomasa de rastrojo de centeno se distribuyó en un estrato superior alejado del suelo. A pesar de las diferencias en el aporte y estructura de la biomasa de rastrojo de los antecesores, no se observaron diferencias en la cobertura lograda, que estuvo entre 75 y 80 % durante el período de barbecho. El pastoreo del rastrojo dejó al suelo más desnudo, debido a que se redujo aproximadamente el 50 % del aporte de biomasa. Al aplanar el rastrojo se incrementó la cobertura entre 20 y 30 %, alcanzando el abrigo casi total del suelo. Bajo esta disposición se redujo la biomasa final del barbecho, posiblemente debido a una mayor tasa de descomposición del rastrojo en mayor contacto con el suelo. La estructura de la cobertura vegetal impactó en la temperatura del suelo y la velocidad laminar del viento. La altura del rastrojo, principalmente, y la densidad de vástagos fueron determinantes del índice de área de tallo. Se observó un efecto decreciente de la temperatura del suelo y del diferencial respecto al aire (ΔT°) entre pastoreo $>$ vertical $>$ horizontal. El rastrojo horizontal redujo la temperatura del suelo entre 1 y 5 °C respecto al vertical y amortiguó el efecto de la temperatura ambiental sobre el suelo ($< \Delta T^\circ$). La reducción de la velocidad del viento en superficie fue entre 70 y 90 % para la disposición vertical, es decir, hasta 30 % mayor respecto al horizontal y pastoreo. La temperatura del suelo y la velocidad del viento mostraron correlación con la eficiencia de barbecho.

El pastoreo mostró menor eficiencia de barbecho asociado al incremento de la temperatura del suelo, que fue entre 4 y 14 °C mayor a las otras dos disposiciones y superó la temperatura ambiental (ΔT° entre 1,6 y 2). La disposición horizontal del rastrojo aumentó el almacenamiento total de agua en las capas superiores del suelo (0 – 40 cm) hasta 13 días luego de una precipitación extrema.

Se desarrolló un prototipo de escáner LiDAR a fin de parametrizar los componentes físicos de la estructura del rastrojo. Mediante el indicador volumen aparente, obtenido por este prototipo, se incorporó una nueva dimensión que describe la distribución vertical de la cobertura. Se realizaron mediciones bajo condiciones experimentales a campo que demostraron la relación del indicador volumen aparente con la eficiencia de barbecho. A partir de ello se propuso un rango de volumen aparente entre 0,025 m³ (17 cm altura, 1 Mg ha⁻¹ de biomasa del estrato superior y 0,24 de índice de área de tallo) y 0,12 m³ (40 cm de altura, 4 Mg ha⁻¹ de biomasa del estrato superior y 0,64 de índice de área de tallo) dentro del cual se observó un impacto sobre la eficiencia hídrica del barbecho.

En los cultivos comerciales se observó un predominio del trigo (80 %). La eficiencia de barbecho fue de 24 % pero no se relacionó con la cobertura del rastrojo. Si bien los niveles de biomasa (3,5 Mg ha⁻¹) y grado de cobertura (60 %) podrían ser considerados adecuados, en el 80 % de los casos la cobertura se ubicó por debajo del rango de referencia de volumen aparente, de acuerdo con las características de la estructura del rastrojo observadas.

Estos valores de referencia permitirían sentar las bases para el manejo de la estructura del cultivo, cosecha y manejo del rastrojo durante el barbecho, que definen la estructura de la cobertura vegetal que determina la conservación del agua durante el barbecho.

Abstract

The soil cover level and the geometric characteristics of the stubble structure can impact on the microclimate of the soil-atmosphere interface and may influence the dynamics of crop water use. Although the beneficial effect of stubble in semi-arid environments is known, it is still unclear how is the impact of the amount and structure of dead plant material over the soil. The general objective of this thesis was to elucidate the way in which the physical parameters of stubble structure impact on the conservation and water use economy under no-tillage in the dryland of the southern Pampean region.

Under dryland no-tillage conditions, a set of agricultural rotations comprising four successive winter cereals and evaluations on 31 commercial crops of winter cereals were carried out in Villarino and Patagones. The combined effect of three spatial arrangements of wheat, rye and oat stubble under vertical (untouched), horizontal (rolled), and mechanical grazing treatments were evaluated under. Rye had a final height (> 150 cm) equivalent to twice that of the other predecessors. The stubble biomass contributed exceeded 8 Mg ha⁻¹ in each cycle and was 20 % higher in the cumulative four-cycle sequence than the other two predecessors (6 Mg ha⁻¹). In addition, contrary to wheat and oats, more than half of the rye stubble biomass was distributed in an upper stratum away from the soil. Besides the differences in stubble biomass contribution and structure of the predecessors, no differences were observed in the cover achieved (between 75 and 80 %) during fallow. Grazing treatment left the soil nude, because near of 50 % of the total aerial biomass was removed. The stubble flattening increased the soil cover by 20 to 30 %, reaching almost a total coverage. Under this arrangement, the aerial biomass at the end of the fallow was reduced, possibly due to a higher decomposition rate of the stubble. The stubble arrangement impact on the soil temperature and laminar wind velocity. Stubble height, mainly, and stem density were determinants of stem area index. A decreasing effect of soil temperature and air temperature differential (ΔT°) was observed between grazing > vertical > horizontal. Horizontal stubble reduced soil temperature by 1 to 5 °C compared to vertical stubble and attenuated the effect of ambient soil temperature (< ΔT°). The reduction in surface wind velocity was between 70 and 90 % for the vertical arrangement, i.e. up to 30 % higher compared to horizontal and grazing. Soil temperature and wind velocity showed a correlation with fallow efficiency. Grazing showed lower fallow efficiency associated with increased soil temperature, which was between 4 and 14 °C higher than the other two arrangements and exceeded the ambient temperature (ΔT° between 1.6 and 2). The horizontal stubble arrangement increased total water storage in the upper soil layers (0 - 40 cm) for up to 13 days after extreme rainfall. A prototype LiDAR scanner was

developed to parameterize the physical components of the stubble structure. Using the apparent volume indicator, obtained by this prototype, a new dimension was incorporated, referring to the vertical distribution of the cover. Measurements of stubble structure were made under experimental field conditions and its relationship with the apparent volume indicator was demonstrated. From this, an apparent volume was proposed between 0.025 m³ (17 cm height, 1 Mg ha⁻¹ of top layer biomass and 0.24 stem area index) and 0.12 m³ (40 cm height, 4 Mg ha⁻¹ of top layer biomass and 0.64 stem area index) where the impact on the water efficiency of the fallow was observed.

A predominance of wheat (80 %) was observed in the commercial crops. Fallow efficiency was 24 % and was not related to stubble cover. Although biomass levels (3.5 Mg ha⁻¹) and level of cover (60 %) were adequate, 80 % of the covers were below the reference range of apparent volume, according to the characteristics of the stubble structure evaluated.

These reference values would provide the basis for crop structure management, harvesting, and stubble management during fallow, which define the structure of the vegetation cover that determines water conservation during fallow.

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Significado
A	Arcilla
AC	Agricultura de conservación
ACP	Análisis de componentes principales
AL1	Prueba al aire libre 1
AL2	Prueba al aire libre 2
ALTrastIB	Altura del rastrojo al inicio del barbecho
ALTVf	Altura del vástago fértil
ANOVA	Análisis de varianza
Ar	Arena
BRastFB	Biomasa residual del rastrojo al final del barbecho
Btot	Biomasa total
C	Carbono
CAD	Computer-Aided Design
CE	Conductividad eléctrica
C/N	Relación carbono nitrógeno
CNC	Computer Numerical Control
CobFB	Cobertura del suelo por el rastrojo al final del barbecho
CobIB	Cobertura del suelo por el rastrojo al inicio del barbecho
CSV	Valores Separados por Coma
Dapr	Densidad aparente de la capa del rastrojo
DDP	Días después del evento de precipitación
dv	Diámetro del vástago
DS	David Safi
DV	Darío Valdman
E	Espigazón
EB	Eficiencia de barbecho
EEA	Estación experimental agropecuaria
EI	Estrato inferior del rastrojo
ES	Estrato superior del rastrojo
EUA	Eficiencia de utilización del agua
EUAbtot	Eficiencia de uso del agua para la acumulación de biomasa seca total
EUAgr	Eficiencia de uso del agua para la acumulación de biomasa de grano
EUArast	Eficiencia de uso del agua para la acumulación de biomasa de rastrojo
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GPS	Sistema de posicionamiento global
Grano	Biomasa de grano
HM	Hugo Mendioroz
HS	Hugo Sabugo
Hv	Altura del vástago
IAT	Índice de área de tallo
IC	Índice de cosecha
IMO	Indicador de la relación entre la materia orgánica y la fracción arcilla + limo
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
L	Limo
LAT	Lámina de agua total

LATf	Lámina de agua total al finalizar el ciclo de crecimiento de los cultivos
LATi	Lámina de agua total a la siembra de los cultivos
LATstr	Lámina de agua total a la siembra del trigo
L0	Labranza cero
LC	Labranza convencional
LiDAR	Light Detection And Ranging
MF	Madurez fisiológica
MO	Materia orgánica
MP	Megapíxeles
M1	Maqueta 1
M2	Maqueta 2
N	Número de vástagos m ⁻²
ns	No significativo
Nt	Nitrógeno total
N ^o vf m ⁻²	Densidad de vástagos fértiles
PDA	Fosfato di amónico
PDB	Porfirio de Brito
Pe	Fósforo extraíble
pH	Contenido de iones hidrógeno
PLA	Ácido Poliláctico
POWER	Prediction of World Energy Resources
PP	Precipitaciones
Rastrojo	Biomasa de rastrojo
RFV	Velocidad de fricción relativa
RILSAV	Red de Laboratorios INTA de Suelos, Agua y Material Vegetal
S	Siembra
subUE	Sub-Unidad experimental
Ta	Temperatura ambiental
Ts	Temperatura del suelo
UC	Uso consuntivo
UE	Unidad experimental
Uesc	Unidad de escaneo
USB	Bus Universal en Serie
Vap	Volumen aparente
VCSEL	Láser Emisor de Superficie de Cavidad Vertical
Vv	Velocidad del viento
Vvref	Velocidad del viento de referencia
ΔT°	Relación entre la temperatura del suelo y la temperatura ambiental
ΔVv	Relación entre la velocidad del viento registrada y la velocidad de referencia

Índice de tablas

Tabla 1. Caracterización química y física del horizonte superficial de suelo (0-20 cm) del sitio experimental en la unidad de producción de la EEA INTA Hilario Ascasubi.	16
Tabla 2. Precipitaciones acumuladas durante los dos ciclos de experimentación con rotaciones agrícolas de cereales invernales del sitio experimental en la unidad de producción de la EEA INTA Hilario Ascasubi.	24
Tabla 3. Acumulación y estructura de la biomasa de los cereales antecesores del trigo en dos ciclos de evaluación.	26
Tabla 4. Indicadores de eficiencia de producción de biomasa de los antecesores del trigo.	28
Tabla 5. Trigo; caracterización de la biomasa acumulada según cultivo antecesor y disposición del rastrojo durante el barbecho.	33
Tabla 6. Indicadores de eficiencia de producción de biomasa del trigo ante diferentes antecesores y tratamientos del rastrojo durante el barbecho.	35
Tabla 7. Trigo continuo; caracterización de la biomasa acumulada con el avance de la secuencia y disposición del rastrojo en el barbecho.	36
Tabla 8. Indicadores de eficiencia de producción de biomasa del trigo ante diferentes antecesores y tratamientos del rastrojo en el barbecho.	37
Tabla 9. Análisis estadístico de las características del rastrojo (IAT) al final del barbecho previo a la siembra de trigo de tres antecesores (trigo, centeno y avena) con tres disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo) durante dos ciclos de estudio.	54
Tabla 10. Lámina de agua total (LAT) en diferentes estratos del perfil luego de la cosecha de los antecesores (trigo, centeno y avena) del trigo, para el Ciclo I y II.	61
Tabla 11. Grado de cobertura y biomasa de rastrojo en los cuatro escenarios de coberturas en M2.	79
Tabla 12. Indicadores obtenidos a partir de la nube de puntos registrados por el prototipo escáner, para caracterizar la cobertura vegetal de la porción de suelo analizada.	82
Tabla 13. Características de la estructura del rastrojo de los antecesores trigo, centeno y avena del Ciclo I. Barbecho 2018.	91
Tabla 14. Características de la estructura del rastrojo de trigo en sus disposiciones vertical, horizontal y pastoreo. Promedio de los barbechos 2019 y 2021.	93
Tabla 15. Caracterización química y física del horizonte superficial de suelo (0-20 cm) de los lotes al inicio del seguimiento en el secano de los partidos de Villarino y Patagones.	111

Tabla 16. Calidad de la semilla y densidad durante los dos ciclos de experimentación.	147
Tabla 17. Contenido de agua total (mm) en 5 estratos de suelo en función de las disposiciones y las fechas de muestreo durante el barbecho previo a la siembra del trigo del Ciclo II (2019).....	159
Tabla 18. Precipitaciones acumuladas durante los tres años de seguimiento en los sitios del secano de Villarino y Patagones, Buenos Aires.....	161
Tabla 19. Estadística descriptiva de la acumulación y estructura de la biomasa de los cultivos de gramíneas en lotes bajo labranza cero del semiárido austral pampeano, durante los años 2017, 2018 y 2019.....	162
Tabla 20. Estadística descriptiva de los indicadores de eficiencia de producción de biomasa de los cultivos de gramíneas en lotes bajo labranza cero del semiárido austral pampeano, durante los años 2017, 2018 y 2019.	162
Tabla 21. Estadística descriptiva de las características del rastrojo al final del barbecho de los cultivos de gramíneas en lotes bajo labranza cero del semiárido austral pampeano, durante los años 2017, 2018 y 2019.....	162
Tabla 22. Estadística descriptiva de la eficiencia de barbecho (EB) los cultivos de gramíneas en lotes bajo labranza cero del semiárido austral pampeano, durante los años 2017, 2018 y 2019.....	163

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio (Fuente: Google Earth y Vanzolini com. pers.).	1
Figura 2. Esquema representativo de las etapas de cada ciclo experimental (diseño bloques completos divididos).	17
Figura 3. Sub-tratamientos de estructura del rastrojo (horizontal, pastoreo y vertical) de cereales invernales durante el período de barbecho.	18
Figura 4. Análisis de componentes principales de las variables de los cultivos antecesores.	29
Figura 5. Cambios en la biomasa seca de rastrojo y en la cobertura del suelo durante el barbecho previo al cultivo de trigo, en dos ciclos de experimentación. Ciclo I (a) y Ciclo II (b).	30
Figura 6. Cambios en la biomasa seca de rastrojo y en la cobertura del suelo durante el barbecho previo al cultivo de trigo, en el primer trigo sobre trigo, segundo trigo sobre trigo y tercer trigo sobre trigo, según la disposición del rastrojo de trigo.	38
Figura 7. Análisis de componentes principales de las variables del barbecho y del cultivo de trigo.	39
Figura 8. Biomasa de rastrojo acumulada a cosecha, al inicio y fin del barbecho durante los dos ciclos estudiados para las nueve secuencias de cultivo de invierno con distinto antecesor y disposición del rastrojo.	40
Figura 9. Biomasa de rastrojo al final del barbecho, previo a la siembra de trigo del Ciclo I (a) y Ciclo II (b), aportada por los antecesores (trigo, centeno y avena) bajo tres disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo).	52
Figura 10. Composición por estrato superior (ES) e inferior (EI) de la biomasa de rastrojo al final del barbecho, aportada por los antecesores (trigo, centeno y avena) del Ciclo II bajo tres disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo).	53
Figura 11. Temperatura del suelo y ambiente (arriba) y diferencial de temperatura del suelo en relación con la temperatura ambiental (ΔT° abajo) durante el barbecho para el cultivo de trigo en tres profundidades de suelo: superficial (a y d), 5 cm (b y e) y 10 cm (c y f); bajo tres disposiciones del rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo).	56
Figura 12. Perfiles de cambios en la temperatura del suelo en relación con la temperatura ambiental a las 15:00 h (ΔT°) para las disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo) en el período de barbecho para el cultivo de trigo. Promedio de tres antecesores en el Ciclo I.	57
Figura 13. Velocidad del viento (arriba) y relación de velocidad del viento con la velocidad medida a 200 cm (ΔV_v , abajo) durante el barbecho para el cultivo de	

trigo en tres alturas: superficial (a y d), 40 cm (b y e) y 90 cm (c y f); bajo tres disposiciones del rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo). Ciclo I (2018).	59
Figura 14. Perfiles de velocidad del viento (ΔV_v = velocidad del viento en relación con la velocidad medida a 200 cm) de las tres disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo) en función de la altura respecto de la superficie del suelo. Promedio de tres fechas de medición. Ciclo I (2018).....	60
Figura 15. Eficiencia de barbecho previo a la siembra de trigo según los antecesores (trigo, centeno y avena) y las disposiciones del rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo). Ciclos I y II.....	62
Figura 16. Análisis de componentes principales de las variables de la interfase suelo-atmósfera de las disposiciones del rastrojo durante el barbecho.	63
Figura 17. Contenido de agua (mm) en los primeros 10 cm de suelo durante el barbecho previo a la siembra del trigo del Ciclo II (2019).....	64
Figura 18. Vista superior del sistema CoreXY para el accionamiento del sensor.....	72
Figura 19. Maqueta representando una porción de suelo con rastrojo de trigo.	74
Figura 20. Microparcela de rastrojo de trigo en el Departamento de Agronomía de la UNS, Bahía Blanca.....	75
Figura 21. Altura mínima (a) y máxima (b) obtenida a partir del submuestreo del modelo de la M1.	77
Figura 22. Difuminación del modelo escaneado en función de la altura de escaneo... 78	
Figura 23. Valores de distancias registrados por el sensor láser al realizar la medición con y sin presencia de luz solar.....	78
Figura 24. Fotografías (izquierda) y resultado del análisis con el programa Cobcalv (derecha) en los cuatro escenarios de cobertura de suelo (de arriba hacia abajo).	80
Figura 25. Representación gráfica 3D generada a partir de la medición con el escáner sobre la microparcela (AL2, a) y la maqueta (M1, b) con rastrojo de trigo.	81
Figura 26. Modelo 3D (izquierda) e imagen equivalente observada desde un plano paralelo a la superficie del suelo (derecha) de la disposición vertical del rastrojo de los antecesores trigo (a), centeno (b) y avena (c) durante el barbecho 2018.	90
Figura 27. Imágenes de las disposiciones vertical, pastoreo y horizontal (de izquierda a derecha) del rastrojo de trigo durante el barbecho 2020. Modelo 3D, imagen equivalente observada desde un plano paralelo a la superficie del suelo y la sección transversal normalizada (de arriba hacia abajo).	92
Figura 28. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y la altura del rastrojo de los antecesores trigo, centeno y avena. Barbecho 2018.	94

Figura 29. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y la altura del rastrojo de trigo en los tres períodos de barbecho (2018, 2019 y 2020).	95
Figura 30. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y el peso de la biomasa total del rastrojo de trigo en los tres períodos de barbecho (2018, 2019 y 2020), excluyendo la disposición horizontal.	96
Figura 31. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y la biomasa del estrato superior del rastrojo de trigo en los tres períodos de barbecho (2018, 2019 y 2020).	97
Figura 32. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y el índice de área de tallo (IAT) del rastrojo de los antecesores trigo, centeno y avena. Barbecho 2018.	98
Figura 33. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y el índice de área de tallo (IAT) del rastrojo de trigo en los tres períodos de barbecho (2018, 2019 y 2020).	99
Figura 34. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y el ΔT° (temperatura del suelo / temperatura ambiental) a nivel de superficie del suelo (a) y a 5 cm (b), en las disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo) del rastrojo del cultivo de trigo. Barbecho 2019.	100
Figura 35. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y el ΔVv (velocidad del viento registrada / velocidad de referencia a 2 m de altura) a nivel de superficie (a) y a 40 cm (b) del suelo, en las disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo) del rastrojo del cultivo de trigo. Barbecho 2019.	101
Figura 36. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y la humedad gravimétrica (HG) a la siembra del antecesor trigo y el cultivo de trigo del Ciclo II (2019 y 2020) a 0-10 (a) y 10-20 (b) cm, en las disposiciones horizontal, vertical y pastoreo del rastrojo de trigo.	103
Figura 37. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y la eficiencia de barbecho (EB), en las disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo) del rastrojo del trigo Ciclo I y el antecesor trigo del Ciclo II. Barbecho 2019 y 2020.	104
Figura 38. Localización geográfica de los sitios de estudio.	110
Figura 39. Se ejemplifica un lote (productor DS) con los tres puntos georreferenciados (pinches amarillos) como centro del area de muestreo (circulo azul).	112
Figura 40. Probabilidad de ocurrencia de precipitaciones para el acumulado anual (a), durante el barbecho (b) y el ciclo del cultivo (c) a partir del promedio histórico de los productores evaluados. Además, se incluye el acumulado en los tres períodos de los años evaluados.	115

Figura 41. Relación entre biomasa superficial de rastrojo y cobertura de suelos en los sitios evaluados (n=105).....	119
Figura 42. Relación entre las características de la estructura del rastrojo (altura, biomasa de rastrojo e índice de área de tallo) evaluadas en lotes de productores del secano de Villarino y Patagones.....	120
Figura 43. Análisis de componentes principales de las variables del barbecho de los cultivos invernales del secano de los partidos de Villarino y Patagones.	121
Figura 44. Distribución de la precipitación mensual (mm) para cada año, del promedio del período de experimentación y del promedio histórico para la serie 1966-2021 (Zura, Dpto. Agrometeorología, INTA EEA Hilario Ascasubi).....	148
Figura 45. Distribución de la temperatura mensual (°C) máxima (a), mínima (b) y media (c) para los 5 años y el promedio del período de experimentación, y el promedio histórico para la serie 1966-2021 (Zura, Dpto. Agrometeorología, INTA EEA Hilario Ascasubi).	149
Figura 46. Número de heladas a 5 (a) y 150 (b) cm sobre el nivel del suelo para los 5 años, en el promedio del período de experimento y en el promedio histórico para la serie 1966-2021 (Zura, Dpto. Agrometeorología, INTA EEA Hilario Ascasubi).	150
Figura 47. Biomasa de rastrojo total al final del barbecho del rastrojo de trigo con sus composiciones en estrato superior e inferior. Ciclo II.....	151
Figura 48. Temperatura del suelo y ambiente (arriba) y ΔT° (temperatura del suelo en relación con la temperatura ambiental, abajo) durante el barbecho para los antecesores del Ciclo II en tres profundidades de suelo: superficial (a y d), 5 cm (b y e) y 10 cm (c y f); bajo tres disposiciones del rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo).	153
Figura 49. Perfiles de ΔT° (temperatura del suelo en relación con la temperatura ambiental a las 15:00 h) de las disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo) durante el período de barbecho para los antecesores del Ciclo II. Ciclo I (2019).....	154
Figura 50. Perfiles de velocidad del viento (ΔV_v = velocidad del viento en relación con la velocidad de referencia a 200 cm) de las disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo) en función de la altura respecto de la superficie del suelo.	155
Figura 51. Nivel freático en 4 freatómetros (F1 al F4) y precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo de trigo. El nivel "0" se refiere a la superficie del suelo.....	157
Figura 52. Lámina de agua total (mm) promedio entre 2017-2020, a la siembra (a) y cosecha (b) del cultivo de trigo en función de la profundidad del suelo.....	158

Figura 53. Lámina de agua total (LAT) de las disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo), en función de los días después del evento de precipitación (DDP) para la profundidad de 0-10 (a), 10-20 (b) y 20-40 (c). 160

Introducción general

Características agroclimáticas del área de estudio

El semiárido austral pampeano, donde se realizó el estudio, se encuentra localizado en los límites políticos de los partidos de Villarino y Patagones, hacia el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1). Hacia el norte limita con Bahía Blanca, Tornquist y Puán (provincia de Buenos Aires), al oeste con los Departamentos de Caleu Caleu (provincia de La Pampa), Pichi Mahuida, Conesa y Adolfo Alsina (provincia de Río Negro) y al este y sur con el Mar Argentino. El semiárido austral pampeano, integra la región del sudoeste de la provincia de Buenos Aires (SOB; Schroeder & Formiga, 2011).

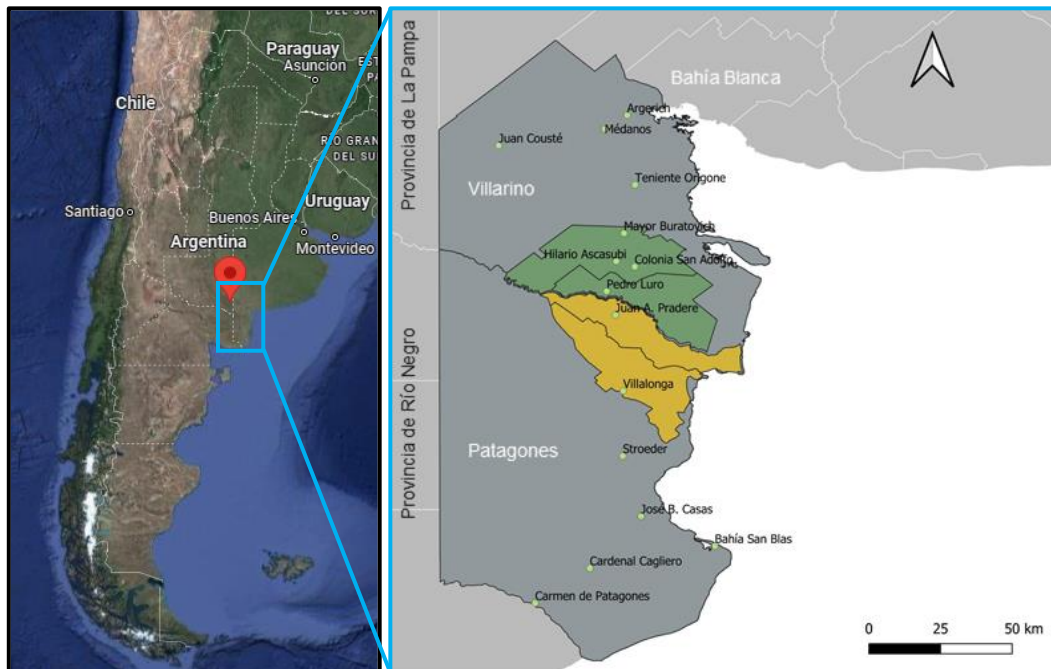


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio (Fuente: Google Earth y Vanzolini com. pers.).

Villarino, con 1.140.000 ha, y Patagones, con 1.360.000 ha, son los partidos más extensos de la provincia. El río Colorado, de régimen nival que nace en la Cordillera de los Andes, es el límite natural entre ellos. Este río permitió el desarrollo de un área de riego artificial, hacia ambos márgenes, que potencia el perfil agropecuario del territorio.

En el semiárido austral pampeano pueden identificarse tres zonas bien definidas: el área de secano de Villarino, atravesada por dos cordones medanosos; el área bajo riego del valle bonaerense del río Colorado, conformada por la superficie de ambos distritos; y el

área de secano de Patagones, subdividida longitudinalmente por la Ruta Nacional 3 en una sub-área cultivada costera, hacia el este y otra sub-área hacia el oeste con mayor presencia del monte nativo.

El área de riego comprende una superficie aproximada de 500.000 ha, distribuidas hacia ambos márgenes del río Colorado: 200.000 ha en Patagones y 300.000 ha en Villarino. Esta zona cuenta con campos mixtos de secano y riego, es decir solo el 25 % de la superficie total se encuentran empadronadas para concesión de riego complementario. La mayor parte de la superficie se encuentra bajo condiciones de secano, donde el principal aporte de agua al sistema son las precipitaciones, y existe un nivel freático poco profundo, que puede ser una fuente subterránea de este recurso (Sánchez *et al.*, 1998).

Climáticamente se trata de una región semiárida y según la clasificación de Köppen el área de estudio se clasifica como árido estepario. La temperatura media anual varía entre 14,0 y 18,0 °C, con registros extremos de 1,6 °C de temperatura media mínima para julio y 30,0 °C de temperatura media máxima para el mes de enero; presentando una relación inversamente proporcional con el aumento de la latitud. Debido a la fuerte influencia marítima, el período anual libre de heladas es superior a 240 días en el este del territorio. Este valor se reduce a menos de 220 días hacia el Meridiano V, donde las condiciones son marcadamente continentales (Sánchez *et al.*, 1998).

La mayor ocurrencia de precipitaciones se produce entre los meses de febrero-marzo y septiembre-octubre, mientras que los menores registros pluviométricos ocurren en junio-julio. La precipitación total anual varía en dirección NE-SO, entre las isohietas de 600 mm al norte del partido de Villarino y 350 mm al sur en el partido de Patagones (Pérez *et al.*, 2003). Esto se refleja en una progresiva aridez que alcanza rasgos netamente patagónicos en las proximidades del río Negro. En promedio se estima que el déficit hídrico anual en Hilario Ascasubi es de 322 mm (Sánchez *et al.*, 1998). Algunos sectores del sudeste de las planicies están beneficiados por la influencia marítima que aminora el déficit hídrico (Bohn *et al.*, 2014). Por lo tanto, la escasez y variabilidad en la cantidad y distribución de las lluvias es un factor limitante clave en la producción agropecuaria.

Los vientos predominantes son del cuadrante noroeste en otoño e invierno, mientras que en primavera se reduce la influencia de los vientos del oeste para comenzar a tener un predominio del sudeste al nordeste en verano (Sánchez *et al.*, 1998). Se trata de una región ventosa que por la predominancia de los suelos de textura gruesa presenta un

escenario propenso a la erosión eólica, intensificada en los períodos de sequía al disminuir la presencia de cobertura vegetal natural. Las estimaciones del riesgo de erosión eólica, mediante modelos que utilizan el índice de erodabilidad del suelo por un factor climático, equivalen a valores en categoría moderada ($31,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y muy alta ($104,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en Villarino y Patagones, respectivamente; siendo los más elevados dentro de la región del SOB (Silenzi *et al.*, 2011; Silenzi *et al.*, 2012). Además, sus efectos nocivos se hacen sentir particularmente en las regiones áridas y semiáridas, porque contribuye a aumentar la evapotranspiración. Estos vientos son continentales secos y determinan situaciones de estrés hídrico sobre todo en los meses de verano.

La región presenta condiciones geomorfológicas homogéneas con planicies sólo interrumpidas por suaves ondulaciones medanosas o calcáreas. Los suelos son predominantemente Molisoles, que se caracterizan por tener un horizonte superficial muy oscuro, relativamente fértil, profundo y rico en bases, y Entisoles, caracterizados por una evolución incipiente lo que les impide la existencia de horizontes genéticos (Sánchez *et al.*, 1998; Soil Survey Staff, 2022). Debido al régimen pluviométrico escaso y variable, el desarrollo de los suelos es relativamente escaso en términos de horizontes o estratos componentes de un perfil y de contenido de nutrientes. También existe abundante presencia de carbonato de calcio, lo cual muestra la historia de la escasa precipitación y baja temperatura promedio en la que fue concebido (Sánchez, 2011).

En general predominan suelos Haplustoles y Calciustoles con textura franco-arenosa, muy sueltos, de escasa diferenciación entre horizontes, susceptibles a la erosión hídrica y eólica (Sánchez *et al.*, 1998; Soil Survey Staff, 2022). Los niveles de materia orgánica en promedio se encuentran cercanos a 10 g kg^{-1} y rara vez superan valores de 20 g kg^{-1} . Los niveles de fósforo disponible (Bray & Kurtz, 1945) oscilan entre 5 y 30 mg kg^{-1} , aunque en áreas de monte nativo estos valores podrían superar los 50 mg kg^{-1} . En los últimos años se ha observado niveles bajos o limitantes para la normal producción, inferiores al rango umbral de suficiencia de este nutriente para el trigo ($15 - 20 \text{ mg kg}^{-1}$; Hanway & Olson, 1980; Fernández López & Mendoza, 2008).

Características productivas

En el semiárido austral pampeano se comienza a esbozar la meseta patagónica cortada por los ríos Colorado y Negro (Capelli de Steffens & Campo, 1994). Desde el punto de vista fitogeográfico, el partido de Villarino está ubicado en la provincia del Espinal (distrito del Caldén) y Patagones en la provincia del Monte (Cabrera, 1951).

La ocupación, construcción y apropiación de esta área fue el resultado de un proceso que se manifestó en toda la región pampeana, pero a diferencia de esta amplia región dominada por pastizales naturales y un clima benigno para la producción agrícola, el área de estudio se caracteriza por la fragilidad natural (Gabella, 2014). Es decir, desde el punto de vista climático y edáfico se trata de una región transicional sujeta a una alta fragilidad, protagonizada por intensas sequías, heladas y fuertes vientos, que además se asocia a este escenario una marcada actividad antrópica (Sánchez *et al.*, 1998; Pezzola *et al.*, 2010).

El avance de la frontera agrícola en este espacio no solo implicó un cambio productivo, sino que también generó modificaciones en las redes sociales y en las configuraciones territoriales. La incorporación de grandes extensiones de tierras a las nuevas lógicas productivas fue posible mediante la deforestación del monte nativo. Allí se desarrolló una agricultura no sostenible, con métodos y técnicas altamente agresivas con el entorno (Gabella *et al.*, 2013). En los últimos 30 años se ha perdido aproximadamente el 60 % de la superficie con monte nativo, asociada al desmonte de esas tierras para su explotación agrícola principalmente mediante la realización de cultivos anuales con un alto grado de laboreo (Winschel, 2017). La degradación producto de la tala desmedida del monte, incendio de los campos, quema de los rastrojos, sobrepastoreo, monocultivo, actividad agrícola en tierras no aptas para tal fin y labranzas inadecuadas, se vio acelerada por un largo período de sequía registrado entre los años 2005 y 2009, que desencadenó un proceso de erosión eólica, encaminado hacia a la desertificación (Iurman, 2009; Pezzola *et al.*, 2010).

El uso del suelo en el secano está destinado a explotaciones mixtas, dedicada a la agricultura centrada en trigo y la ganadería tradicional basada principalmente en verdeos invernales. El trigo, que predomina en el norte de Villarino y en el este de Patagones, llegó a ocupar más del 30 % de la superficie de los suelos marginalmente aptos para la agricultura, estimada en poco más de un millón de ha (Cantamutto *et al.*, 2016). Entre 1970 y 2008, la superficie sembrada con trigo fue en promedio 200.000 ha (entre 160.000 y 250.000 ha) y 125.000 ha (entre 70.000 y 125.000 ha) en Patagones y Villarino, respectivamente. Luego de la sequía del 2008/09, ocurrió una fuerte reducción de la superficie destinada al cultivo de trigo equivalente al 60 % del promedio 1970-2008 (www.siiia.gob.ar). Si bien este cultivo representa la mayor área cultivada en ambos partidos, en los últimos años se ha continuado el proceso de reducción, estimándose

actualmente una ocupación de 40.000 ha (30.000 ha en Patagones y 10.000 ha en Villarino; Aldana Ferradas, com. pers.).

La participación del área de riego en la superficie dedicada a trigo se encuentra poco por encima de 10.000 ha, donde el 40 % se realiza sin riego complementario (Lucanera *et al.*, 2020).

La producción de trigo posee características distintivas que lo posicionan como una actividad de riesgo. Además de la variabilidad climática se le suman las limitadas tecnologías aplicadas en el cultivo que dificultan las posibilidades de lograr buenos resultados. Tradicionalmente se realiza sobre lotes con varios años de historia agrícola, generalmente sin o con escaso uso de fertilizantes y con labranza convencional (LC). El rendimiento promedio del trigo ronda los 1,1 Mg ha⁻¹. Por lo tanto, frecuentemente el trigo está vinculado con procesos de erosión y degradación de las propiedades del suelo.

Los suelos en los que se ha generalizado la agricultura de secano en las planicies son predominantemente Entisoles, de baja productividad. Estos suelos se clasifican con muy baja a ninguna aptitud agrícola, donde el laboreo debe ser muy esporádico y sólo bajo prácticas muy especializadas orientadas hacia la agricultura de conservación (AC). A pesar de esto, en su mayoría, la agricultura se realiza bajo el sistema de LC, observándose hasta tres laboreos de suelo para la preparación de la cama de siembra con el objetivo del control de malezas y liberación de nutrientes. En los últimos años, algunos productores han reemplazado alguna de estas labores con el control químico total. En estos ambientes resultan indispensables aquellas prácticas como el barbecho para acumular humedad en el suelo (Agamenonni *et al.*, 1994).

Labranza cero

La labranza cero (L0) es una práctica de siembra de cultivo mediante el mínimo movimiento del suelo para garantizar un buen establecimiento a este (Derpsch *et al.*, 2014). El principal objetivo es conservar o mantener los rastrojos en superficie y constituye el concepto central de la AC (Dumanski & Peiretti, 2013; Pitterkow *et al.*, 2015). Por lo tanto, la L0 aparece como una alternativa promisoriosa para la conservación de los recursos naturales y el mejoramiento de la producción agropecuaria, siendo una tecnología ampliamente promovida y adoptada en todo el mundo (Triplett & Dick, 2008).

La L0 se promueve para reducir la erosión, secuestrar carbono, mejorar la calidad del suelo y productividad sostenida de los cultivos (Lal, 2004b; Verhulst *et al.*, 2010; Pittelkow *et al.*, 2015). En los últimos años ha ocurrido un gran incremento del área bajo L0, con su adopción cercana al 10 % del área cultivable global (Kassam *et al.*, 2014; FAO, 2017b). Actualmente la L0 se implementa en más de 100 millones de hectáreas en todo el mundo (Derpsch & Friedrich, 2009).

En Argentina la L0 ha llegado a superar los 30 millones de ha y, en los últimos 10 años, con valores de adopción constantes por encima del 90 % de la superficie agrícola nacional (AAPRESID, 2019; Leyes, 2021). Inicialmente adoptada en la Pampa Húmeda, en los últimos años la L0 se ha expandido hacia la zona subhúmeda y semiárida del SOB (Schmidt & Amiotti, 2015; Zilio, 2015). En estos ambientes, la adopción masiva de la L0 se ha debido a mayores rendimientos y la posibilidad de incorporar áreas con mayores limitaciones para la producción agrícola (Derpsch *et al.*, 2010).

En el semiárido austral pampeano la L0 se introdujo a finales de los noventa, demostrando que resolvía el problema de la erosión del suelo (Iurman, 2009). Debido a la mejora en la acumulación de humedad del suelo, mostró rendimientos similares y/o superiores, con respecto a la LC (Kruger *et al.*, 2005). En el momento de mayor crecimiento fue adoptado por más de una decena de productores durante un ciclo húmedo entre los años 2000 y 2005. Es así como en 2004 se conformó un grupo de ocho productores en el marco del programa Cambio Rural del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en la localidad de Stroeder, área de influencia de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Hilario Ascasubi. Principalmente motivados en abordar los problemas de erosión eólica, degradación química de los suelos y la dificultad de adaptación de la L0 a la zona debido a la escasa información y conocimiento sobre esta tecnología. Actualmente, la L0 no es una práctica adoptada, lo que se asocia principalmente a la falta de incentivos económicos y los costos extras que esta práctica demanda mediante la mayor dependencia de fertilizantes y uso de herbicidas versus la LC (Iurman, 2009).

Numerosos trabajos demuestran los beneficios de implementar la L0, mediante la cobertura del suelo con rastrojos, al controlar la erosión y aumentar la infiltración y conservación del agua (Six *et al.*, 2004; Hobbs *et al.*, 2008; Montgomery, 2008; Verhulst *et al.*, 2010; FAO, 2012; van Kessel *et al.*, 2013). Sin embargo, a nivel local, si bien se mencionan que este sistema de labranza se encuentra en evaluación (Iurman *et al.*, 2010), no existen muchos trabajos locales que lo han realizado (Agamenonni *et al.*,

2012) y, además, son muy pocos los productores que la implementan actualmente. Por lo tanto, para la correcta toma de decisiones en el manejo de suelos bajo L0, es necesario ampliar las investigaciones sobre este sistema en suelos del semiárido austral pampeano si se pretende optimizar el funcionamiento de esta herramienta tecnológica en la zona.

Rastrojos de los cultivos

Los rastrojos son aquellos materiales vegetales remanentes de la cosecha del grano de los cultivos, sin un valor económico apreciable (Pedreño *et al.*, 2008; Stockmann *et al.*, 2013). Las prácticas de manejo, como por ejemplo la labranza, poseen una gran influencia en la dinámica de la cobertura vegetal del suelo con rastrojos durante el barbecho y el ciclo del cultivo (Franzluebbers, 2002). Se entiende por dinámica de la cobertura a los cambios en la producción total, el aporte de biomasa y la composición o estructura de los rastrojos, expresada durante el barbecho y en los ciclos posteriores en el caso de L0 continua. En sistemas de L0, la cobertura del suelo posee un papel fundamental y los beneficios dependen del tipo y cantidad de rastrojos (Ségui *et al.*, 2006; Derpsch, 2007; Govaerts *et al.*, 2009; Derpsch *et al.*, 2014). Aquellos suelos sin cobertura son propensos a la pérdida de estructura, desprendimiento de partículas, sellado de la superficie, formación de costras y compactación (Blanco-Canqui & Lal, 2009).

La estructura del rastrojo se define por el factor de silueta o índice de área de tallo (IAT, en inglés *stem area index*, SAI), compuesto por la altura, diámetro y número de vástagos o tallos por unidad de superficie. Asimismo, esta estructura se encuentra afectada por la disposición u orientación del rastrojo, es decir, sea de manera horizontal y/o vertical. En consecuencia, define el microclima de la interfase suelo-atmósfera mediante el grado de exposición o pérdida potencial del suelo por la acción del viento y el potencial de evaporación (Aase & Siddoway, 1980; Hammel 1996; McMaster *et al.*, 2000; Sharrat, 2002; Flerchinger *et al.*, 2003; Passioura & Angus, 2010; Swella *et al.*, 2015).

Bajo L0 los rastrojos permanecen en superficie y regulan la interfase suelo-atmósfera. La misma se define como la capa superior del suelo, que incluye parte o la totalidad del horizonte A y los elementos que constituyen la cobertura superficial. Esta zona de contacto entre el suelo y la atmósfera es el lugar donde ocurren la mayor parte de los procesos relacionados con el manejo y la productividad del suelo (Steiner & Schomberg, 1996; Kruger *et al.*, 2014). En L0, la interfase suelo-atmósfera presenta una mayor

complejidad que en LC, dado que está constituida por diferentes estratos de rastrojos y otros elementos como el mantillo, los bioporos y el tramado de raíces. La importancia de la interfase es que regula aquellos factores que intervienen en la dinámica del agua (Kruger & Quiroga, 2013).

La secuencia de cultivos juega un rol importante en la dinámica de los rastrojos en L0 (Araus *et al.*, 2002; Derpsch *et al.*, 2014; Forjan & Manso, 2018). A partir de la aparición de la L0 en el sector subhúmedo del austral pampeano se generalizó un sistema de agricultura permanente o al menos continuada durante períodos prolongados, muchas veces asociada al monocultivo (Loewy, 2005). Según Glave (1982, 1983) este sistema representó la única posibilidad de permitir que el suelo esté disponible para alargar el ciclo agrícola, sin el consiguiente deterioro de la estructura y la fertilidad. Además, se consideró indispensable implementar el barbecho estival bajo cubierta de rastrojo, para asegurar y aumentar los rendimientos, y el químico, para controlar la maleza y conservar la humedad en el suelo (Glave, 1979a). Ambos barbechos con implicancias en la reducción de las pérdidas de suelo por voladuras (Glave, 1979b).

En el extremo austral se realiza tradicionalmente el monocultivo de trigo en una rotación corta donde se alterna con un año de descanso, y generalmente se sobrepastorean los rastrojos (Iurman, 2009). Sobreviene a este problema la denudación del suelo, desagregación de las partículas por el pisoteo de los animales y comienza a generalizarse la erosión del suelo.

Los rastrojos de los cultivos suelen dejarse intactos y en pie, para proteger al suelo del viento (Siddoway, 1970) y conservar el agua (Kozak *et al.*, 2007b). Los rastrojos aíslan la superficie del suelo de la energía radiante y advectiva, reduciendo la evaporación hacia la atmósfera como respuesta del déficit de agua del aire, antes, durante y después de la siembra del cultivo (Russel, 1939; Willis, 1962; Unger & Parker, 1976; Villablobos & Fereres, 1990; Aiken *et al.*, 1997; Sauer *et al.*, 1998).

El efecto combinado de la altura, el diámetro y el número de tallos por unidad de superficie determinan la eficacia de los rastrojos para reducir la velocidad del viento y el potencial de evaporación (Hammel, 1996; McMaster *et al.*, 2000). La radiación solar, la velocidad del viento y el flujo de evaporación en la superficie del suelo podrían verse modificados por la altura del rastrojo de trigo. Los rastrojos principalmente verticales tienen un impacto diferente al de los rastrojos que son principalmente horizontales (Cutforth & McConkey, 1997; Sharratt, 2002). Según Flerchinger *et al.* (2003) los suelos

cubiertos con rastrojos verticales tienen albedo más bajo, absorben más radiación solar que los rastrojos planos y son más eficientes para atrapar y retener el calor que el suelo desnudo. Estos autores observaron que el rastrojo de trigo plano presentó la menor evaporación en comparación con el rastrojo en pie.

Problemática planteada

Para detener los procesos de degradación de los suelos en el semiárido del extremo austral pampeano resulta crucial conocer el impacto de los cultivos aportantes de cobertura vegetal muerta en el barbecho, tanto sobre la disminución de los riesgos a erosión como en la mejora en el uso del agua. La implementación de técnicas que mejoren la eficiencia de uso del agua podría contribuir a disminuir la variabilidad del rendimiento de los cultivos y facilitar el empleo de técnicas menos extractivas. Dada la importancia de los rastrojos para el manejo bajo L0, se requiere mayor conocimiento sobre la generación de cobertura, así como su composición o estructura y su efecto sobre aquellos factores que regulan la dinámica del agua en la interfase suelo-atmósfera. De esta manera, entender los efectos de la cantidad y estructura de los rastrojos puede ayudar a tomar decisiones de manejo más adecuadas en ambientes semiáridos.

Hipótesis general

La gestión de la cobertura del suelo mediante el rastrojo de cultivos de invierno tendrá un impacto distinto sobre la dinámica del agua dependiendo de las condiciones edafoclimáticas y las características físicas de la estructura del rastrojo.

Objetivo general

Analizar los parámetros edafoclimáticos y físicos de la estructura de los rastrojos que impactan sobre la conservación del agua en suelos bajo labranza cero, con el propósito de generar conocimiento que permita comprender los procesos que intervienen sobre la dinámica del agua en las producciones vegetales del secano del extremo austral pampeano.

Hipótesis y objetivos de cada capítulo

Capítulo I

- Hipótesis:

Los cultivos de invierno antecesores y la disposición de su rastrojo durante el barbecho,

difieren en el aporte de biomasa y grado de cobertura al suelo y, en consecuencia, condicionan la productividad del trigo.

- *Objetivo:*

Evaluar la generación y caracterizar la cobertura del suelo por el rastrojo del trigo, centeno y avena en el período de barbecho, y su efecto sobre la productividad del trigo subsiguiente.

Capítulo II

- *Hipótesis:*

El cereal antecesor y la disposición de los residuos vegetales determinan la estructura del rastrojo, modificando la incidencia de la temperatura y el viento y, en consecuencia, el contenido de agua edáfica durante el barbecho para el cultivo de trigo.

- *Objetivo:*

Evaluar el impacto de tres cultivos antecesores y los cambios en la disposición de los residuos vegetales sobre los componentes estructurales de la cobertura del suelo con rastrojo durante el barbecho para trigo y su efecto sobre la temperatura y el viento en la interfase suelo-atmósfera, y en el contenido de agua edáfica durante el barbecho.

Capítulo III

- *Hipótesis:*

Es factible desarrollar una metodología de medición de la cobertura vegetal del suelo en tres dimensiones incorporando, a la descripción bidimensional, la escala vertical de la distribución de la cobertura del suelo.

- *Objetivo:*

Desarrollar y evaluar un prototipo como instrumento de medición y análisis de la estructura tridimensional de la cobertura vegetal senescente del suelo.

Capítulo IV

- *Hipótesis:*

El volumen aparente obtenido mediante el prototipo de escáner LiDAR permite estimar la estructura del rastrojo de cultivos de invierno y eso se refleja en el microclima de la interfase suelo-atmósfera que modifica el contenido de agua del suelo.

- *Objetivo:*

Determinar la factibilidad de estimar las características biofísicas del rastrojo de cultivos de invierno a partir del volumen aparente como indicador obtenido con el prototipo de

escáner LiDAR y establecer su relación con la temperatura del suelo, la velocidad laminar del viento, la humedad y la eficiencia de barbecho.

Capítulo V

- Hipótesis:

Los cultivos de invierno bajo labranza cero pueden alcanzar adecuados niveles de cobertura de suelo, pero dada las características de la estructura del rastrojo, no son suficientes para generar un impacto sobre la conservación del agua durante el barbecho.

- Objetivo:

Evaluar la generación de cobertura de rastrojos de cultivos de invierno y el impacto de la estructura del rastrojo sobre la eficiencia de barbecho en lotes de establecimientos agropecuarios bajo labranza cero en el semiárido austral pampeano.

Capítulo I

Efecto del cultivo precedente y barbecho previo sobre la acumulación y partición de biomasa del trigo

Introducción

En las regiones semiáridas, el comportamiento de los cultivos se encuentra fuertemente condicionado por la cantidad y distribución de las precipitaciones, la ocurrencia de sequías y temperaturas extremas (Fisher & Turner, 1978). En el secano semiárido, las precipitaciones generalmente no cubren los requerimientos de uso consuntivo de los cultivos (Quiroga *et al.*, 2007; Passioura & Angus, 2010; Bono *et al.*, 2017). Las prácticas de manejo del suelo y el empleo de especies eficientes en el aprovechamiento de agua pueden aumentar la viabilidad de los cultivos (Passioura, 1977; Sadras & Angus, 2006; Imaz *et al.*, 2010). El constante desafío tecnológico es dilucidar el modo en que el clima, el suelo, la genética y el manejo cultural, pueden ser combinados para maximizar la eficiencia de uso del agua (EUA) por parte de los cultivos.

Las condicionantes edafoclimáticas del semiárido austral pampeano determinan que la agricultura local se centre en algunos pocos cultivos invernales (Casagrande & Vergara, 1996; Sánchez *et al.*, 1998). Ello se debe a que el *período crítico* para la determinación del rendimiento de los cultivos invernales transcurre durante la primavera, cuando el balance de precipitaciones / evapotranspiración suele ser más favorable. Los cultivos utilizados son cebada, avena, centeno y trigo, que es la alternativa más adoptada.

Los determinantes fisiológicos de la especie cultivada y la estructura vegetal del órgano que se cosecha impactan sobre la eficiencia de uso del agua. La EUA es mayor en los cultivos de forrajes que en los cultivos de grano. Por ello, la inclusión de forrajeras en las rotaciones agrícolas puede mejorar la EUA global de los sistemas de producción (Fraschina *et al.*, 2003, Noellemeyer *et al.*, 2013).

En cuanto a la disponibilidad de buenos genotipos, las regiones semiáridas se encuentran en desventaja respecto a las húmedas. Ello es debido a que el mejoramiento genético de los cultivos se ha focalizado en captar el alto potencial de rinde de las regiones más favorecidas. Los cultivares mejorados para ambientes de alto potencial generalmente presentan una mejora del índice de cosecha (IC), debido al aumento en la fracción vegetal cosechada (Satorre, 2003; Scianca, 2010). Sin embargo, este rasgo fisiológico, de alto valor productivo, atenta contra una buena contribución a la cobertura del suelo mediante el rastrojo remanente luego de su cultivo (Zhang *et al.*, 2010).

En el extremo sur de la región pampeana, la rotación de cultivos generalmente se ajusta a una secuencia corta en la que se alterna el cultivo de trigo, que es seguido de un año de descanso. Luego de ello se repite la secuencia: trigo - rastrojo - trigo. En algunos

casos suele incluirse un verdeo de invierno, quedando definida como trigo - rastrojo - verdeo (Iurman, 2009).

En la planificación de una rotación agrícola, resulta conveniente considerar el aporte total y calidad de rastrojo de los cultivos que la integran (Campbell *et al.*, 1995; Casas, 2006; Forjan & Manso, 2018). Las gramíneas invernales aportan un buen volumen de residuos vegetales, que por su alta relación C/N dan lugar a perdurables coberturas de suelo (Parr & Papendick, 1978; Studdert & Echeverria, 2000). Ello resulta sumamente importante en el semiárido austral, donde existen restricciones para mantener una adecuada cobertura de los suelos, tanto en planteos de LC como de L0 (Agamenonni *et al.*, 2012; López *et al.*, 2015).

En la región semiárida del sudoeste bonaerense, la cobertura de los suelos por residuos vegetales resulta generalmente escasa. La frecuente recurrencia de ciclos de sequía disminuyó el aporte de cobertura vegetal debido a la escasa acumulación de biomasa vegetal (Duval *et al.*, 2013). Además del bajo crecimiento vegetal, entre los productores de la región predomina la LC y el pastoreo o sobrepastoreo de rastrojos y verdeos forrajeros (Pezzola *et al.*, 2010). El pastoreo de los rastrojos constituye una práctica inadecuada, que agrava la situación (Agamenonni *et al.*, 2012). Los mismos factores que disminuyen la cobertura del suelo, también impactan negativamente sobre el contenido de materia orgánica, acentuándose así la degradación física y la pérdida por erosión eólica e hídrica (Sanders, 1992; Li *et al.*, 2009; Sfeir, 2009).

La dramática reducción de la cobertura del suelo por sobrepastoreo se observa en pasturas perennes, verdeos invernales y también en los rastrojos de cultivos de invierno. A pesar que los rastrojos de trigo son de escaso valor nutricional para el ganado, forman parte de un recurso forrajero clave, que históricamente apuntaló a la ganadería bovina regional (Agamenonni *et al.*, 1993). La generalizada falta de una buena cobertura del suelo se acrecienta por la masiva adopción de la LC, con suelo desnudo, que se emplea para realizar el barbecho de los cultivos de invierno. Esta labranza suele incluir hasta tres operaciones mecánicas con implementos de discos.

La preparación de la cama de siembra mediante la práctica de barbecho reviste gran utilidad para la acumulación y conservación del agua en el suelo (Smika, 1970). La recarga de humedad del perfil antes de la siembra estabiliza los rendimientos de los cultivos, sobre todo en los ciclos secos (Puricelli, 1969; Monsalvo, 1969; Glave, 1976; Smika, 1983; Lampurlanes *et al.*, 2002; Quiroga *et al.*, 2005; Kirkegaard & Hunt, 2010).

Los sistemas de producción agrícola basados en un cultivo anual se caracterizan por utilizar barbechos extendidos, durante el verano y otoño, que pueden tener altas pérdidas de agua del suelo (Díaz-Ambrona *et al.*, 2005; Reicosky, 2007; Müller, 2008).

Tanto la producción total de biomasa como la acumulación y estructura de los residuos vegetales dependerá del ambiente de cultivo y de la especie empleada (Studdert & Echeverria, 2000; Araus *et al.*, 2002; Forjan & Manso, 2018; Gaggioli, 2019). En ambientes semiáridos, el centeno suele ser considerado un buen antecesor, dada su alta producción de biomasa asociada a precocidad, tolerancia al frío y al estrés hídrico (Scianca *et al.*, 2007). Existe una fuerte relación entre el grado de cobertura por los residuos vegetales y el agua almacenada en el suelo (Greb *et al.*, 1967; Unger, 1976; Wilhelm *et al.*, 1986; Quiroga *et al.*, 1996). Al reducir las pérdidas por evaporación directa (Unger & Parker, 1976; O'Leary & Connor, 1997; Flury *et al.* 2009), la cobertura del suelo incrementa la EUA (Prasad & Power, 1991). En ambientes semiáridos, la sustentabilidad de los sistemas de producción resulta dependiente del aporte de residuos vegetales (Quiroga & Gaggioli, 2010).

La estructura o composición de los rastrojos puede alterar el impacto de la gota de lluvia, el microclima de la superficie del suelo, y su capacidad de almacenamiento de agua (Van Doren & Allmaras, 1978; Smika, 1993; Swella *et al.*, 2015). Al aumentar la altura y el número tallos en superficie, se reduce la fuerza erosiva del viento, y disminuye el potencial de evaporación por la desaceleración del intercambio de vapor convectivo y la absorción de energía radiante (Siddoway *et al.*, 1965; Lascano *et al.*, 1994; McMaster *et al.*, 2000).

Para la adecuada planificación de los sistemas de producción bajo AC resulta fundamental conocer el volumen alcanzable de biomasa de rastrojo mediante distintos cultivos de invierno y modalidades de manejo del rastrojo. Además, si las características estructurales de la cobertura del suelo lograda influyen sobre la dinámica del uso del agua por parte del cultivo de trigo.

La Hipótesis planteada fue:

Los cultivos de invierno antecesores y la disposición de su rastrojo durante el barbecho, difieren en el aporte de biomasa y grado de cobertura al suelo y, en consecuencia, condicionan la productividad del trigo.

El Objetivo del presente Capítulo fue:

Evaluar la generación y caracterizar la cobertura del suelo por el rastrojo del trigo, centeno y avena en el período de barbecho, y su efecto sobre la productividad del trigo subsiguiente.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio

La experimentación se realizó en la EEA INTA Hilario Ascasubi (39°24'36,4''S; 62°38'30,1''O), partido de Villarino, provincia de Buenos Aires. Según el sistema de Thornthwaite, el área presenta un clima semiárido (Sánchez *et al.*, 1998). El suelo del ensayo fue un Haplustol éntico, de textura arenosa franca (Soil Survey Staff, 2022). La caracterización fisicoquímica del suelo, realizada en una muestra compuesta, indicó que se trataba de un suelo representativo de las condiciones regionales del semiárido (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización química y física del horizonte superficial de suelo (0-20 cm) del sitio experimental en la unidad de producción de la EEA INTA Hilario Ascasubi.

MO	pH	CE	Pe	Nt	A	L	Ar	Clase textural	IMO
g kg ⁻¹		dS m ⁻¹	mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹			
12,5	7,4	0,64	15	0,8	5	14	81	Arenoso Franco	7

MO: materia orgánica, escala semimicro (Walkley & Black, 1934); pH: contenido de iones hidrógeno (acidez / alcalinidad), potenciometría; CE: conductividad eléctrica, conductimetría; Pe: fósforo extraíble (Bray & Kurtz, 1945); Nt: nitrógeno Kjeldahl, escala semimicro (Bremner, 1996); A: arcilla, hidrómetro de Bouyoucos; L: limo, hidrómetro de Bouyoucos; Ar: arena, separación gravimétrica; IMO: indicador de la relación entre la materia orgánica y la fracción arcilla + limo (Pieri, 1995). Método del hidrómetro de Bouyoucos (1962), modificado por Red de Laboratorios INTA de Suelos, Agua y Material Vegetal (RILSAV).

Descripción del ensayo

Se evaluaron tres cereales invernales como antecesores trigo (cultivar Buck Meteoro): centeno (cultivar Don José INTA) y avena (cultivar Florencia INTA) y el trigo (cultivar Buck Meteoro), empleando semilla de alta calidad (por datos de la simiente empleada ver Anexo 1). La experimentación, realizada durante junio del 2017 a diciembre de 2020,

presentó dos ciclos consecutivos de rotaciones agrícolas bianuales con cereales invernales (Figura 2).

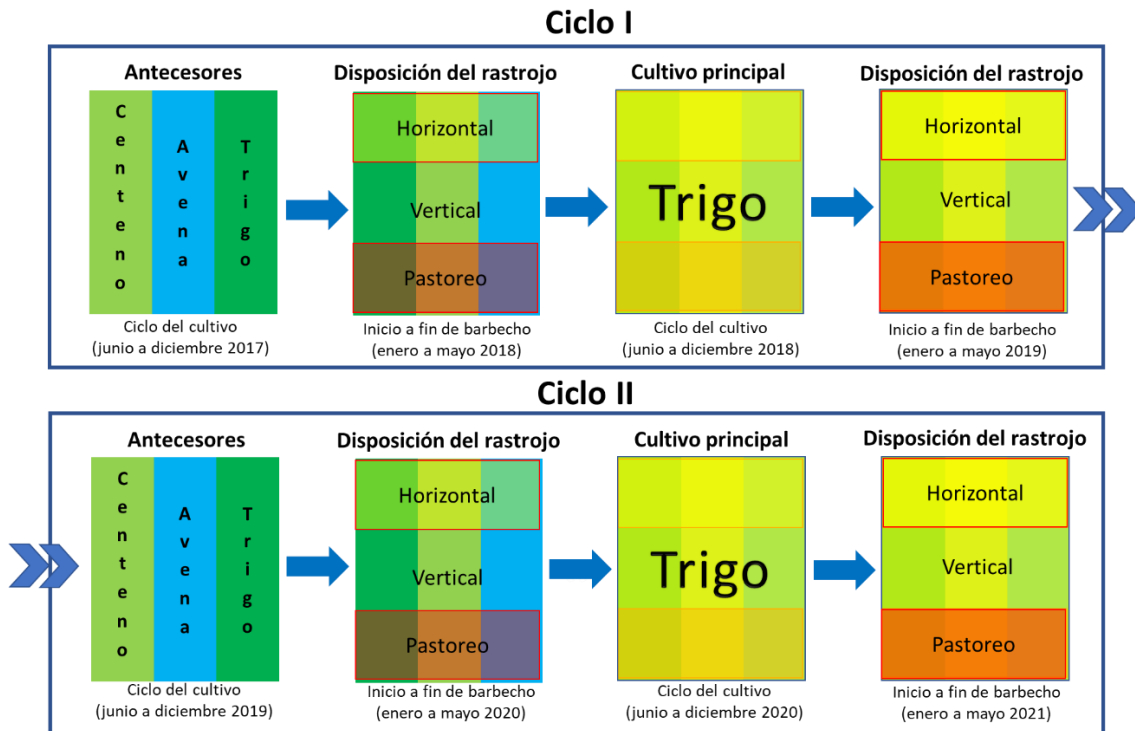


Figura 2. Esquema representativo de las etapas de cada ciclo experimental (diseño bloques completos divididos).

Ciclo I:

En el primer ciclo los tres antecesores se sembraron el 13 de junio de 2017. La siembra en líneas a 17,5 cm se realizó con una sembradora (Bertini modelo 8000) regulada según el valor cultural, para lograr la densidad objetivo de 200 plantas m^{-2} . Luego de emergencia se evaluó el stand de plantas logradas mediante el conteo manual sobre un marco de 0,25 m^2 (ver Anexo 1). Se fertilizó con 80 $kg\ ha^{-1}$ de fosfato di amónico (PDA, grado 18-46-0) a la siembra y 50 $kg\ ha^{-1}$ de urea (grado 46-0-0) al macollaje. Durante el macollaje se realizó el control químico de malezas aplicando 300 $cm^3\ ha^{-1}$ de 2,4-D (890 $g\ l^{-1}$), 100 $cm^3\ ha^{-1}$ de Dicamba (480 $g\ L^{-1}$) y 5 $g\ ha^{-1}$ de Metsulfurón (600 $g\ kg^{-1}$). La cosecha se realizó mediante una máquina comercial (Vassalli 900), ajustando la altura de corte de la plataforma en función de la altura del cultivo y del despeje de la estructura reproductiva: espiga (centeno, trigo) o panoja (avena). Es decir, se cortó a dos tercios de la altura promedio de cada cultivo, como criterio de la máxima eficiencia en la cosecha del grano. La cosechadora dejó un remanente de rastrojo representativo de los cultivos de cada especie. La máquina utilizada, contaba con desparramador de paja

para lograr dispersar el rastrojo sobre el suelo, pero a pesar de ello se observó una mayor acumulación de la biomasa en el centro de la cola de la máquina.

El período de barbecho se inició inmediatamente luego de cosechados los cereales invernales. Desde el inicio del barbecho se configuraron tres sub-tratamientos de estructura del rastrojo (Figura 3). La disposición vertical, consistió en preservar el rastrojo en estado natural desde finalizada la cosecha sin intervenciones posteriores. La disposición horizontal se logró aplastando el rastrojo contra la superficie del suelo mediante un rolo de arrastre conformado por tres cuerpos en tándem; con 3,5 m de ancho, 0,5 m de diámetro y 140 kg por cuerpo, que se hizo circular a una velocidad de trabajo de 8 km h⁻¹. El pastoreo mecánico se realizó mediante una cosechadora de forraje que extrajo el material vegetal remanente del cultivo. El barbecho se mantuvo libre de malezas mediante dos aplicaciones de glifosato a razón de 2 L ha⁻¹ del producto comercial (662 g L⁻¹).



Figura 3. Sub-tratamientos de estructura del rastrojo (horizontal, pastoreo y vertical) de cereales invernales durante el período de barbecho.

En el Ciclo I, al finalizar el barbecho se sembró trigo el 22 de junio de 2018 empleando la misma densidad de siembra y esquema de fertilización que para los antecesores. En el estado de macollaje se realizó el control de malezas aplicando 400 cm³ ha⁻¹ de 2,4-D (890 g L⁻¹) y 6 g ha⁻¹ de Metsulfurón (600 g kg⁻¹). Se aplicó el mismo criterio y máquina cosechadora que el año anterior para la cosecha del cultivo de trigo.

El barbecho para el cultivo de los antecesores se inició inmediatamente luego de la cosecha. El rastreo del trigo recibió los mismos procesamientos que para los antecesores, para lograr las disposiciones vertical, horizontal y pastoreo, descriptos anteriormente. Durante el barbecho las malezas se controlaron con dos aplicaciones de glifosato a razón de 2 L ha⁻¹ del producto comercial (662 g L⁻¹).

Ciclo II:

El 10 de junio de 2019, se realizó la siembra de los tres antecesores. A partir de ese momento, se consideró el inicio del Ciclo II, repitiendo los mismos tratamientos y sub-tratamientos del primer ciclo.

Suelo y clima

Se realizaron muestreos de suelo a la siembra y cosecha de cada cultivo en los dos ciclos. Para ello se tomó una muestra compuesta por 3 submuestras dispuestas al azar, mediante un barreno acanalado en cada sub-unidad experimental (subUE). Las muestras se extrajeron a las profundidades 0-10, 10-20 (solo Ciclo II); 0-20 (solo Ciclo I); 20-40; 40-60 y 60-90 cm.

La lámina de agua total del suelo (LAT) fue estimada mediante la determinación de la humedad por el método gravimétrico y la densidad aparente por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986).

Las precipitaciones, temperatura y heladas se tomaron en la Estación Meteorológica de la EEA INTA Hilario Ascasubi, ubicada a 2400 m del sitio experimental (Gustavo Zura, Dpto. Agrometeorología).

Para el análisis del impacto global de las precipitaciones, el período de barbecho se subdividió en dos sub-períodos correspondiente a los meses de mayor temperatura del verano; enero - febrero y los meses templados del fin de verano - inicio del otoño; marzo - mayo. Por su parte, las precipitaciones caídas durante el ciclo de los cereales invernales evaluados se agruparon en dos sub-períodos. Por un lado, se consideraron las precipitaciones de los meses de junio a octubre, cuando acontecieron las etapas de siembra a aparición de la estructura reproductiva (Z5.0, espigazón o panojamiento), y las de noviembre - diciembre que abarcan desde ese período hasta la madurez fisiológica (Z9.0), cuando se define el tamaño de los granos. Se acepta que el

rendimiento se encuentra estrechamente asociado al número de granos por unidad de superficie (Fischer, 1985; Slafer & Andrade, 1989; Savin & Slafer, 1991; Magrin *et al.*, 1993; Slafer *et al.*, 1994). Ese componente del rendimiento se define principalmente en el período previo a antesis (Fischer, 1975; 1985), durante el activo crecimiento de las espigas.

Biomasa aérea

La biomasa aérea se evaluó al final del ciclo de cada cultivo y al final del barbecho. Para el muestreo se evitaron sectores con notoria recarga de material muerto, para minimizar el efecto de la desuniformidad espacial en la distribución de rastrojo.

Ciclo del cultivo

Se registró la fecha de emergencia, espigazón (E) y madurez fisiológica (MF) en el estadio Z1.0, Z5.0 y Z9.0, respectivamente (Zadoks *et al.*, 1974). Al final de cada cultivo, luego de madurez fisiológica, se realizó un corte manual y recolección de dos líneas de siembra adyacentes (0,175 m²), con dos repeticiones por subUE. Se determinó la altura del vástago fértil (ALT_{vf}), considerando desde el nivel del suelo hasta el extremo superior de las aristas de la espiga o panoja (n = 10 vástagos fértiles); la densidad de vástagos fértiles (N⁰_{vf} m⁻²) se determinó mediante el conteo manual de la cantidad de vástagos fértiles por repetición para luego llevarlo a m², la biomasa fresca total mediante el pesado de toda la biomasa recolectada. Luego, se realizó el trillado mediante una trilladora estacionaria para estimar el rendimiento en grano. Se realizó la diferencia entre la biomasa total (B_{tot}) y biomasa de grano (Grano) para estimar el aporte de biomasa de rastrojo (Rastrojo). La B_{tot}, Grano y Rastrojo se expresaron como materia seca, previo secado a estufa (60°C) hasta peso constante. El índice de cosecha (IC) se calculó como cociente entre la biomasa seca de grano y biomasa seca aérea total. En el rastrojo y el grano se realizó la determinación del nitrógeno total (N_t, Nitrógeno Kjeldahl, escala semimicro).

El uso consuntivo (UC) o agua consumida se calculó a partir del balance determinado por la diferencia entre el agua almacenada en el suelo al inicio y final del período de cultivo y de las precipitaciones, aplicando la ecuación [1]. Este método de cálculo asume escurrimiento cero (López & Arrúe, 1997).

$$UC = (LAT_i - LAT_f) + PP \quad [1]$$

UC: uso consuntivo (mm); LATi: lámina de agua total a la siembra de los cultivos (mm); LATf: lámina de agua total al finalizar el ciclo de crecimiento de los cultivos (mm); PP: precipitaciones (mm) acumuladas en el ciclo de crecimiento de los cultivos.

La eficiencia de uso del agua para la acumulación de biomasa seca total, de grano y de rastrojo (EUAbtot, EUAgr y EUArast, en $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) se estimó mediante el cociente entre Btot, Grano y Rastrojo (kg ha^{-1}) y el UC (mm), aplicando las ecuaciones 2, 3 y 4, respectivamente (López & Arrue, 1997).

$$\text{EUAbtot} = \frac{\text{Btot}}{\text{UC}} \quad [2]$$

$$\text{EUAgr} = \frac{\text{Grano}}{\text{UC}} \quad [3]$$

$$\text{EUArast} = \frac{\text{Rastrojo}}{\text{UC}} \quad [4]$$

EUA: eficiencia en el uso del agua ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$); Btot: biomasa seca total aérea al final del ciclo del cultivo (kg ha^{-1}); Grano: rendimiento o biomasa seca de grano del cultivo (kg ha^{-1}); Rastrojo: biomasa seca de rastrojo del cultivo (kg ha^{-1}); UC: uso consuntivo (mm).

Barbecho

Al inicio del barbecho, además de la biomasa de rastrojo (Rastrojo) a partir del valor de aporte de cada antecesor, se estimó la altura del rastrojo (ALTrastIB) mediante la utilización de una regla ($n = 10$ repeticiones por subUE). La cobertura del suelo por el rastrojo al inicio del barbecho (CobIB) se estimó utilizando fotografías del rastrojo ($n = 10$ repeticiones por subUE) dentro de un marco de $0,25 \text{ m}^2$ ($0,5 \times 0,5 \text{ m}$) dispuesto al azar. Las fotos se tomaron desde una altura de 1,2 m en una posición perpendicular a la superficie del suelo (López *et al.*, 2015). Se utilizó un equipo celular Motorola E7 plus para tomar las fotografías, que contaba con dos cámaras con 48 megapíxeles (MP) principales y 2 MP para lecturas de profundidad. Las fotografías se procesaron mediante el programa CobCal v2.1 para estimar el grado de cobertura del suelo, expresado como porcentaje (Ferrari *et al.*, 2008).

Al final del barbecho también se estimó la cobertura del suelo (CobFB) y la biomasa residual del rastrojo (BRastFB). En primera instancia se empleó el método visual descrito previamente. Luego se procedió a recolectar la biomasa contenida en el marco de 0,25 m² dispuesto al azar (n = 2 repeticiones por subUE). El rastrojo recolectado se llevó a estufa (60°C) hasta peso constante.

Análisis estadístico

El diseño utilizado fue en bloques completos divididos. Se realizaron tres bloques y dentro de cada bloque se subdividió en tres repeticiones. Los tratamientos de antecesores fueron dispuestos en unidades experimentales (UE) de 1800 m². Los sub-tratamientos que modificaron la estructura de los rastrojos al inicio del barbecho se realizaron en subUE, con un área de 54 m².

En primera instancia, se analizó por separado el Ciclo I y II. Luego, para determinar el efecto del trigo continuo, se analizó por separado el primer trigo sobre trigo (trigo Ciclo I), segundo trigo sobre trigo (antecesor trigo Ciclo II) y tercer trigo sobre trigo (trigo Ciclo II). Finalmente, se analizó el acumulado de biomasa durante el barbecho al finalizar los ciclos experimentales (Ciclo I y II). Los resultados en tablas y figuras se presentan como medias. Las diferencias en los resultados obtenidos afectados por los tratamientos fueron probadas por análisis de la varianza (ANOVA) y la prueba LSD Fisher para la comparación de medias ($p \leq 0,05$). Se efectuó Análisis de Componentes Principales (ACP) con los datos estandarizados. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2020).

Resultados y Discusión

Condiciones agroclimáticas

Durante el período en que se realizaron las experiencias, las lluvias mostraron la natural variabilidad en el registro total, así como en la distribución mensual (por más detalles ver Anexo 2). La precipitación anual promedio durante la experimentación fue 410 mm (entre 380 y 570 mm), representando una probabilidad de ocurrencia del 70 % (entre 80 y 20 %).

En los dos ciclos de rotaciones, las precipitaciones totales durante el período de cultivo de los antecesores fueron similares entre sí con 200 a 222 mm, levemente por debajo del histórico de 245 mm (Tabla 2), equivalentes con una probabilidad de ocurrencia

cercana al 60 %. El Ciclo II presentó mayor acumulación de lluvia durante el período en que se definía la biomasa por grano, con 26 mm por encima del Ciclo I. Además, en el Ciclo II, durante el período crítico que se definía la densidad de órganos reproductivos (espigas o panojas), entre octubre y noviembre (Quiroga & Paccapelo, 1990; Kruger, 2015), se acumularon 40 mm más que durante el Ciclo I.

En general, las lluvias fueron inferiores en verano, y en menor medida en el otoño, invierno y primavera, respecto al promedio histórico 1966-2021. Únicamente los meses de mayo y noviembre estuvieron por encima del promedio histórico, siendo dos meses claves (ver Anexo 2). En mayo ocurre la recarga hídrica del perfil del suelo previo a la siembra de los cultivos de invierno, mientras que en noviembre tiene lugar la etapa del llenado del grano.

Tabla 2. Precipitaciones acumuladas durante los dos ciclos de experimentación con rotaciones agrícolas de cereales invernales del sitio experimental en la unidad de producción de la EEA INTA Hilario Ascasubi.

Cultivo	Período	Barbecho (tramos)			Ciclo del cultivo			Total anual
		Inicial	Final	Total barbecho	S – E	E - MF	Total ciclo	
-----mm-----								
Ciclo I								
Trigo-centeno-avena	2017	119	225	344	146	76	222	566
Trigo	2018	29	108	137	144	98	242	379
Ciclo II								
Trigo-centeno-avena	2019	24	160	184	98	102	200	385
Trigo	2020	137	78	214	140	108	248	462
Promedio								
2017-2020		70	128	198	119	94	213	410
1966-2021		107	134	240	151	94	245	485

Inicial: enero - febrero, Final: marzo - mayo, S: siembra (junio), E: espigazón o panojamiento (octubre), MF: madurez fisiológica (diciembre).

Durante el verano y otoño de 2017, las lluvias estuvieron por encima de la media mientras que la distribución mensual fue similar al promedio histórico y adecuada para la provisión de agua al cultivo.

El 2018 se caracterizó por escasas precipitaciones en el barbecho. Si bien el invierno también fue relativamente seco, julio registró una acumulación de lluvia que fue el doble del promedio histórico para ese mes. Luego de ello se fueron recuperando las condiciones de humedad en los últimos tres meses del cultivo.

Durante marzo de 2019 ocurrieron lluvias abundantes que equipararon el nivel de humedad del suelo respecto al año anterior. Asimismo, el invierno fue más seco respecto al resto de los años que se extendió la experiencia, lo cual pudo haber afectado el macollaje de los cultivos.

Durante el período de barbecho de 2020, las abundantes lluvias de febrero fueron claves para la acumulación de humedad. Durante el ciclo del cultivo las lluvias estuvieron dentro de los valores medios, salvo en septiembre que tuvo lluvias totales levemente por debajo de la media.

Las temperaturas medias se mantuvieron dentro del rango de variación observado en el histórico 1966-2021 (datos en Anexo 3).

La ocurrencia de heladas siguió el patrón de distribución mensual histórico (1966-2021) pero el número total de heladas estuvo por debajo de la media (ver Anexo 4). Solo en 2017 se observaron algunos síntomas de daño por frío, adjudicadas a la ocurrencia de heladas tardías durante el estado de floración. El síntoma observado fue la esterilidad parcial de algunas espigas de trigo.

En general, la duración total del ciclo del trigo y el centeno, desde la siembra a madurez fisiológica, se cumplió en 180 días. La avena, presentó un ciclo total 15 días más corto que trigo y centeno.

Estructura del rastrojo

Caracterización del rastrojo de los antecesores:

En los dos ciclos evaluados, la avena mostró mayores valores de densidad de tallos fértiles que los otros antecesores, debido a su elevada capacidad para lograr panojas (Hernández-Campuzano *et al.*, 2018). Por otro lado, el centeno duplicó su altura final respecto a los otros antecesores (Tabla 3). El cultivo de centeno es generalmente alto, con un gran despeje que confiere la posibilidad de aumentar la altura de corte en la cosecha (Murillo *et al.*, 2001; Mellado *et al.*, 2008). Estos rasgos impactarían sobre la estructura de la cobertura del rastrojo residual. El número, diámetro y altura de tallos son factores que regulan el microclima de la interfase suelo-atmósfera y, por lo tanto, en el grado de conservación del agua en el suelo (McMaster *et al.*, 2000).

Tabla 3. Acumulación y estructura de la biomasa de los cereales antecesores del trigo en dos ciclos de evaluación.

Antecesor	Vástagos fértiles	Altura de vástago fértil	Biomasa total	IC	Grano	Rastrojo
	[n° m ⁻²]	[cm]	[Mg ha ⁻¹]			
Ciclo I						
Trigo	361 b	84 c	13,5 a	0,27 b	3,7 a	9,8 ab
Centeno	343 b	164 a	13,4 a	0,20 c	2,7 b	10,7 a
Avena	414 a	93 b	12,6 a	0,31 a	3,9 a	8,7 b
ANOVA						
Antecesor	***	***	ns	***	***	**
Ciclo II						
Trigo	356 b	68 b	8,2 c	0,49 a	3,9 b	4,3 b
Centeno	362 b	145 a	12,3 a	0,32 b	3,9 b	8,4 a
Avena	479 a	68 b	9,9 b	0,46 a	4,5 a	5,2 b
ANOVA						
Antecesor	***	***	***	***	*	***

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***). Por cada ciclo y variable, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). IC: índice de cosecha.

La biomasa total acumulada por los antecesores estuvo entre 8,2 y 13,5 Mg ha⁻¹ según especie y ciclo (Tabla 3). En el Ciclo I, de mayor acumulación total de biomasa aérea, no se observaron diferencias entre antecesores. En el Ciclo II, el centeno superó al trigo y avena. Las mayores precipitaciones durante el barbecho y el período vegetativo de los cereales del Ciclo I (Tabla 2) habrían brindado condiciones más favorables para la acumulación de biomasa total de todos los antecesores (Kruger & Venanzi, 2010). Bajo

la condición hídrica menos favorable del Ciclo II, el centeno expresó su reconocida tolerancia al estrés hídrico (Scianca *et al.*, 2007; Fernández *et al.*, 2012), superando a los otros dos antecesores en la acumulación de biomasa total.

En el Ciclo II la avena fue un antecesor con mayor rendimiento en grano, superando significativamente a los otros dos antecesores. Este comportamiento estuvo asociado a su elevada capacidad de macollaje. Contrariamente, el centeno mostró una tendencia opuesta (Tabla 3). La baja producción de granos del centeno pudo deberse a su fuerte aptitud forrajera, que prioriza la partición de la biomasa acumulada a la fracción vegetativa (Murillo *et al.*, 2001; Carestía *et al.*, 2016). Ello se vio reflejado en el menor IC, respecto al trigo y avena (Tabla 3). Por encima de ello, el rendimiento en grano alcanzado por el centeno fue cercano a 4 Mg ha^{-1} , que es un nivel comparable al de este cereal en otras regiones marginales para el trigo (Rataj *et al.*, 1998).

La biomasa de rastrojo remanente ofrecida por los antecesores se encontró entre $4,3$ y $10,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Tabla 3). Estos valores están distribuidos alrededor del valor indicativo de $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ propuesto por Unger (1978) y Quiroga *et al.* (2005), como umbral mínimo para lograr una buena protección del suelo. Dada la mayor acumulación de biomasa y el bajo IC del Ciclo I, todos los cereales superaron ese umbral. En ese ciclo, el centeno superó a la avena y el trigo ocupó una posición intermedia. En el Ciclo II, que fue más favorable para el llenado de granos debido a la mayor acumulación de lluvia durante esta etapa (Tabla 2), el centeno fue el único antecesor que alcanzó ese umbral de biomasa de rastrojo considerado suficiente para una buena cobertura del suelo.

El UC de los antecesores estuvo entre 241 y 271 mm, con diferencias significativas entre especies. En los dos ciclos el trigo estuvo entre los antecesores con mayor UC, aunque sin diferenciarse de centeno en el Ciclo I (Tabla 4). El uso del agua depende del suministro de agua del suelo, determinado principalmente por el agua almacenada en la zona de las raíces a la siembra, y por las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (Passioura, 1977). También está determinado por el tipo de cultivo y de sus características (Noellemeyer *et al.*, 2013). Teniendo en cuenta que los tres antecesores estaban expuestos bajo la misma dotación hídrica, el trigo parece demostrar una mayor eficiencia en el consumo hídrico.

Tabla 4. Indicadores de eficiencia de producción de biomasa de los antecesores del trigo.

Antecesor	UC	EUA _{btot}	EUA _{gr}	EUA _{rast}
	[mm]	[kg ha ⁻¹ mm ⁻¹]		
Ciclo I				
Trigo	257 a	53	15 a	38 ab
Centeno	257 a	53	11 b	42 a
Avena	241 b	52	16 a	36 b
ANOVA				
Antecesor	**	ns	***	*
Ciclo II				
Trigo	271 a	30 c	14 b	16 c
Centeno	254 b	48 a	15 b	33 a
Avena	258 b	39 b	18 a	21 b
ANOVA				
Antecesor	*	***	**	***

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***). Por cada ciclo y variable, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). UC: uso consuntivo; EUA_{btot}, EUA_{gr} y EUA_{rast}: eficiencia de utilización del agua para la acumulación de biomasa seca total, de grano y de rastrojo, respectivamente.

En el Ciclo II el centeno presentó la mayor EUA para la acumulación de biomasa total, con una alta proporción de aporte al rastrojo del cultivo debido a su menor IC. Es por eso que el centeno resultaría un antecesor de mayor valor para aportar a la cobertura del suelo mediante la biomasa seca remanente en el rastrojo. Por su parte, la avena presentó mayor EUA para grano, a pesar de presentar el menor UC. Este antecesor demostró la mayor eficiencia para transformar el agua consumida en el producto final comercial, incluso en condiciones hídricas menos favorables, como en el Ciclo II. En el caso del trigo, los experimentos regionales han hallado valores de EUA entre 7 y 14 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Iglesias *et al.*, 1990; Caviglia *et al.*, 2001; Venanzi *et al.*, 2006; Martínez, 2011, Gaggioli *et al.*, 2018). Empleando modelos extrapolados de otras regiones semiáridas, Cantamutto *et al.*, 2016 proponen que el valor potencial puede llegar a 20 kg ha⁻¹ mm⁻¹.

Analizados en conjunto, se observó que la biomasa de rastrojo de los antecesores estuvo asociada con la biomasa acumulada total, la altura del cultivo y que ello se expresó en la EUA para generar rastrojo (Figura 4). Estas características se asociaron principalmente con el antecesor centeno. Por su parte, el rendimiento de grano se correlacionó principalmente con el IC y asociadas al antecesor avena.

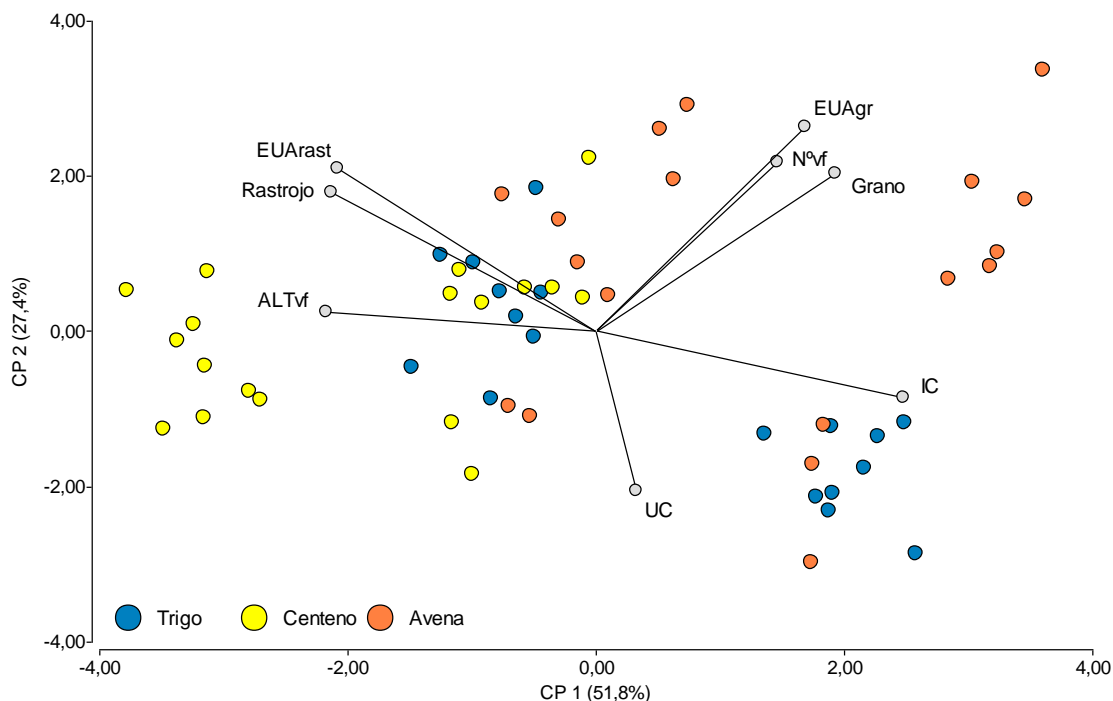


Figura 4. Análisis de componentes principales de las variables de los cultivos antecesores.

Grano: biomasa seca de grano, Rastrojo: biomasa seca de rastrojo, N°vf: densidad de vástagos fértiles, ALTvf: altura del vástago fértil, IC: índice de cosecha, UC: uso consuntivo, EUAgr y EUARast: eficiencia de utilización del agua para la acumulación de biomasa seca de grano y rastrojo, respectivamente.

Manejo del rastrojo

En el Ciclo I, al inicio del barbecho para el trigo, la biomasa de rastrojo del centeno y trigo superó a la avena. Al final de este período se mantuvo el valor destacado del centeno, mientras que el trigo ocupó una posición intermedia (Figura 5a). A pesar de las diferencias observadas en la acumulación y estructura de biomasa de los antecesores, al inicio y final del barbecho, no se observaron diferencias en la cobertura lograda. El arreglo espacial o estructura del rastrojo de los antecesores tuvo como resultado una cobertura de suelo que en promedio fue del 74 % (Figura 5a). Esto significa que el indicador biomasa total brindaría una estimación incompleta sobre las características de la cobertura vegetal.

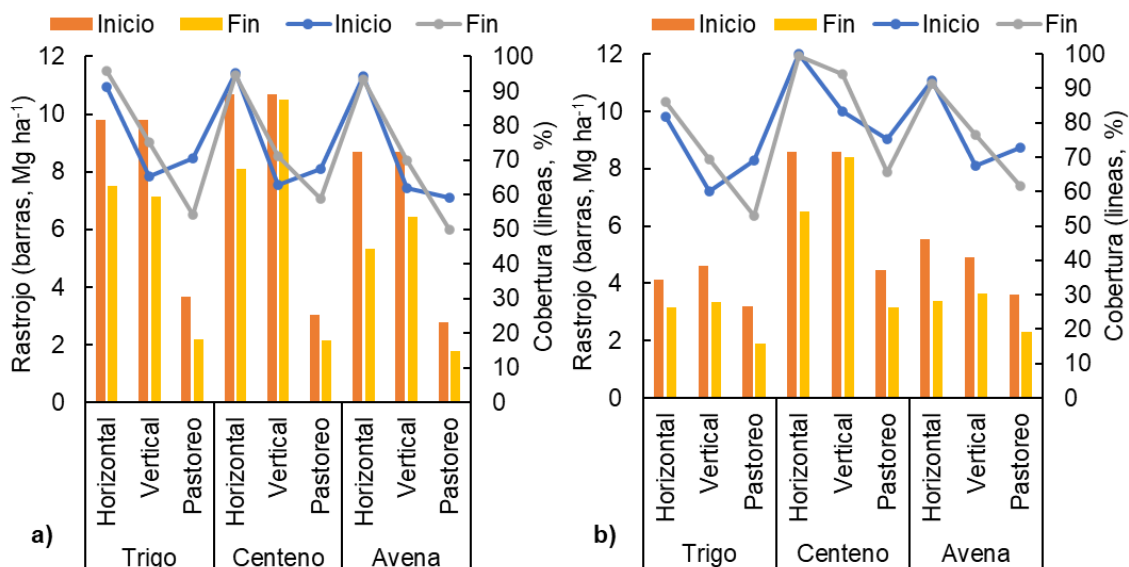


Figura 5. Cambios en la biomasa seca de rastrojo y en la cobertura del suelo durante el barbecho previo al cultivo de trigo, en dos ciclos de experimentación. Ciclo I (a) y Ciclo II (b).

El pastoreo de los antecesores redujo drásticamente la biomasa de rastrojo al inicio del barbecho a $3,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, valor que continuó decayendo hasta $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ al final del barbecho. Ese fue el valor más bajo de biomasa de las tres disposiciones para los dos períodos de barbecho. Al inicio del barbecho, las disposiciones horizontal y vertical del rastrojo triplicaron el valor del pastoreo, llegando a $9,7 \text{ Mg ha}^{-1}$. A pesar de ello, la cobertura del suelo con rastrojo pastoreado no se diferenció de la condición de rastrojo vertical (Figura 5a). Si bien la biomasa de rastrojo en los tratamientos sin pastoreo fue similar, la disposición horizontal generó una cobertura de suelo significativamente superior, en los tres antecesores. La disposición horizontal del rastrojo incrementó en alrededor de un tercio la cobertura del suelo.

Al final del barbecho, la biomasa de rastrojo sin pastorear fue entre 3,5 y 4,0 veces mayor al pastoreado, entre $7,0$ y $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$. En tanto, la cobertura fue mayor con rastrojo horizontal, intermedia con rastrojo vertical e inferior con pastoreo, para todos los antecesores. Se observó que la cobertura del suelo con rastrojo pastoreado fue mayor con el antecesor centeno respecto a avena, mientras que el trigo se ubicó en una posición intermedia.

En el Ciclo II, al inicio del barbecho, la biomasa de rastrojo fue inferior que la observada en el Ciclo I, aunque los antecesores se comportaron de un modo similar. El centeno tuvo la mayor acumulación, con $7,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, superando al trigo ($4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$) y avena

(4,7 Mg ha⁻¹), que no se diferenciaron entre sí (Figura 5b). Estas características tampoco determinaron diferencias en la cobertura del suelo, que en promedio fue de 78 %. Similar al Ciclo I, el pastoreo redujo drásticamente la biomasa de rastrojo remanente a 3,8 Mg ha⁻¹, mientras que sin pastoreo se estuvo cerca de duplicar ese valor, con 6,0 Mg ha⁻¹. Tal como se menciona en el Ciclo I, no se observaron diferencias significativas en la cobertura del suelo con rastrojo pastoreado respecto del rastrojo bajo disposición vertical. La disposición horizontal del rastrojo incrementó en un 20 % la cobertura de suelo respecto a la disposición vertical, a pesar de presentar la misma biomasa total de rastrojo.

Al finalizar el barbecho, la biomasa de rastrojo mantuvo el mismo ordenamiento que al iniciar el barbecho, siendo el centeno el antecesor con mayor acumulación, superando al trigo y la avena que no se diferenciaron entre sí. No se observaron diferencias entre antecesores en el grado de cobertura del suelo al inicio y fin del barbecho. En promedio la cobertura fue de 78 %.

La falta de diferencia en la cobertura del suelo bajo las dos condiciones contrastantes de biomasa de rastrojo, entre 3,6 y 6,9 Mg MS ha⁻¹ también había sido observada por López *et al.* (2015). En ese caso, la ausencia de diferencias se atribuyó principalmente a la disposición en superficie del rastrojo.

Considerando los dos ciclos en forma conjunta, se observó que durante el período de barbecho la descomposición del rastrojo de centeno fue un 30 % menor al de la avena y el trigo. A su vez, la disposición horizontal aumentó la descomposición del rastrojo entre 0,8 y 1,1 Mg ha⁻¹ respecto a la disposición vertical.

Los resultados hallados mostraron que el rastrojo de centeno se descompuso más lentamente que el de los otros dos cereales evaluados, favoreciendo la persistencia de la cobertura (Scianca *et al.*, 2007; Fernández *et al.*, 2012). Además, el cambio a la disposición horizontal del rastrojo aumentó la tasa de descomposición del material vegetal, posiblemente por el mayor contacto con la superficie del suelo y mayor humedad. La descomposición del rastrojo está determinada por factores inherentes a su composición, como su relación C/N, contenido de lignina y carbohidratos solubles, que son diferentes según las especies. La degradación también está regulada por factores de manejo como la disposición del rastrojo (Brown & Dickey, 1970; Parr & Papendick, 1978).

Al final del barbecho, la cobertura del suelo se mantuvo estable cuando el rastrojo se mantuvo en posición horizontal, aumentó con disposición vertical y se redujo con el pastoreo. Esto implica que, a pesar de la mayor tasa de descomposición del rastrojo, la disposición horizontal permitió mantener la cobertura del suelo. En regiones semiáridas solo la capa que está en contacto con el suelo está sujeta a descomposición (Thorburn *et al.*, 2001; Berkenkamp *et al.*, 2002; Coppens *et al.*, 2007). Por tanto, al aumentar el espesor, solo la primera capa en completo contacto con el suelo se fue descomponiendo gradualmente, aunque sin afectar el indicador de cobertura.

Con rastrojo pastoreado, la cobertura del suelo se redujo durante el barbecho, posiblemente debido a que el material fino que estaba en contacto con el suelo se fue descomponiendo. Por otro lado, el mayor nivel de cobertura del suelo con el rastrojo bajo disposición vertical se adjudicó al paulatino vuelco de tallos, inicialmente erguidos durante el barbecho, debido a la descomposición de las raíces que habrían dejado de actuar como anclaje al suelo.

Todas las condiciones de rastrojo evaluadas produjeron una cobertura superior al límite del 30 % sugerido por la FAO (2017a) para la AC. Aunque la biomasa de rastrojo remanente al final del barbecho bajo disposición horizontal o vertical fue similar, la cobertura de suelo fue significativamente superior con la disposición horizontal, que con los tres antecesores. Klocke *et al.* (2008) encontraron una reducción sustancial de la evaporación del suelo con una cobertura casi completa (mayor o igual a 80 %). De esta forma, se podría alcanzar esta cobertura con los tres antecesores, pero con una tendencia a un mayor logro y duración de la cobertura con el antecesor centeno. Asimismo, podría ser posible manejar la disposición del rastrojo mediante el aplastado para alcanzar este valor indicado como umbral para generar condiciones que permitan modificar significativamente la dinámica del agua en el perfil del suelo.

Efecto de los antecesores sobre el cultivo de trigo

En los dos ciclos evaluados solo se observaron diferencias significativas en la biomasa de rastrojo del trigo según la disposición del rastrojo del cultivo antecesor (Tabla 5). En el Ciclo I la disposición vertical del rastrojo del barbecho previo generó mayor biomasa del trigo respecto a las otras dos disposiciones. Además, ello se relaciona con la tendencia a un mayor número de vástagos fértiles y biomasa total. Es decir, la posición vertical del rastrojo en el barbecho tuvo un efecto positivo sobre la biomasa total acumulada por el trigo, que a su vez se expresó en la biomasa de rastrojo remanente,

sin cambios en el rendimiento de grano. Ello resultaría beneficioso para la mejora en la cobertura de suelo.

Tabla 5. Trigo; caracterización de la biomasa acumulada según cultivo antecesor y disposición del rastrojo durante el barbecho.

Tratamientos	Vástagos fértiles	Altura de vástago fértil	Biomasa total	IC	Grano	Rastrojo
	[n° m ⁻²]	[cm]	[Mg ha ⁻¹]			
Ciclo I						
Antecesor						
Trigo	476	72	11,5	0,42	4,8	6,7
Centeno	452	77	11,5	0,42	4,8	6,7
Avena	476	74	12,3	0,43	5,3	7,0
Disposición del rastrojo						
Horizontal	454	74	11,4	0,43	4,9	6,5 b
Vertical	487	74	12,5	0,42	5,2	7,3 a
Pastoreo	462	75	11,6	0,42	4,9	6,7 b
ANOVA						
Antecesor	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Disposición	ns	ns	ns	ns	ns	*
Antecesor x Disposición	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Ciclo II						
Antecesor						
Trigo	388	58	8,7	0,43	3,6	5,1
Centeno	407	59	9,6	0,44	4,2	5,4
Avena	356	55	7,8	0,41	3,2	4,6
Disposición del rastrojo						
Horizontal	385	58	8,9	0,41	3,7	5,2
Vertical	378	58	8,6	0,44	3,7	4,9
Pastoreo	387	57	8,5	0,42	3,6	4,9
ANOVA						
Antecesor	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Disposición	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Antecesor x Disposición	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***). Por cada ciclo y variable, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). IC: índice de cosecha.

Si bien no se observaron diferencias entre los cereales invernales, el antecesor centeno mostró una tendencia positiva sobre la producción de biomasa del trigo, particularmente durante el Ciclo II. En el Ciclo I, este antecesor pareció afectar la implantación y macollaje del trigo, debido quizás al alto nivel de biomasa de rastrojo remanente al momento de la siembra que, en promedio, era de 7,0 Mg ha⁻¹, es decir, aproximadamente 2,0 Mg ha⁻¹ por encima de trigo y avena. Asimismo, en el Ciclo II, el

antecesor centeno disminuyó la acumulación de biomasa respecto al Ciclo I, pero superó a los otros antecesores. Ello habría mejorado las condiciones para una correcta implantación, macollaje y por ende mayor biomasa total (rendimiento de grano y rastrojo, Tabla 5).

Scianca *et al.* (2007), hallaron que la acumulación de biomasa y el rendimiento en grano de cultivos estivales (sorgo y maíz) fue superior cuando el cultivo antecesor había sido centeno. Si bien no se observaron diferencias significativas, las características de la estructura del rastrojo aportado por el centeno, es decir, el mayor nivel de biomasa, altura y cobertura del suelo, podrían estar aportando condiciones más favorables para la mejora del almacenamiento del agua en el suelo durante el barbecho (Unger, 1978; Quiroga *et al.* 2005).

No se observó interacción entre los factores antecesor y disposición del rastrojo durante el barbecho para los indicadores de eficiencia de producción de biomasa del trigo (Tabla 6). Tampoco se observaron diferencias significativas entre los antecesores. El antecesor trigo mostró una tendencia a un mayor UC del trigo posterior. Ello no se vio reflejado en la eficiencia de producción del cultivo, aunque el suelo quedó más seco a la cosecha, con 20 a 30 mm menos de agua en el suelo respecto a los antecesores centeno o avena.

Solo en el Ciclo II se observaron diferencias significativas en la EUA para la producción de grano del trigo, adjudicadas a las disposiciones del rastrojo, siendo superior la horizontal respecto a vertical y pastoreo (Tabla 6).

Tabla 6. Indicadores de eficiencia de producción de biomasa del trigo ante diferentes antecesores y tratamientos del rastrojo durante el barbecho.

Tratamientos	UC	EUA _{btot}	EUA _{gr}	EUA _{rast}
	[mm]	[kg ha ⁻¹ mm ⁻¹]		
Ciclo I				
Antecesores				
Trigo	293	39	17	22
Centeno	274	42	17	25
Avena	271	46	20	26
Disposición del rastrojo				
Horizontal	277	42	18	24
Vertical	281	45	19	26
Pastoreo	281	42	18	24
ANOVA				
Antecesor	ns	ns	ns	ns
Disposición	ns	ns	ns	ns
Antecesor x Disposición	ns	ns	ns	ns
Ciclo II				
Antecesores				
Trigo	232	38	22	16
Centeno	218	44	25	19
Avena	214	37	21	16
Disposición del rastrojo				
Horizontal	222	41	24 a	17
Vertical	225	39	22 b	17
Pastoreo	217	39	22 b	17
ANOVA				
Antecesor	ns	ns	ns	ns
Disposición	ns	ns	*	ns
Antecesor x Disposición	ns	ns	ns	ns

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***). Por cada ciclo y variable, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

UC: uso consuntivo; EUA_{btot}, EUA_{gr} y EUA_{rast}: eficiencia de utilización del agua para la acumulación de biomasa seca total, de grano y de rastrojo, respectivamente.

Efecto aditivo de la disposición del rastrojo sobre tres años de trigo continuo

No se observaron efectos de la disposición del rastrojo durante el barbecho en la eficiencia de acumulación anual de biomasa del trigo (Tabla 7). Considerando el acumulado para los tres años, la biomasa total fue mayor con la disposición horizontal del rastrojo, fue inferior con disposición vertical, mientras que el pastoreo mostró una posición intermedia.

Tabla 7. Trigo continuo; caracterización de la biomasa acumulada con el avance de la secuencia y disposición del rastrojo en el barbecho.

Disposición del rastrojo	Vástagos fértiles	Altura de vástago fértil	Biomasa total	IC	Grano	Rastrojo
	[n° m ⁻²]	[cm]	[Mg ha ⁻¹]			
Primer trigo sobre trigo (trigo Ciclo I)						
Horizontal	465	72	11,1	0,45	4,9	6,2
Vertical	487	72	12,0	0,42	5,1	6,9
Pastoreo	475	74	11,6	0,41	4,8	6,8
ANOVA						
Disposición	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Segundo trigo sobre trigo (antecesor Ciclo II)						
Horizontal	344	68	8,0	0,51	4,1	3,9
Vertical	370	69	8,6	0,48	4,1	4,5
Pastoreo	354	68	7,9	0,47	3,7	4,2
ANOVA						
Disposición	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Tercer trigo sobre trigo (trigo Ciclo II)						
Horizontal	376	58	9,1 a	0,41	3,7	5,4
Vertical	394	59	8,3 b	0,43	3,6	4,7
Pastoreo	393	56	8,8 ab	0,42	3,6	5,2
ANOVA						
Disposición	ns	ns	*	ns	ns	ns

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***). Por cada ciclo y variable, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

IC: índice de cosecha.

La disposición del rastrojo del trigo antecesor no cambió los indicadores de eficiencia de producción de biomasa del trigo siguiente (Tabla 8). El UC fue disminuyendo con el avance de la secuencia, lo cual impactó sobre la EUA_{btot} en los dos primeros cultivos, pero no en el tercer trigo sobre trigo.

Tabla 8. Indicadores de eficiencia de producción de biomasa del trigo ante diferentes antecesores y tratamientos del rastrojo en el barbecho.

Disposición del rastrojo	UC	EUA _{btot}	EUA _{gr}	EUA _{rast}
	[mm]	[kg ha ⁻¹ mm ⁻¹]		
Primer trigo sobre trigo (trigo Ciclo I)				
Horizontal	292	38	17	21
Vertical	290	41	17	24
Pastoreo	298	39	17	22
ANOVA				
Disposición	ns	ns	ns	ns
Segundo trigo sobre trigo (antecesor Ciclo II)				
Horizontal	282	29	14	15
Vertical	275	32	15	17
Pastoreo	257	30	14	16
ANOVA				
Disposición	ns	ns	ns	ns
Tercer trigo sobre trigo (trigo Ciclo II)				
Horizontal	233	39 a	23	16
Vertical	240	35 b	20	15
Pastoreo	224	39 a	23	16
ANOVA				
Disposición	ns	*	ns	ns

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***). Por cada ciclo y variable, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

UC: uso consuntivo; EUA_{btot}, EUA_{gr} y EUA_{rast}: eficiencia de utilización del agua para la acumulación de biomasa seca total, de grano y de rastrojo, respectivamente.

En el análisis de la biomasa de rastrojo y la cobertura en el barbecho, se pudo observar diferencias en cuanto a la disposición del rastrojo en las tres secuencias de trigo sobre trigo, con una tendencia hacia la disminución en ambos parámetros desde el primero hasta el tercero (Figura 6). El rastrojo horizontal y vertical no se diferenciaron en la biomasa aérea dispuesta sobre el suelo al inicio y final del barbecho. Asimismo, el grado de cobertura del suelo por el rastrojo dispuesto de modo horizontal superó en 20 - 30 % al vertical.

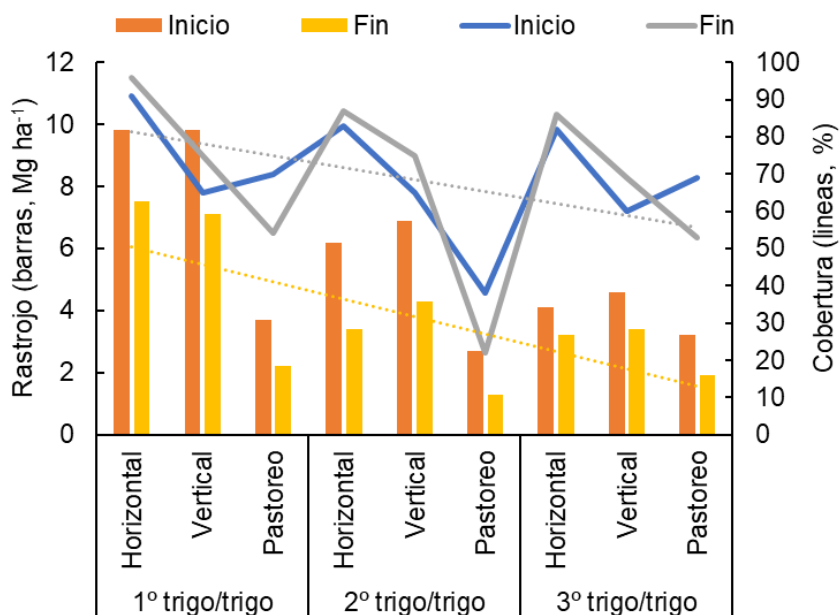


Figura 6. Cambios en la biomasa seca de rastrojo y en la cobertura del suelo durante el barbecho previo al cultivo de trigo, en el primer trigo sobre trigo, segundo trigo sobre trigo y tercer trigo sobre trigo, según la disposición del rastrojo de trigo.

El pastoreo mecánico redujo la biomasa de rastrojo al inicio del barbecho en aproximadamente un 60 % en los dos primeros trigos sobre trigo y el 30 % en el tercer trigo sobre trigo, respecto de las otras disposiciones. El pastoreo del rastrojo minimizó la cobertura del suelo.

Al final del barbecho, la cobertura del suelo lograda con las distintas disposiciones del rastrojo se comportó de la misma forma que al inicio del barbecho, pero se observó un incremento del 9 % cuando la disposición era vertical. La biomasa total al final del ciclo no presentó diferencias entre la disposición horizontal y vertical del rastrojo, en todos los cultivos de trigo sobre trigo evaluados. Estas disposiciones superaron al pastoreo en 1,4 a 5,1 Mg ha⁻¹.

En tal sentido, la disminución paulatina de la producción de biomasa en la secuencia de trigo continuo puede atribuirse a la baja fertilidad del suelo. Esto ocurre como consecuencia del monocultivo de trigo (Minoldo *et al.*, 2004) y los bajos niveles de fertilización empleados en relación con lo exportado con el grano. Siguiendo la generalizada modalidad de aplicación de fertilizantes químicos en el área de estudio, los aportes realizados fueron entre el 25 y 35 % de lo extraído. Este desbalance puede explicar la menor respuesta en acumulación de biomasa aérea ante precipitaciones más

favorables (Kruger *et al.*, 2011). Asimismo, ello también explicaría los menores aportes de biomasa en el grado de cobertura hacia el final del barbecho. Algunos trabajos en la región semiárida pampeana indican que con una biomasa inicial de $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de rastrojo de trigo se llega con el suelo desnudo al final de un barbecho de 5 meses (Glave, 1979a; Kruger, 2015).

El análisis de componentes principales considerando los tres períodos estudiados mostró que el pastoreo se correlacionó negativamente con la EUAbtot y la biomasa de rastrojo al final del barbecho (BRast). Por su parte, la disposición vertical se asoció positivamente con los mayores valores de altura y biomasa de rastrojo (ALTrast y BRast). Además, el rastrojo horizontal se correlacionó con los mayores valores de grado de cobertura (% Cobertura; Figura 7).

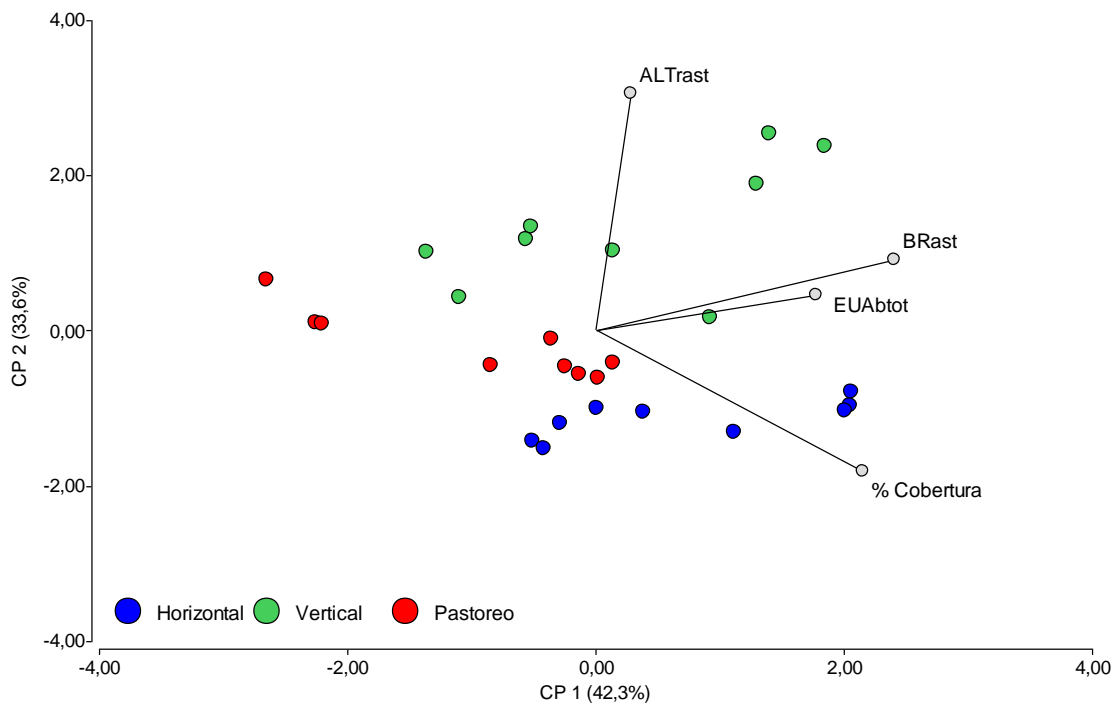


Figura 7. Análisis de componentes principales de las variables del barbecho y del cultivo de trigo.

EUAbtot: eficiencia de utilización del agua para la acumulación de biomasa seca total,
 % Cobertura: porcentaje de suelo cubierto al final del barbecho, BRast: biomasa seca de rastrojo al final del barbecho.

Efecto acumulado de las secuencias de antecesores y disposiciones del rastrojo sobre las condiciones de la cobertura al finalizar el barbecho

Cuando en las rotaciones agrícolas predominan las gramíneas, se generan grandes aportes de rastrojos con alta relación C/N (Lal, 2004a; Forjan & Manso, 2018). En este ensayo, el antecesor centeno aportó la mayor biomasa de rastrojo a la cosecha e inicio y fin del barbecho, superando a avena y trigo (Figura 8). La secuencia con centeno produjo $\approx 20\%$ más de aporte total de rastrojo, es decir, un adicional estimado en $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ en el total de los años de experimentación. Por su parte, el pastoreo de los rastrojos redujo $\approx 7\%$ la producción de biomasa de rastrojo de los cultivos siguientes, significando una reducción de 2 Mg ha^{-1} para los tres antecesores. Es decir, que la práctica del pastoreo redujo la cantidad de rastrojo “in situ” durante el barbecho, y además estaría condicionando la producción de biomasa del cultivo posterior.

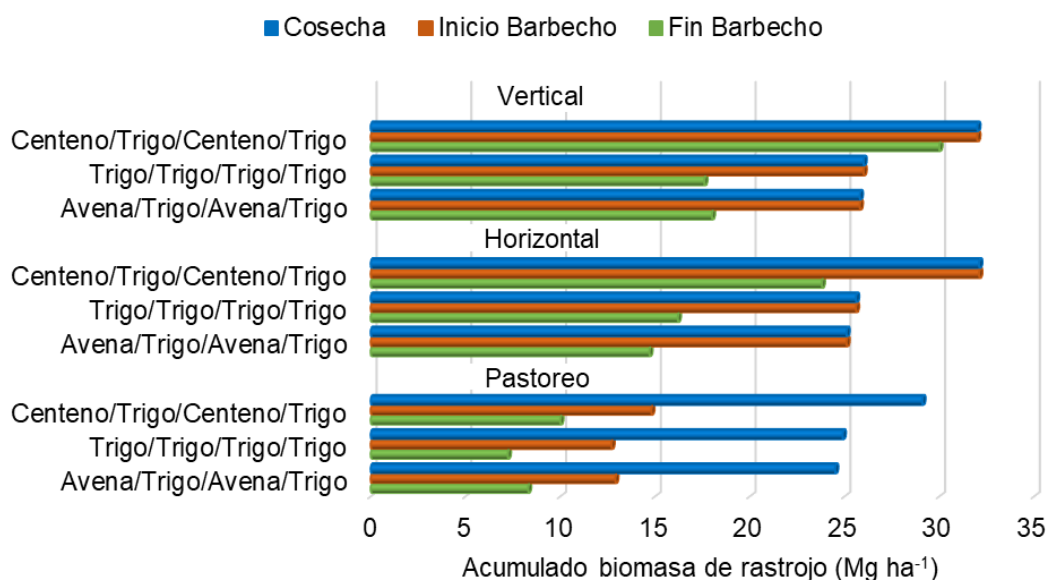


Figura 8. Biomasa de rastrojo acumulada a cosecha, al inicio y fin del barbecho durante los dos ciclos estudiados para las nueve secuencias de cultivo de invierno con distinto antecesor y disposición del rastrojo.

El mayor aporte de biomasa de rastrojo al inicio del barbecho se observó con el antecesor centeno bajo disposición horizontal o vertical, seguido del trigo y avena, también en ambas disposiciones (Figura 8). Con pastoreo, el aporte de biomasa de rastrojo fue muy bajo para los tres antecesores. Nuevamente el antecesor centeno presentó el mayor aporte de biomasa de rastrojo, mientras que el pastoreo la redujo en aproximadamente el 50 %.

Considerando una composición media, de 45 % de carbono (C) para los rastrojos de cereales invernales (Baldock, 2009; Damon *et al.*, 2014), se estimó que el aporte acumulado por el centeno en los dos ciclos experimentales fue de 2,7 Mg C ha⁻¹. En contrapartida, el pastoreo de los rastrojos produjo una pérdida estimada en 7,2 Mg C ha⁻¹ para el acumulado en los dos ciclos experimentales. Bono (2010) estableció que en la región pampeana semiárida el contenido de C de los residuos tendría el mayor efecto sobre las pérdidas de C del suelo, aún mayor que el sistema de labranza.

Los resultados del contenido de nitrógeno en el rastrojo de los antecesores del Ciclo I fueron de 2,8; 2,6 y 2,2 g N kg biomasa seca⁻¹ para centeno, trigo y avena, respectivamente, similares a los niveles más bajos informados por Galantini *et al.* (1992) con 2,8 g N kg biomasa seca⁻¹. Si bien los rastrojos de cereales invernales generalmente presentaron una alta relación C/N (161, 173 y 204, para el centeno, trigo y avena, respectivamente), el mayor contenido de N en centeno conduciría a hipotetizar que el rastrojo de centeno podría descomponerse más rápidamente que los demás antecesores. Sin embargo, en el presente experimento se observó todo lo contrario, ya que al final del barbecho se observó una mayor persistencia de la biomasa de rastrojo del centeno respecto a los otros dos antecesores. La mayor estabilidad del rastrojo de centeno podría explicarse en la menor relación hoja/tallo, respecto de la avena y el trigo (Kennelly y Weinberg, 2003). Las hojas presentan una composición menos recalcitrante a la degradación, mientras que los tallos contienen un mayor porcentaje de lignina. Aquellos materiales que poseen alto contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, retrasan el descenso en peso relativo. La lignina tiende a persistir y acumularse en la biomasa que se está consumiendo debido a su resistencia a la descomposición microbiana (Douglas & Rickman, 1992; Zhang *et al.*, 2014).

En las rotaciones con cereales, el centeno aparece como una alternativa promisoría como antecesor del trigo. Este antecesor permitiría lograr el incremento de los niveles de cobertura y en consecuencia apuntar a la mejora en la dinámica del agua del suelo. El antecesor centeno permitió alcanzar altos niveles de cobertura debido, por un lado, a su gran aporte biomasa de rastrojo a la superficie, siendo muy eficiente en la transformación de agua en biomasa y, por el otro, si bien presenta menos vástagos fértiles por superficie, tuvo la mayor altura del rastrojo remanente. Además, la persistencia de la biomasa de rastrojo hacia el final del barbecho fue mayor que la de los otros antecesores. El empleo de centeno como cultivo antecesor del trigo permitiría atenuar la pérdida de carbono orgánico de los suelos, mejorar la dinámica de uso del agua y lograr buena cobertura para prevenir la erosión.

El antecesor avena mostró los mejores valores de rendimiento de grano, y por ende una mayor eficiencia en la transformación de agua en grano. Ello estuvo asociado al mayor número de vástagos fértiles. Esta característica define la cantidad de tallos por unidad de superficie y por ende una estructura del rastrojo diferente a la que presentan las otras especies antecesores. Si bien el rendimiento en grano del antecesor centeno fue menor al de avena, se alcanzó un nivel de producción que puede ser considerado aceptable.

El pastoreo del rastrojo confirmó su impacto negativo sobre las características del barbecho. El pastoreo redujo el aporte de biomasa y la cobertura de suelo. A la extracción de biomasa acontecida por el pastoreo mecánico, se agregó un impacto depresivo sobre la producción de biomasa del cultivo posterior, lo que torna desaconsejable este empleo en los ambientes semiáridos. La disposición vertical del rastrojo parece ser la estructura más adecuada ya que se relacionó de manera positiva con la mayoría de las variables, pero la disposición horizontal presentó una mayor cobertura y eficiencia en la transformación del agua en grano.

Al evaluar las variables sobre el trigo, los mayores valores biomasa, altura y de eficiencia de producción de biomasa y grano, se obtuvieron con el antecesor centeno. Cuando el antecesor fue trigo se observó un mayor uso consuntivo del trigo siguiente, pero ello no se tradujo en una mayor eficiencia. En cuanto al efecto de las disposiciones sobre el trigo, el rastrojo vertical favoreció la producción de biomasa total y la generación de rastrojo. Mientras tanto, la disposición horizontal del rastrojo en el barbecho se asoció con una mayor eficiencia de uso del agua para la producción de grano. En tanto, el pastoreo tuvo un efecto negativo en todas las variables medidas en trigo.

En condiciones de trigo continuo, la disposición vertical del rastrojo durante el barbecho definió una mayor acumulación de biomasa total, grano, rastrojo, altura y número de vástagos fértiles en el trigo siguiente. Sin embargo, el rastrojo horizontal fue más eficiente en transformar el agua en grano. El pastoreo determinó un menor uso consuntivo del trigo.

Aquellas secuencias que incluyeron el centeno en alternancia con el trigo presentaron el mayor aporte de rastrojo y la menor disminución de la biomasa hacia el final del barbecho. A su vez, el pastoreo no sólo redujo la biomasa "in situ" sino que también la biomasa de rastrojo a cosecha. Además, el cambio de disposición del rastrojo de vertical

a horizontal definió un cambio en la dinámica de la biomasa, acelerando la descomposición del rastrojo.

En base a estos resultados, podemos decir que existe un estrecho margen de manejo del rastrojo mediante la elección de la especie antecesor y la secuencia de cultivos de invierno; y la modificación de la disposición del rastrojo que permita una mejora no solo de los niveles de cobertura, sino también de la estructura más adecuada en función de los objetivos planteados en maximizar la eficiencia de la gestión del agua del suelo.

Conclusiones

Se acepta la hipótesis. Los cereales antecesores difirieron en el aporte de biomasa de rastrojo, destacándose el centeno por su mayor aporte que se manifestó incluso bajo condiciones de menor disponibilidad hídrica, generando un buen nivel de cobertura de suelo.

La disposición del rastrojo cambió el aporte de biomasa y el grado de cobertura de suelo. El pastoreo redujo el aporte de biomasa y la cobertura de suelo. A la extracción de biomasa acontecida por el pastoreo mecánico, se agregó un impacto depresivo sobre la producción de biomasa del cultivo posterior, lo que torna desaconsejable esta práctica para un ambiente semiárido. Si bien el cambio de la disposición del rastrojo de vertical a horizontal, mediante rolado, redujo la biomasa al final del barbecho, la práctica incrementó el nivel de cobertura que fue casi total.

Los antecesores y la disposición del rastrojo no impactaron en la productividad del trigo. A pesar de ello, con el antecesor centeno se obtuvieron los mayores valores biomasa, altura y de eficiencia de producción de biomasa y grano de trigo. En cuanto al efecto de las disposiciones, el rastrojo vertical favoreció la producción de biomasa total y la generación de rastrojo. La disposición horizontal del rastrojo en el barbecho se asoció con una mayor eficiencia de uso del agua para la producción de grano. El pastoreo tuvo un efecto negativo en todas las variables medidas en trigo.

Capítulo II

Efecto del rastrojo sobre el microclima de la interfase suelo-atmósfera y la dinámica del agua durante el barbecho*

* Enviado a Ciencia del suelo (Capítulo II).

Introducción

En zonas semiáridas de secano, el agua es un recurso escaso que proviene únicamente de las precipitaciones. Las deficiencias hídricas son frecuentes, en ocasiones acentuadas por el mal manejo (Madurga, 2005). Los procesos relacionados con la dinámica del agua ocurren principalmente en la zona de contacto entre el suelo y la atmósfera, denominada interfase suelo-atmósfera (Steiner & Schomberg, 1996; Kruger *et al.*, 2014).

La cobertura de rastrojos de cultivos en la superficie del suelo tiene efectos importantes sobre el microclima de esta interfase: amortigua el impacto de las gotas de la lluvia, reduce la velocidad del viento, influye en los flujos de balance de radiación y la energía; y altera las tasas de transferencia de calor y de agua en la superficie del suelo, es decir, tiempos de secado muy diferentes (Wilhelm *et al.*, 2004). Como consecuencia, la presencia de rastrojos de cultivos en la superficie del suelo tiene un impacto significativo sobre la infiltración, la reducción de la evaporación luego de los eventos de lluvia y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (Monzon *et al.*, 2006; Swella *et al.*, 2015).

El grado de cobertura del suelo por material senescente se define en función de la cantidad de biomasa y la composición y disposición de los residuos vegetales, es decir, según la estructura de los rastrojos. La cobertura puede modificar el microclima de la superficie y, en consecuencia, impactar con el grado de conservación del agua (McMaster *et al.*, 2000; Sharratt, 2002). Quiroga *et al.* (2005) define valores entre 1,4 a 9,4 Mg ha⁻¹ de rastrojo en superficie para considerar que los niveles de cobertura son bajos o altos, respectivamente. Con bajos niveles de cobertura se observó un menor almacenaje de agua y menor disponibilidad de nitrógeno. Además, comprobaron la influencia del nivel de cobertura sobre la temperatura del suelo durante el barbecho en el período de mayores temperaturas (diciembre y enero). Unger (1978) demostró que, con altos niveles de cobertura, entre 8 y 12 Mg ha⁻¹ de rastrojos, se observó un incremento significativo del almacenaje de agua en el suelo.

La cantidad de biomasa por unidad de superficie se encuentra conformada por los estratos inferior y superior, es decir, la proporción de rastrojo en contacto o erguido sobre la superficie del suelo, respectivamente (Kruger & Quiroga, 2013). A igual biomasa total, las distintas combinaciones de los estratos pueden determinar modificaciones en la interfase suelo-atmósfera y en la dinámica del agua.

Según McMaster *et al.* (2000) la estructura del rastrojo se encuentra definida por el altura, diámetro y número de vástagos o tallos por unidad de superficie. El factor de silueta o índice de área de tallo (IAT, en inglés *stem area index*, SAI) define la zona de silueta a través de la cual debe pasar el viento. Este índice define, por un lado, el microclima de la interfase suelo-atmósfera determinando las pérdidas de agua por evaporación. Por el otro, la velocidad de fricción relativa (RFV), es decir, el grado de exposición o pérdida potencial del suelo por la acción del viento y el potencial de evaporación. Además, la estructura del rastrojo se encuentra afectada mediante la disposición u orientación del rastrojo, es decir, sea de manera horizontal y/o vertical.

Al aumentar la altura, el número tallos en superficie o ambos, se reduce la fuerza erosiva del viento, y disminuye el potencial de evaporación por la desaceleración del intercambio de vapor convectivo y la absorción de energía radiante (McMaster *et al.*, 2000). El rastrojo dispuesto en una posición horizontal puede restringir las pérdidas por evaporación y, a la vez, tener efecto directo sobre la temperatura del suelo (Flerchinger *et al.*, 2003). Passioura & Angus (2010) mencionan que, al aplanar el rastrojo se rompe la continuidad de la vía de pérdida de humedad del suelo a través del xilema de las raíces muertas y los tallos. Por su parte, el rastrojo vertical tiende a elevar o desplazar el nivel de velocidad del viento cercana a cero, aumentando la rugosidad aerodinámica. Es decir, puede reducir en más del 70 % la velocidad del viento en la superficie del suelo y el intercambio convectivo de calor y vapor de agua, disminuyendo la pérdida de agua por evaporación (Aiken *et al.*, 2003).

Cuando llueve, el rastrojo intercepta y regula la cantidad de agua que llega a la superficie del suelo. Este proceso de amortiguación depende de la intensidad y duración del evento de lluvia, la evaporación potencial, tipo de cultivo y estructura del rastrojo (Kozak *et al.*, 2007a). Durante un evento pluviométrico menor, una cantidad significativa de agua es interceptada por los rastrojos y se evapora directamente a la atmósfera sin llegar al suelo (Sommer *et al.*, 2012). En eventos de precipitación más importantes, el agua logra atravesar el rastrojo e infiltra en el perfil del suelo y permanece almacenada en el suelo bajo la protección de la cobertura (Flerchinger *et al.*, 2003). Por lo tanto, la pérdida de agua por intercepción dependerá tanto de la cantidad e intensidad de la lluvia como también de la estructura del rastrojo y las condiciones meteorológicas que controlan la evaporación durante y después de la precipitación (Kozak *et al.*, 2007a). El rastrojo reduce la velocidad de evaporación más eficazmente al principio del ciclo de secado, cuando la superficie del suelo está mojada, prolongando la duración de esta etapa (Bond & Willis, 1970).

El barbecho es un componente estratégico que permite almacenar y conservar en el suelo, el agua aportada por lluvias ocurridas fuera del ciclo del cultivo (Passioura & Angus, 2010). En el semiárido austral, el barbecho previo a la siembra del trigo suele ser largo, con una extensión de hasta diez meses (agosto a mayo), resultando un proceso crucial para la conservación del agua. Las altas temperaturas estivales se combinan con la acción de los vientos secos, cuya mayor frecuencia y velocidad provocan un aumento en la evaporación, lo que ocasiona situaciones de déficit hídrico (Scherger *et al.*, 2012). Entre un 50 y 80 % del agua se pierde por evaporación directa desde el suelo.

Una mejor comprensión de los efectos de la estructura de los rastrojos de cereales invernales sobre la pérdida de agua por evaporación directa puede brindar información útil para diseñar las estrategias de manejo orientadas a mejorar la conservación del agua del suelo. Se estima que la estructura y disposición del rastrojo de los cereales invernales modificaría la incidencia del viento y la temperatura en la interfase suelo-atmósfera y ello se vería reflejado en la dinámica del agua en el suelo durante el barbecho.

La Hipótesis planteada fue:

El cereal antecesor y la disposición de los residuos vegetales determinan la estructura del rastrojo, modificando la incidencia de la temperatura y el viento y, en consecuencia, el contenido de agua edáfica durante el barbecho para el cultivo de trigo.

El Objetivo del presente Capítulo fue:

Evaluar el impacto de tres cultivos antecesores y los cambios en la disposición de los residuos vegetales sobre los componentes estructurales de la cobertura del suelo con rastrojo durante el barbecho para trigo y su efecto sobre la temperatura y el viento en la interfase suelo-atmósfera, y en el contenido de agua edáfica durante el barbecho.

Materiales y Métodos

Condiciones de estudio

Las observaciones se realizaron en la unidad de producción de la EEA INTA Hilario Ascasubi durante los Ciclos I y II, bajo las condiciones detalladas en la sección Materiales y Métodos del Capítulo I.

Estructura del rastrojo

La estructura del rastrojo se evaluó al final del barbecho y fue definida por los siguientes parámetros: biomasa seca; distribución por estrato de la biomasa seca e IAT.

Se utilizó un marco de 0,25 m² dispuesto al azar con dos repeticiones por subUE, evitando los sectores del centro de la cola de la cosechadora, para minimizar el efecto de falta de uniformidad en su distribución.

Se recolectó el rastrojo y se llevó hasta peso seco mediante estufa (60° por 48 h), para estimar biomasa por unidad de superficie (kg ha⁻¹). En el Ciclo II se determinó la distribución por estrato del rastrojo, separando en estrato superior (ES), que consistió en el material vegetal que permanecía en pie o erguido sobre la superficie del suelo, y en estrato inferior (EI), que se encontraba acostado y en contacto con la superficie del suelo.

Se calculó el factor de silueta o índice de área de tallo (IAT) mediante la ecuación [5] (McMaster *et al.*, 2000):

$$\text{IAT} = d_v \times h_v \times N \quad [5]$$

IAT: índice de área de tallo; d_v : diámetro del vástago (m); h_v : altura del vástago (m); N: número de vástagos m⁻².

El diámetro del tallo se determinó en la porción media de diez vástagos por repetición, seleccionados al azar, utilizando un calibre digital. Luego, se determinó la altura del vástago, mediante una regla, desde la base de los vástagos hasta el extremo superior de corte. La densidad de vástagos se determinó mediante conteo manual de los tallos delimitados por el marco.

Parámetros físicos durante el barbecho

Temperatura del suelo

Se registró la temperatura del suelo (Ts) a 0 (nivel de superficie de suelo), 5 y 10 cm de profundidad. Para la primera se utilizó un termómetro infrarrojo (Scout 1, I.R Thermometers, modelo INF155) y en las profundidades se utilizó un termómetro de pinche digital (Silcook, varilla de 12 cm de largo, rango de -50 a ~300°C). La medición se realizó en simultáneo para la misma profundidad, considerando la estabilización del

valor registrado, en la posición central de la entrelínea de cultivo. La T_s se registró durante el barbecho para trigo del Ciclo I (2018) en 12 oportunidades (5, 6, 8, 19, 21 y 22 de marzo; 10, 11, 16 de abril; y 15, 16 y 30 de mayo). Las mediciones se realizaron en proximidades de las 15:00 h, coincidiendo con el horario de máxima temperatura ambiental (T_a) registrada en la Estación Meteorológica de la EEA INTA Hilario Ascasubi.

Se calculó el ΔT° mediante la ecuación [6] (Zhang, 2005):

$$\Delta T^\circ = \frac{T_s}{T_a} \quad [6]$$

ΔT° : es la relación entre la T_s y la T_a ; T_s : temperatura del suelo ($^\circ\text{C}$); T_a : temperatura ambiental a las 15:00 h ($^\circ\text{C}$).

Velocidad laminar del viento

La velocidad del viento (V_v) durante el período de barbecho se midió a 0 (nivel de superficie de suelo), 40, 90 y 200 cm de altura. Se empleó un anemómetro digital (Mastech, modelo MS6252B) fijado a un bastidor y orientado en dirección perpendicular al viento predominante. La altura máxima a 200 cm o velocidad del viento de referencia (V_{vref}) se corresponde con la medición registrada en la Estación Meteorológica de la EEA INTA Hilario Ascasubi, distante a 2400 m del sitio experimental. Las observaciones se realizaron durante el barbecho para trigo del Ciclo I (2018), el 14 y 30 de mayo, y el 7 de junio. En todos los casos las mediciones se realizaron en proximidades del mediodía.

Los registros de V_v a 0, 40 y 90 cm fueron divididos por el valor medido a 200 cm para obtener el ΔV_v . Con estos valores se graficaron los perfiles de V_v para cada tratamiento, según la ecuación [7] (McMaster *et al.*, 2000):

$$\Delta V_v = \frac{V_v}{V_{vref}} \quad [7]$$

ΔV_v : relación entre la velocidad del viento registrada y la velocidad de referencia a 200 cm; V_v : velocidad del viento registrada a diferente altura (km h^{-1}); V_{vref} : velocidad del viento de referencia registrada a 200 cm de altura (km h^{-1}).

En el área de estudio los vientos que prevalecen durante el período en que habitualmente se realiza el barbecho provienen del noroeste, y se presentan cálidos y secos. La Vv media anual varía de 11,8 a 14,6 km h⁻¹ (vientos leves), con registros mayores a 50 km h⁻¹ (vientos fuertes, Sánchez *et al.*, 1998). Los días en que se realizaron las mediciones presentaron una condición de viento leve a moderado donde la Vv promedio fue de 13 km h⁻¹ (máxima promedio 17 km h⁻¹) el 14 y 30 de mayo, 17 km h⁻¹ (máxima promedio 23 km h⁻¹) el 7 de junio de 2018.

Humedad del suelo

Los muestreos de suelo se realizaron al inicio y final del barbecho para cereales en los dos ciclos estudiados. En todos los casos se conformó una muestra compuesta de tres submuestras extraídas al azar mediante un barreno acanalado, a las profundidades 0-10, 10-20 (Ciclo II); 0-20 (Ciclo I); 20-40; 40-60 y 60-90 cm. Se estimó la lámina de agua total del suelo (LAT) mediante la determinación de la humedad por el método gravimétrico y la densidad aparente por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986).

La eficiencia de barbecho (EB) se calculó a partir de la relación entre el almacenaje de agua en el suelo y las precipitaciones ocurridas durante el período de barbecho, aplicando la ecuación [8] (Mathews & Army, 1960).

$$EB = \frac{LAT_f - LAT_i}{PP} \times 100 \quad [8]$$

EB: eficiencia de barbecho (%); LAT_i: lámina de agua total al inicio del barbecho (mm); LAT_f: lámina de agua total al finalizar el barbecho (mm); PP: precipitaciones (mm) acumuladas en el período de barbecho.

Evento de una precipitación extrema

Durante el barbecho para los antecesores del Ciclo II, luego de un evento de alta precipitación (Zhai *et al.*, 1990; Swella *et al.*, 2015) de 17:00 h de duración se evaluó la dinámica de la LAT. El evento tuvo su inicio la tarde del 15 de marzo de 2019, acumulando 109,6 mm con una intensidad promedio de 6,4 mm h⁻¹. La estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo se realizó utilizando muestras compuestas por tres subunidades, tomadas a 2, 4, 9, 11, 13, 16, 18, 20, 23, 30 y 38 días después del evento de precipitación (DDP). Durante los días 6 y 7, ocurrió un evento de precipitación menor que acumuló 7,6 mm.

Clima

Las precipitaciones, temperatura y viento se registraron en la Estación Meteorológica de la EEA INTA Hilario Ascasubi, ubicada a 2400 m del sitio experimental (Gustavo Zura, Dpto. Agrometeorología).

Análisis estadístico

El diseño utilizado fue en Bloques Completos divididos. Se realizaron tres bloques y dentro de cada bloque subdividió en tres repeticiones. Los tratamientos de antecesores fueron dispuestos en UE de 1800 m². Los sub-tratamientos que modificaron la estructura de los rastrojos al inicio del barbecho se realizaron en subUE, con un área de 54 m².

Los resultados en tablas y figuras se presentan como medias. Las diferencias en los resultados obtenidos afectados por los tratamientos fueron probadas por análisis de la varianza (ANOVA) y la prueba LSD Fisher para la comparación de medias ($p \leq 0,05$). Se efectuó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con los datos estandarizados. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2020).

Resultados y Discusión

Estructura del rastrojo

Biomasa de rastrojo

Al finalizar el período de barbecho para trigo en ambos ciclos, la biomasa total de rastrojo de centeno dispuesto en forma vertical fue superior al de trigo y avena. En el Ciclo I el trigo ocupó una posición intermedia, pero en el Ciclo II no hubo diferencias entre este y la avena (Figura 9). El rastrojo de centeno dispuesto en forma horizontal presentó menor acumulación de biomasa seca residual respecto a la disposición vertical, pero fue superior al pastoreado. Como se menciona en el Capítulo I, esto sugiere que bajo disposición horizontal ocurrió un incremento en la descomposición de la biomasa residual del centeno debido al mayor contacto con el suelo, proceso que no ocurrió con el rastrojo de trigo en los dos ciclos y avena en el Ciclo II. La descomposición del rastrojo está determinada por un lado por factores inherentes a su composición, como por ejemplo su relación C/N, y por factores de manejo como la disposición del rastrojo (Brown & Dickey, 1970; Parr & Papendick, 1978). Los resultados de la calidad del

residuo en los tres antecesores demuestran que no hubo diferencias en el contenido de nitrógeno, por lo tanto, las diferencias en la estructura del rastrojo suponen un efecto sobre los factores de la interfase suelo-atmósfera que modifican la tasa de descomposición de los rastrojos.

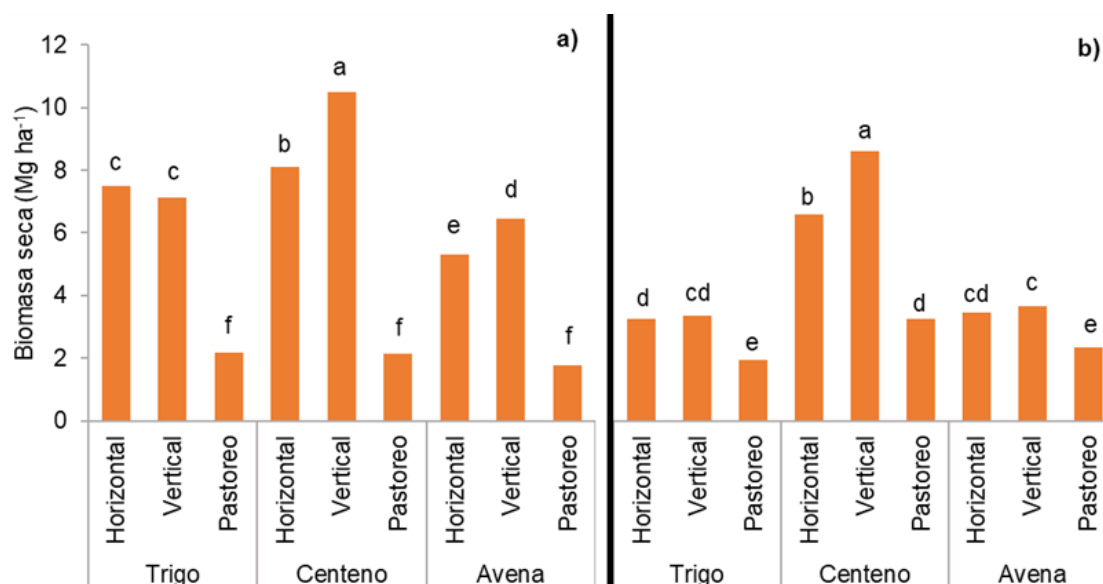


Figura 9. Biomasa de rastrojo al final del barbecho, previo a la siembra de trigo del Ciclo I (a) y Ciclo II (b), aportada por los antecesores (trigo, centeno y avena) bajo tres disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo).

Por cada ciclo, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

En el Ciclo I, en trigo, que aportó un 30 % menos de biomasa de rastrojo que el centeno, no se modificó el total de biomasa seca al acostar el rastrojo. Lo mismo ocurrió en el Ciclo II con trigo y avena, que aportaron menos de la mitad de biomasa de rastrojo que el centeno. En avena del Ciclo I si se modificó, pero en menor proporción que centeno. En ambos ciclos bajo pastoreo se modificó la biomasa total del rastrojo en todos los antecesores ya que extrajo en promedio un 70 % de la biomasa total (Figura 9).

En el Ciclo II, la disposición horizontal de rastrojo en los tres antecesores llevó a que, en su totalidad, la cobertura se encontrara en el estrato inferior. Bajo disposición vertical, más de la mitad de la biomasa de rastrojo de trigo y avena estaba en el estrato inferior, pero en el rastrojo de centeno esa proporción fue menor (Figura 10). El centeno utilizado, era un diploide que posee la capacidad de elongar tempranamente los entrenudos y mostrar porte erecto (Amigone *et al.*, 1997). Por ello, el centeno generalmente presenta elevada relación tallo:hoja, que lo diferencia de avena y trigo. El

pastoreo redujo los niveles de biomasa total de rastrojo y aumentó la proporción en el estrato inferior (Figura 10). Durante el barbecho con rastrojo de trigo del Ciclo II se observaron las mismas características en la composición del rastrojo debidas a la disposición del rastrojo (ver Anexo 5).

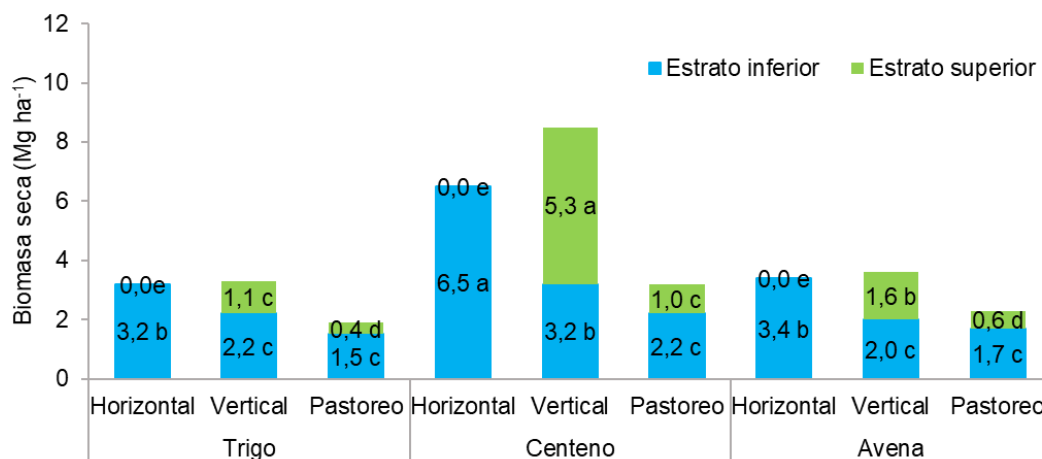


Figura 10. Composición por estrato superior (ES) e inferior (EI) de la biomasa de rastrojo al final del barbecho, aportada por los antecesores (trigo, centeno y avena) del Ciclo II bajo tres disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo).

Por cada estrato de biomasa, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Se considera que la biomasa del estrato superior del rastrojo disminuye la exposición del suelo a los efectos del viento, reduciendo la pérdida de suelo y ralentizando el intercambio de vapor por convección. Además de ello, puede absorber la energía radiante, y así disminuir la pérdida de agua por evaporación desde el suelo (Siddoway *et al.*, 1965; van de Ven *et al.*, 1989).

Índice de área del tallo (IAT)

Se considera que el IAT se asocia a la eficiencia del rastrojo para reducir la velocidad del viento en superficie (Hagen & Armbrust, 1994; Hagen, 1996). En los dos ciclos observados, el IAT fue mayor con la disposición vertical del rastrojo, muy bajo en la disposición horizontal e intermedio en el rastrojo pastoreado (Tabla 9). Entre los antecesores, el centeno obtuvo los valores mayores de IAT. El antecesor avena fue superior al trigo, debido al mayor número de vástagos por unidad de superficie. Los mayores determinantes del IAT fueron la altura del rastrojo y el número de vástagos por unidad de superficie, ya que el diámetro de los tallos presentó una oscilación menor, que fue desde 3,6 a 4,5 mm.

Tabla 9. Análisis estadístico de las características del rastrojo (IAT) al final del barbecho previo a la siembra de trigo de tres antecesores (trigo, centeno y avena) con tres disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo) durante dos ciclos de estudio.

Tratamientos	Índice de área de tallo (IAT)					
	Ciclo I			Ciclo II		
Disposición del rastrojo	Antecesor					
	Trigo	Centeno	Avena	Trigo	Centeno	Avena
Horizontal	0,04 f	0,04 f	0,06 f	0,04 e	0,04 e	0,06 de
Vertical	0,57 c	1,32 a	0,81 b	0,29 b	0,92 a	0,34 b
Pastoreo	0,15 e	0,16 de	0,2 d	0,13 cd	0,14 c	0,19 c
Antecesor		***			**	
Disposición		***			***	
Antecesor*Disposición		***			***	

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***). Por cada ciclo (antecesor x disposición del rastrojo), letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Parámetros físicos durante el barbecho

Temperatura del suelo

Los antecesores no afectaron la temperatura del suelo medida en tres profundidades durante el período de barbecho para el trigo (Ciclo I). Ello ocurrió a pesar que el centeno dejó mayor biomasa de rastrojo y el doble de altura respecto del trigo y avena. Los altos niveles de biomasa de los tres antecesores y la compensación en las características que componen la estructura de los rastrojos ofrecieron similares condiciones de cobertura del suelo, lo que pudo minimizar las diferencias en cuanto a la reflectividad solar y la conductividad térmica de los rastrojos. Ello acuerda con Swella *et al.* (2015) quienes observaron la disminución de la máxima temperatura y menor amplitud térmica de suelo con rastrojos de 4 Mg ha^{-1} y mayor a 30 cm de alto.

Por su parte, la disposición del rastrojo sí afectó la temperatura del suelo y el diferencial respecto al ambiente (ΔT°) en las tres profundidades de suelo. A medida que se profundizó en el suelo y las temperaturas ambientales fueron más bajas, estas diferencias se redujeron (Figura 11, Figura 12). Estos resultados son coincidentes con las evaluaciones de la temperatura del suelo realizadas sobre las tres disposiciones del rastrojo de trigo durante el barbecho previo a la siembra de los antecesores del Ciclo II (por más detalles véase Anexo 6).

En el barbecho con rastrojo pastoreado, la temperatura del suelo y el diferencial ΔT° fueron mayores respecto a la disposición horizontal y vertical (Figura 11), posiblemente debido a la disminución de la biomasa y altura del rastrojo (Swella *et al.*, 2015). A nivel superficial, durante todo el período de seguimiento, la temperatura del suelo con rastrojo pastoreado fue 4 a 13 °C mayor a las otras dos disposiciones y superó la temperatura ambiental ($\Delta T^\circ > 1$), de un modo análogo a lo que ocurre con un suelo desnudo (Aase & Siddoway, 1980). El agua en la capa superior del suelo regula el equilibrio energético y, por lo tanto, la temperatura edáfica (Horton *et al.*, 1996), que se incrementa con el secado (Freitas *et al.*, 2006).

Hasta mediados de mayo la temperatura del suelo y el ΔT° , a las tres profundidades estudiadas, mostraron un ordenamiento decreciente entre pastoreo > vertical > horizontal (Figura 11). A partir de esta fecha, la temperatura del suelo y el diferencial ΔT° fueron menores en el rastrojo vertical que en horizontal (pastoreo > horizontal > vertical). Según Fabrizzi *et al.* (2005), durante la noche, un suelo desnudo se enfría más rápidamente que un suelo con cobertura. Por lo tanto, en condiciones de temperatura ambiental más baja, podría haber un mayor enfriamiento con el rastrojo vertical respecto del horizontal, debido a la menor cobertura superficial o protección de suelo.

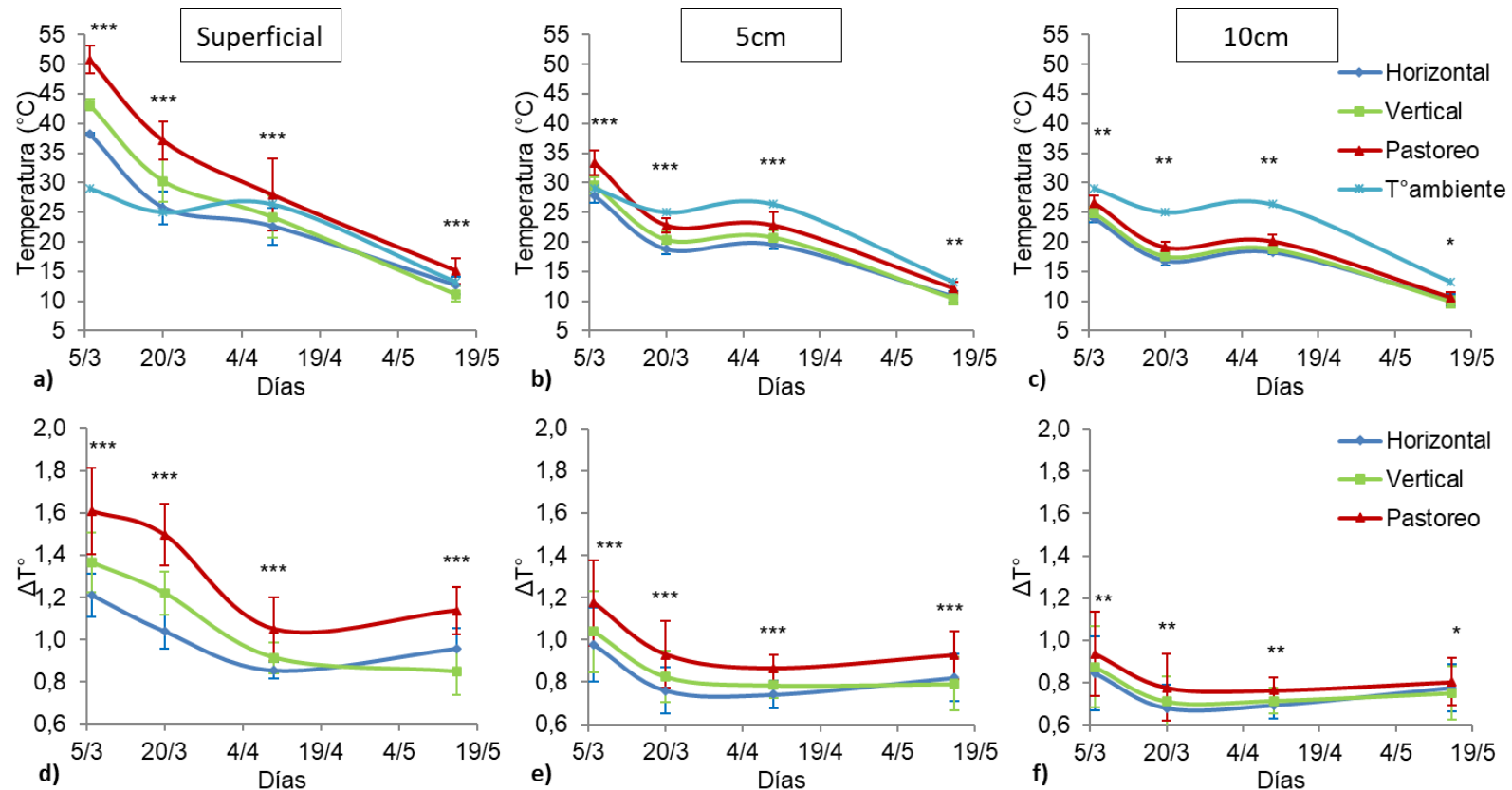


Figura 11. Temperatura del suelo y ambiente (arriba) y diferencial de temperatura del suelo en relación con la temperatura ambiental (ΔT° abajo) durante el barbecho para el cultivo de trigo en tres profundidades de suelo: superficial (a y d), 5 cm (b y e) y 10 cm (c y f); bajo tres disposiciones del rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo).

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***). Ciclo I (2018). T° amb: Temperatura ambiental a las 15:00 h (Estación meteorológica EEA INTA H. Ascasubi).

A nivel superficial, el rastrojo horizontal redujo la temperatura del suelo entre 1 y 5 °C y el ΔT° , respecto del rastrojo vertical (Figura 11). Además, el ΔT° fue más estable en el tiempo. Según Flerchinger *et al.* (2003), los rastrojos planos tienen un albedo mayor, es decir, absorben menos radiación solar (mayor reflectancia) que los rastrojos verticales y, en consecuencia, la temperatura máxima del suelo es inferior. En este sentido, se observó que el rastrojo horizontal amortiguó el efecto de la temperatura ambiental sobre el suelo ($< \Delta T^\circ$). En contraposición, con la menor cobertura de pastoreo la temperatura del suelo ascendió a un máximo de 1,6 veces la temperatura ambiental (Figura 12).

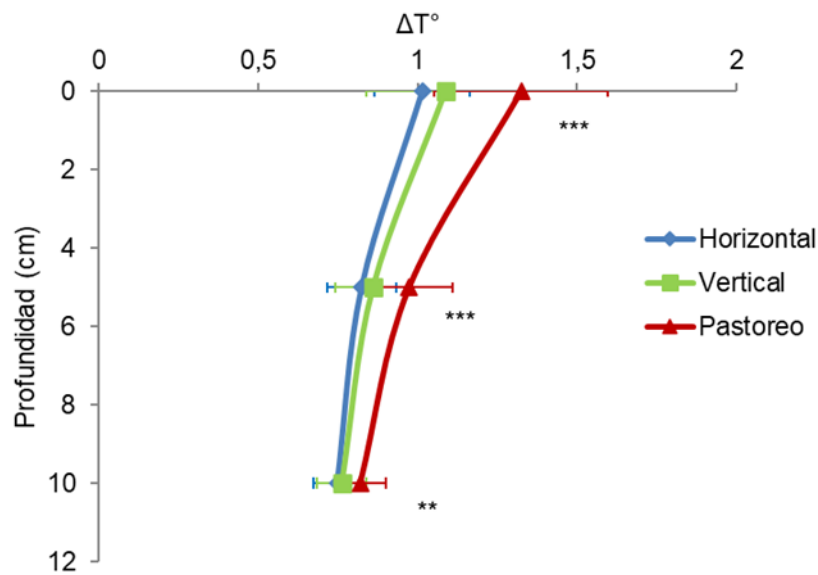


Figura 12. Perfiles de cambios en la temperatura del suelo en relación con la temperatura ambiental a las 15:00 h (ΔT°) para las disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo) en el período de barbecho para el cultivo de trigo. Promedio de tres antecesores en el Ciclo I.

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***)

La biomasa total y disposición del rastrojo parece tener mayor efecto que su altura, diámetro y número de vástagos para bajar la temperatura del suelo. Según Van Doren & Allmaras (1978) la temperatura del suelo depende del área cubierta, y se incrementa cuando supera el 80 %. En concordancia cuando la cobertura pasó del 60 % a superar el 90 % de la disposición vertical a horizontal.

Velocidad laminar del viento

No se observó interacción entre antecesor y disposición en las cuatro alturas de medición para la velocidad del viento máxima, mínima y promedio. En contraposición con Smika (1983), las diferencias en las características físicas del rastrojo de los

antecesoros como la biomasa y el IAT no modificaron la velocidad del viento. En el caso de avena, la mayor densidad de vástagos podría compensar su menor altura de rastrojo (McMaster *et al.*, 2000). Lo inverso fue observado en centeno, con menor número de vástagos por unidad de superficie, pero una mayor altura y, por lo tanto, una estructura del rastrojo más laxa.

Analizando los perfiles de velocidad del viento de las disposiciones, se observó que las mayores diferencias ocurrieron a nivel de la superficie de suelo (Figura 13, Zubiaga *et al.*, 2020b). En modo análogo a Aase y Siddoway (1980), la mayor reducción de la velocidad del viento en superficie fue mayor para la disposición vertical del rastrojo, alcanzando menores niveles de reducción con rastrojo bajo pastoreo y horizontal (Figura 13, Figura 14). A 40 cm sobre el nivel del suelo, la reducción de la velocidad del viento fue del 63 %, es decir, 26 % mayor con el rastrojo vertical, respecto a horizontal y pastoreo, que no difirieron entre sí (Figura 13, Figura 14). Estos resultados son similares a los obtenidos en las evaluaciones de la velocidad del viento realizadas sobre las tres disposiciones del rastrojo de trigo durante el barbecho previo a la siembra de los antecesoros del Ciclo II (por más detalles véase Anexo 7).

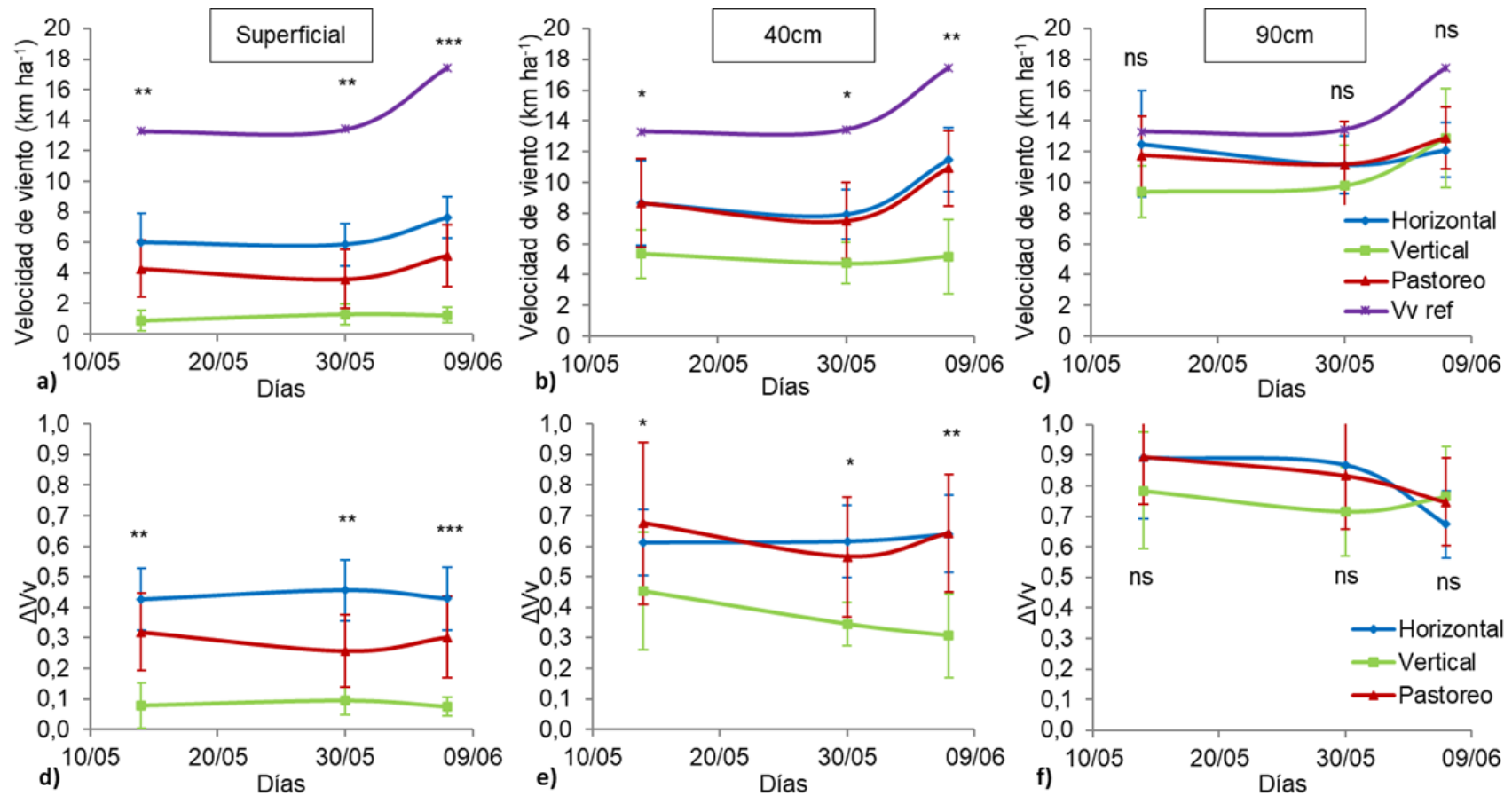


Figura 13. Velocidad del viento (arriba) y relación de velocidad del viento con la velocidad medida a 200 cm (ΔV_v , abajo) durante el barbecho para el cultivo de trigo en tres alturas: superficial (a y d), 40 cm (b y e) y 90 cm (c y f); bajo tres disposiciones del rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo). Ciclo I (2018).

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***)

La evaporación del agua del suelo se encuentra influenciada por la velocidad del viento en la superficie del suelo y la disposición del rastrojo parece tener el mayor impacto. Por lo tanto, la disposición vertical del rastrojo parece ser más efectiva para reducir la velocidad del viento y, en consecuencia, la evaporación, que la disposición horizontal. Esto se contradice con Smika (1983), quién observó que la pérdida de agua del suelo fue mayor con el aumento de la velocidad del viento, independientemente de la disposición (vertical o aplanada) del rastrojo que cubre el suelo.

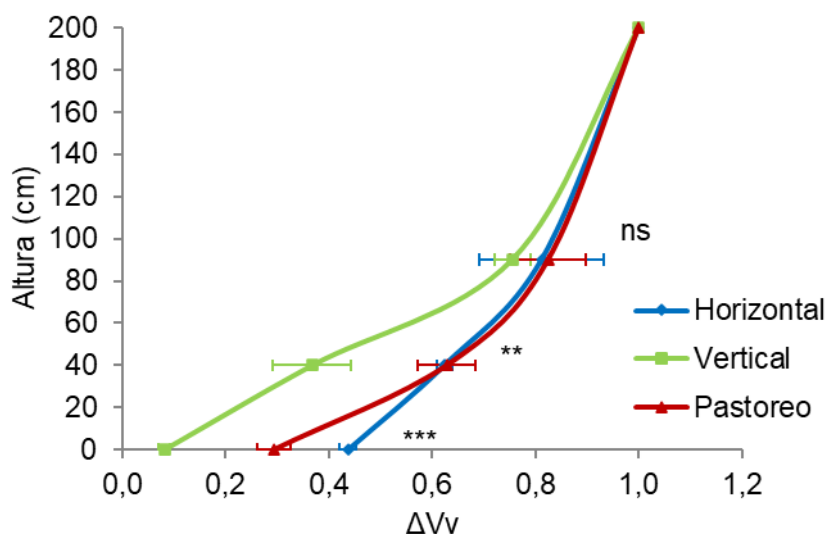


Figura 14. Perfiles de velocidad del viento (ΔVv = velocidad del viento en relación con la velocidad medida a 200 cm) de las tres disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo) en función de la altura respecto de la superficie del suelo. Promedio de tres fechas de medición. Ciclo I (2018).

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***)

Humedad del suelo

Cultivo de los antecesores

La siembra de los antecesores en los dos ciclos estudiados se realizó bajo similares condiciones de humedad del suelo. En los dos ciclos, el barbecho previo había acumulado más de 200 mm en todo el perfil (entre 210 y 230 mm).

Al final del cultivo de los antecesores, el contenido de agua del suelo fue mayor con avena, seguido de centeno y trigo (Tabla 10). Asimismo, estas diferencias fueron bajas, es decir, entre 16 y 25 mm. Ello podría explicarse en la longitud del ciclo a madurez, que en avena abarcó 165 días, es decir, unas dos semanas menos que el centeno y trigo. Es decir, se presume un menor consumo de agua por el cultivo de avena, pero al no

registrarse precipitaciones durante las dos semanas de diferencia entre las especies no permitió expresar en mayor medida el incremento en la humedad residual en el suelo.

Tabla 10. Lámina de agua total (LAT) en diferentes estratos del perfil luego de la cosecha de los antecesores (trigo, centeno y avena) del trigo, para el Ciclo I y II.

Antecesor	Estrato edáfico [cm]				
	0-20	20-40	40-60	60-90	0-90
LAT [mm]					
Ciclo I					
Trigo	18 b	32 b	42 ab	82 b	174 b
Centeno	19 b	31 b	41 b	83 b	174 b
Avena	20 a	35 a	45 a	90 a	190 a
ANOVA					
Antecesor	**	**	**	*	**
Ciclo II					
Trigo	15 b	34	42 b	82 b	173 b
Centeno	15 b	33	47 a	102 a	198 a
Avena	20 a	36	49 a	93 a	198 a
ANOVA					
Antecesor	***	ns	***	***	***

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***). Por cada estrato y ciclo, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Cultivo de trigo

No se observó diferencias en la lámina de agua total debidas a los antecesores y las disposiciones, ni tampoco hubo interacción. En ambos ciclos, el contenido de agua osciló entre 190 y 220 mm en el perfil. Asimismo, el antecesor centeno mostró una tendencia a acumular mayor contenido de humedad del suelo a la siembra del trigo. El antecesor trigo tendió a dejar la menor humedad a la siembra del trigo posterior.

Teniendo en cuenta la limitación en la profundidad de muestreo realizada (hasta 90 cm), durante todos los años de la experimentación se observó la presencia de agua gravitacional en el estrato edáfico 60-90 cm. Es decir, se determinó entre 10 y 40 mm de agua entre capacidad de campo y saturación. Ello condujo a realizar un estudio de la profundidad de la napa durante el ciclo del cultivo del trigo en 2021 y se determinó el nivel freático a 1,70 m en el momento de la siembra y cosecha. Lo que supone una extensión de la zona semi-saturada del perfil de suelo de 1,10 m (entre 0,60 y 1,70 cm), estimándose en 325 mm de agua disponible (Zubiaga *et al.*, 2022; ver Anexo 8). Si bien no condiciona los efectos en la capa superior del suelo (los primeros 60 cm), es decir, la interfase suelo atmósfera, se presume un aporte extra de agua de la napa. En tanto,

no presentaría un impacto en las etapas iniciales del cultivo, pero sí en estados avanzados que conduciría a sobreestimar los valores de eficiencia de uso de agua, observados en el Capítulo I.

Eficiencia de barbecho

Se observaron diferencias que estuvieron dadas por los antecesores ya que el rastrojo de centeno y trigo fueron más eficientes que el de avena (Figura 15).

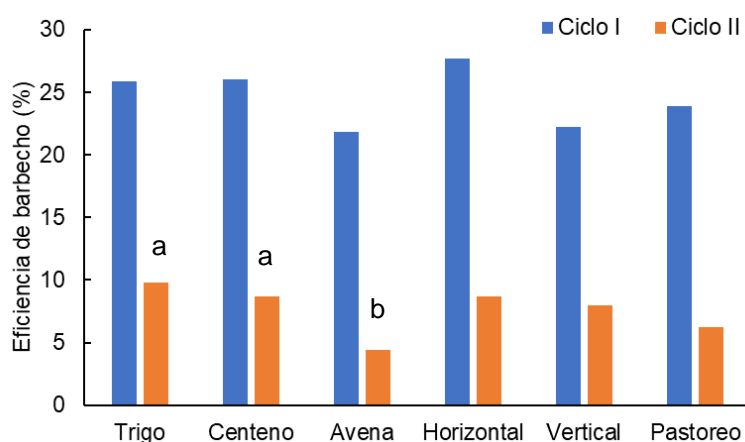


Figura 15. Eficiencia de barbecho previo a la siembra de trigo según los antecesores (trigo, centeno y avena) y las disposiciones del rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo). Ciclos I y II.

Por cada ciclo y factor, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

La disposición horizontal del rastrojo mostró mayores niveles de eficiencia de barbecho, asociado a una menor incidencia de la temperatura. A su vez, el pastoreo de los rastrojos es una práctica que va en contra de la eficiencia de conservación del agua durante el barbecho (Zubiaga *et al.*, 2020a).

En el ACP se observó que la eficiencia de barbecho y lámina de agua total a la siembra del trigo (LATstr) en los primeros 20 cm estuvo correlacionada principalmente con ΔT° . También se correlacionaron, principalmente la LATstr, con el ΔVv a 40 y 90 cm. En este sentido, la temperatura parece tener un impacto relativo mayor que el viento en la eficiencia de barbecho y la humedad a la siembra del trigo (Figura 16).

Se observó que los antecesores centeno y trigo estuvieron más asociados a una mayor eficiencia de barbecho. El centeno se relaciona con la biomasa (BRastFB) y estructura

(IAT) del rastrojo y, en consecuencia, un menor ΔVv a 40 y 90 cm. Resultando en una mayor humedad superficial a la siembra del trigo.

La disposición horizontal del rastrojo se asoció a la eficiencia de barbecho (Figura 16). El rastrojo horizontal se relacionó con una mayor biomasa del estrato inferior y menor ΔT° . Por su parte el rastrojo vertical se relacionó con las características de biomasa (ES) y estructura (IAT) del rastrojo que impactan de manera directa para reducir la velocidad del viento (menor ΔVv), pero mostró menor asociación con la eficiencia de barbecho. Tanto la temperatura como la velocidad del viento tienen una correlación con la eficiencia de barbecho en función de la disposición del rastrojo, pero al igual que tal como se menciona previamente la temperatura parece tener un efecto relativo mayor que el viento sobre esta eficiencia. Se manifestó el efecto negativo de la práctica del pastoreo que mostró menor eficiencia de barbecho asociado al incremento de la temperatura del suelo.

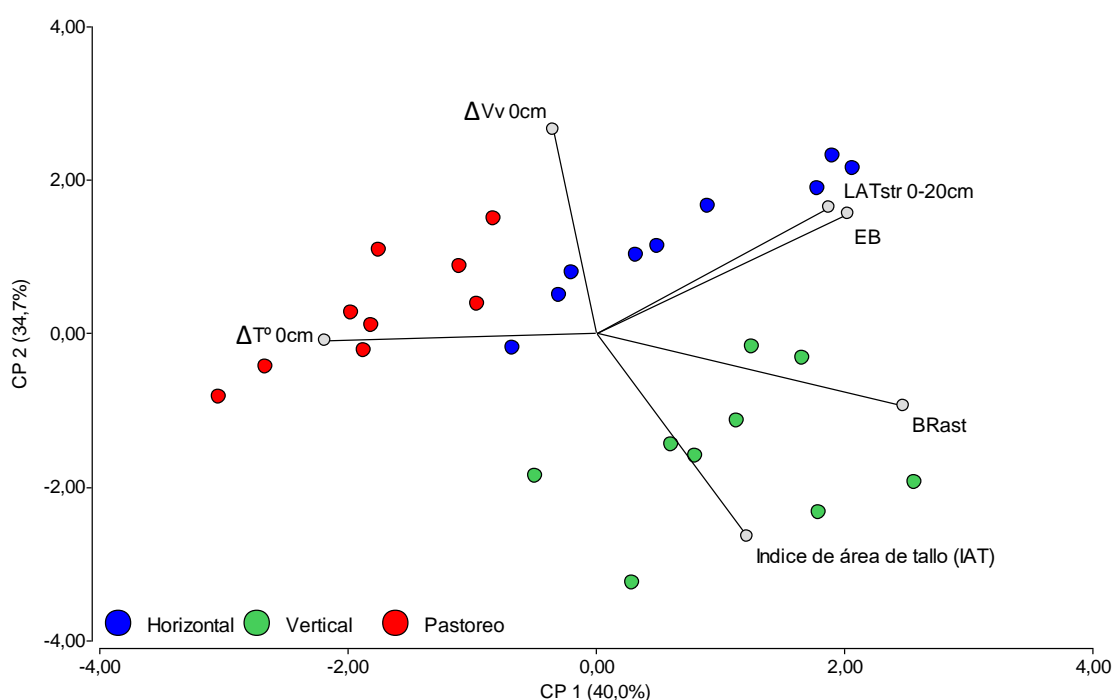


Figura 16. Análisis de componentes principales de las variables de la interfase suelo-atmósfera de las disposiciones del rastrojo durante el barbecho.

BRast: biomasa seca de rastrojo al final del barbecho; IAT: índice de área de tallo; EB: eficiencia de barbecho; LATstr 0-20 cm: lámina de agua total a la siembra del trigo en el estrato edáfico 0-20 cm; ΔVv 0 cm: relación de velocidad del viento a nivel superficial con la velocidad medida a 200 cm; ΔT° 0 cm: relación de temperatura del suelo en superficie con la temperatura ambiental.

Dinámica del agua en el suelo: el caso de una precipitación extrema

La disposición del rastrojo de cosecha del trigo influyó significativamente en el almacenamiento total de agua del suelo hasta 13 días luego de la precipitación extrema (Zubiaga *et al.*, 2020c). El efecto de la disposición del rastrojo presentó diferencias significativas hasta los 40 cm de profundidad (estratos de 0-10, 10-20 y 20-40 cm). Las mayores diferencias se presentaron en los primeros 10 cm de suelo y los días inmediatos posteriores a la precipitación, luego fueron disminuyendo en las capas inferiores y los sucesivos días (Figura 17, ver Anexo 9).

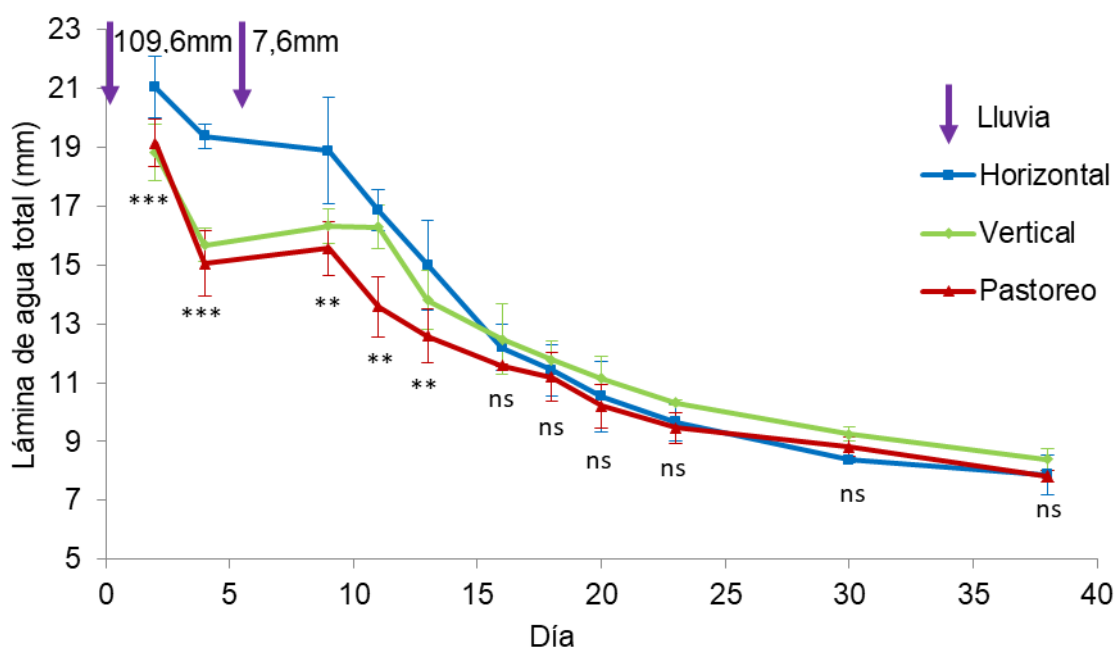


Figura 17. Contenido de agua (mm) en los primeros 10 cm de suelo durante el barbecho previo a la siembra del trigo del Ciclo II (2019).

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***).

La evolución del contenido de agua edáfica en las capas estudiadas y en el total del perfil (0-60 cm) hasta 13 DDP, se observó que el mayor efecto de la disposición del rastrojo se manifestó en los primeros 10 cm del horizonte (ver Anexo 9). En esa capa superior, la disposición horizontal del rastrojo retuvo mayor contenido de agua, superando la vertical y pastoreo (Figura 17). El rastrojo horizontal presentó entre 26 y 40 mm más de agua en suelo (0-40 cm hasta 13 DDP) que vertical y pastoreo, respectivamente. Swella *et al.* (2015) observaron menores pérdidas por evaporación directa en suelos cubiertos con rastrojos dispuestos horizontalmente. Si bien estos autores observaron mayor intercepción del agua de lluvia con el aumento de la altura del rastrojo, ello no ocurrió en el presente estudio. Es decir, la disposición vertical o el

pastoreo del rastrojo acumularon menores valores de humedad en el suelo, a pesar que la altura era de 33 y 11 cm ($6,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$) respectivamente, mientras que rastrojo horizontal presentaba una altura de solo 3 cm. Estas observaciones asignan un rol crucial a la disposición del rastrojo, por encima de otros componentes de la estructura y la biomasa total.

Varios estudios han demostrado que una cantidad significativa de agua es interceptada por los rastrojos y se evapora directamente a la atmósfera sin llegar al suelo tras eventos de lluvia escasa, es decir, inferiores a 20 mm (Zhai *et al.*, 1990; Cantero-Martinez *et al.*, 2007; Passioura & Angus, 2010; Sommer *et al.*, 2012). En este estudio, luego de un evento de precipitación de 7,6 mm se manifestó un leve incremento en el contenido de agua del estrato superior del suelo solo con rastrojo vertical y pastoreo, mientras que con rastrojo horizontal la humedad superficial continuó decayendo. El elevado porcentaje de cobertura del rastrojo horizontal ($> 90 \%$), podría constituir una barrera para disminuir la entrada de agua al suelo cuando ocurren eventos de baja precipitación, en los que el agua de lluvia se evapora directamente sin alcanzar el suelo. Entonces, la disposición horizontal podría resultar poco adecuada en los eventos de precipitación de bajo volumen, pero resultar adecuada para mejorar su efecto ante eventos de precipitación mayores.

Los resultados encontrados sugieren que en sistemas de L0 la disposición horizontal del rastrojo podría aumentar la cantidad de agua almacenada en el suelo en un período corto, menor a dos semanas, luego de eventos de precipitación abundante. La tendencia a bajar la temperatura del suelo observada con el rastrojo horizontal reduciría las pérdidas por evaporación inmediatamente después de un evento de lluvia. Esta condición permitiría que el agua se mueva en profundidad en el perfil del suelo (Wills & Bond, 1971). Dependiendo de la cantidad, frecuencia e intensidad de la precipitación, podría traducirse en una mejora de la gestión del agua del suelo.

Conclusiones

Se acepta la hipótesis. Los cereales antecesores y principalmente la disposición del rastrojo determinaron grandes diferencias en los componentes de la estructura de la cobertura del suelo. Afectaron el índice de área de tallo, la biomasa total y su proporción en estrato superior e inferior. Las características genéticas de los antecesores, que definen el número de vástagos y la altura del rastrojo luego de la cosecha, y la

modificación en la disposición proporcionan alternativas de manejo del rastrojo en función de las características climáticas de cada ambiente.

La estructura del rastrojo de los cereales invernales modificó el grado de exposición de las capas superiores de suelo a los efectos del viento y la temperatura durante el período de barbecho para trigo principalmente debido a la disposición, pero no así por los antecesores.

Los cambios en la incidencia de la temperatura y viento sobre la capa superficial del suelo impactaron en la dinámica del agua del suelo. La disposición horizontal del rastrojo redujo la temperatura del suelo, la cual tuvo un impacto relativo mayor sobre la eficiencia de barbecho y la humedad a la siembra del trigo. Además, aumentó el almacenamiento total de agua en las capas superiores del suelo hasta 13 días posteriores al evento de precipitación extrema hasta 40 cm de profundidad. Principalmente en los primeros centímetros de suelo y en los días inmediatos posteriores al evento.

La disposición del rastrojo y los antecesores impactaron en los factores que componen la interfase suelo-atmósfera y, en consecuencia, en la dinámica del agua en el suelo. Por lo tanto, no solo debería evaluarse el porcentaje de cobertura como la proyección del rastrojo sobre la superficie del suelo, sino que como se propone se debe tener en cuenta la biomasa total de rastrojo, compuesta por el estrato superior e inferior, y la estructura del rastrojo, definida por el IAT y la disposición. Aquellas prácticas de manejo como la elección del antecesor y, principalmente, las que afecten la disposición de los rastrojos de cosecha pueden modificar el microclima de la interfase suelo-atmósfera durante el barbecho y en consecuencia mejorar la eficiencia de gestión del agua en el suelo en el semiárido austral pampeano.

Capítulo III

Desarrollo de un prototipo de escáner LiDAR aplicado al análisis tridimensional de la cobertura vegetal del suelo

Introducción

A la luz de una creciente población mundial y el cambio climático, se acentúa la necesidad de estrategias de manejo sostenible para mantener y mejorar la calidad del suelo y, en consecuencia, la producción agrícola. La conservación del recurso suelo es de suma importancia para lograr una producción sostenible. La agricultura de conservación (AC) ha sido promovida como una herramienta de gestión integrada que incluye: labranza conservacionista, rotaciones de cultivos, manejo de residuos y cultivos de cobertura (Abdollahi & Munkholm, 2014). Se considera que estas técnicas conducen a mitigar los efectos erosivos del viento y la lluvia, la reducción de emisión de gases con efecto invernadero, la mejora en la calidad y aumento del almacenamiento de agua del suelo, y la productividad de los cultivos (Mbuthia *et al.*, 2015).

La labranza conservacionista consiste en reducir la exposición del suelo, manteniendo siempre la presencia de cobertura vegetal sobre la superficie. Por lo tanto, la retención de residuos vegetales o rastrojos de cultivos es clave en los sistemas de AC (FAO, 2012). Según la FAO, para ser considerada AC la cobertura mínima del suelo debe alcanzar el 30 % de la superficie. Límite por debajo del cual se hace más importante el riesgo de procesos erosivos. Este nivel crítico de cobertura vegetal debe ser establecido para cada sitio específico, según el tipo de suelo y condiciones del ambiente (López *et al.*, 2015).

La cuantificación de la cobertura superficial del suelo resulta en un proceso útil para la caracterización de los distintos ambientes en función del manejo realizado. Dicha cuantificación puede ser realizada de diversas maneras. Por un lado, a campo, mediante observaciones visuales directas, ya sea de forma lineal mediante la utilización de transectas o implementando criterios de delimitación de superficies medibles. Por el otro, en gabinete, apoyándose en imágenes satelitales, aéreas o tomadas en campo, y en diferentes programas informáticos encargados de delimitar y clasificar la información visual (Pulido *et al.*, 2011).

Uno de los principales métodos que se aplica frecuentemente, utiliza una imagen digital tomada con una cámara a 1,2 m de altura, de una porción de suelo delimitada por un marco cuadrado de 0,25 m² (0,5 x 0,5 m). Posteriormente, la imagen se procesa mediante una aplicación desarrollada por el INTA, llamada CobCal v2.1 (Ferrari *et al.*, 2006). Para medir el porcentaje de cobertura vegetal, el software CobCal requiere que el usuario marque los colores de los píxeles que corresponden a la cobertura como píxeles positivos y los colores que corresponden al suelo como píxeles negativos.

Luego, estableciendo un valor umbral, los píxeles se clasifican por distancia euclidiana y se calcula el porcentaje de cobertura contando el número de píxeles que corresponden a cada grupo. Los diferentes parámetros que utiliza este software son configurados por el usuario y el método no es completamente objetivo ya que los resultados dependen de la percepción y experiencia del usuario.

Numerosos trabajos mencionan el uso de la tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aplicada en la obtención de la superficie foliar y de diferentes parámetros vegetativos en cultivos arbóreos (Tumbo *et al.*, 2002; Wei & Salyani, 2004 y 2005; Sanz *et al.*, 2004 y 2005) y cultivos herbáceos (Ehlert *et al.*, 2007), permitiendo caracterizar la estructura vegetativa de los cultivos. La utilización del LiDAR supone una elevada generación de información que puede ser evaluada posteriormente mediante diversas metodologías. El denominador común de todas estas metodologías es la relación existente entre el volumen de vegetación y la superficie foliar (Tumbo *et al.*, 2002; Wei & Salyani, 2004; Palacín *et al.*, 2007; Llorens, 2005; Llorens *et al.*, 2007).

A pesar del papel fundamental que cumple la cobertura del suelo en el mantenimiento de la calidad edáfica, son escasos los trabajos que determinan la presencia de residuos en superficie, probablemente debido a la dificultad para el muestreo y cuantificación de la cobertura. La importancia de determinar la cobertura del suelo radica en que la mayoría de las ventajas de los residuos en superficie (inhibición de malezas, control de la erosión y disminución de la evaporación) dependen del grado de cobertura del suelo (Naudin *et al.*, 2012).

En aquellos trabajos donde se analiza la relación entre cantidad de residuos en superficie (kg MS ha^{-1}) y la cobertura del suelo (%), es habitual encontrar una gran dispersión en los datos, obteniéndose una muy baja relación entre estas variables. Es decir, en distintos lotes se han determinado valores muy similares de cobertura con una gran diferencia en la cantidad de rastrojos (95 y 100 % de cobertura con 3615 y 6900 kg ha^{-1} de rastrojo de trigo, respectivamente). Esa baja explicación de la variación de la cobertura por la presencia de residuos en superficie se debe, por un lado, a la variabilidad de materiales analizados, los que tienen relaciones cantidad/cobertura muy variables y, por el otro, a la variación en su disposición y estructura, ya que ejercen una gran influencia en el porcentaje de suelo cubierto. Aquellos casos en que los rastrojos se presentan en su mayoría con una disposición horizontal, se logra una mayor cobertura del suelo, con cantidades de residuos inferiores (López *et al.*, 2015).

Una de las principales limitaciones que presenta la expresión de la cobertura en términos de porcentaje es que se representa en un único plano (bidimensional). Sin embargo, se conoce que la dimensión tridimensional o estructura del rastrojo determina grandes diferencias que no se ven reflejadas en un parámetro bidimensional. Por lo tanto, esta determinación resulta muy importante ya que modifica el microclima de la interfase suelo-atmósfera y, por lo tanto, el grado de conservación del suelo y el agua (McMaster *et al.*, 2000).

En ambientes marginales para la agricultura de secano, como el semiárido austral pampeano, la estructura de los residuos vegetales se encuentra altamente modificada por la variabilidad estacional y anual de las precipitaciones. También lo afecta la marcada variabilidad de los manejos realizados por los productores agropecuarios. Estos factores pueden modificar tanto el volumen de los residuos de las cosechas, así como su tasa de descomposición durante el barbecho.

Una innovación frugal (Simula *et al.*, 2015) adquiere particular relevancia cuando es el resultado de un proceso de carácter social que genera aprendizajes, capacidades y se implementan soluciones simples y útiles, pero muy efectivas, a problemas concretos a partir de procesos de bajo costo (Pansera & Sarkar, 2016, Pansera *et al.*, 2017). Se consideró que el desarrollo de un equipamiento sencillo para realizar las mediciones de la estructura de la cobertura de residuos vegetales podría colaborar en adaptar las prácticas de manejo a las condiciones de clima semiárido. En el presente Capítulo se trabajó en el desarrollo de un prototipo de escáner portátil para la determinación de la composición tridimensional de la cobertura del suelo.

La Hipótesis planteada fue:

Es factible desarrollar una metodología de medición de la cobertura vegetal del suelo en tres dimensiones incorporando, a la descripción bidimensional, la escala vertical de la distribución de la cobertura del suelo.

El Objetivo del presente Capítulo fue:

Desarrollar y evaluar un prototipo como instrumento de medición y análisis de la estructura tridimensional de la cobertura vegetal senescente del suelo.

Materiales y Métodos

Diseño técnico del prototipo

La elección de la tecnología para el escáner LiDAR se realizó priorizando dos aspectos, por un lado, la disponibilidad de los componentes en el mercado y, por el otro, la accesibilidad que está principalmente limitada por el costo, basado en experiencias previas (ArduinoHome, 2017). Los detalles constructivos del equipo fueron informados en Micheletto *et al.* (2018, 2020b). Este proyecto generó información para la realización de dos tesis doctorales. Por un lado, el diseño técnico y computacional y elaboración del prototipo de escáner (Micheletto, 2020a) y, por el otro, la aplicación del equipamiento sobre las evaluaciones agronómicas de la estructura de la cobertura vegetal del suelo y su relación el microclima de la interfase suelo-atmósfera (la presente tesis).

La construcción del escáner LiDAR constó de tres etapas. La primera, un sistema mecánico para el accionamiento del barrido a realizar con el sensor de distancia. La segunda, un sistema electrónico para el control de dicho mecanismo y del sensor de distancia. La última, un software para la adquisición y almacenamiento de los datos.

El sistema mecánico permitió el posicionamiento del sensor o arreglo de sensores en cualquier posición de un plano horizontal paralelo al suelo. Este mismo mecanismo es generalmente utilizado en las impresoras 3D y se engloba dentro de los sistemas CNC (Computer Numerical Control). Se optó por el esquema CoreXY, adoptado inicialmente por el proyecto RepRap (RepRapHome, 2017), que consta de dos sistemas de poleas. Cada uno accionado por motores que tienen posiciones fijas, a diferencia de mecanismos tradicionales donde debe haber motores montados sobre el carro deslizante (Figura 18).

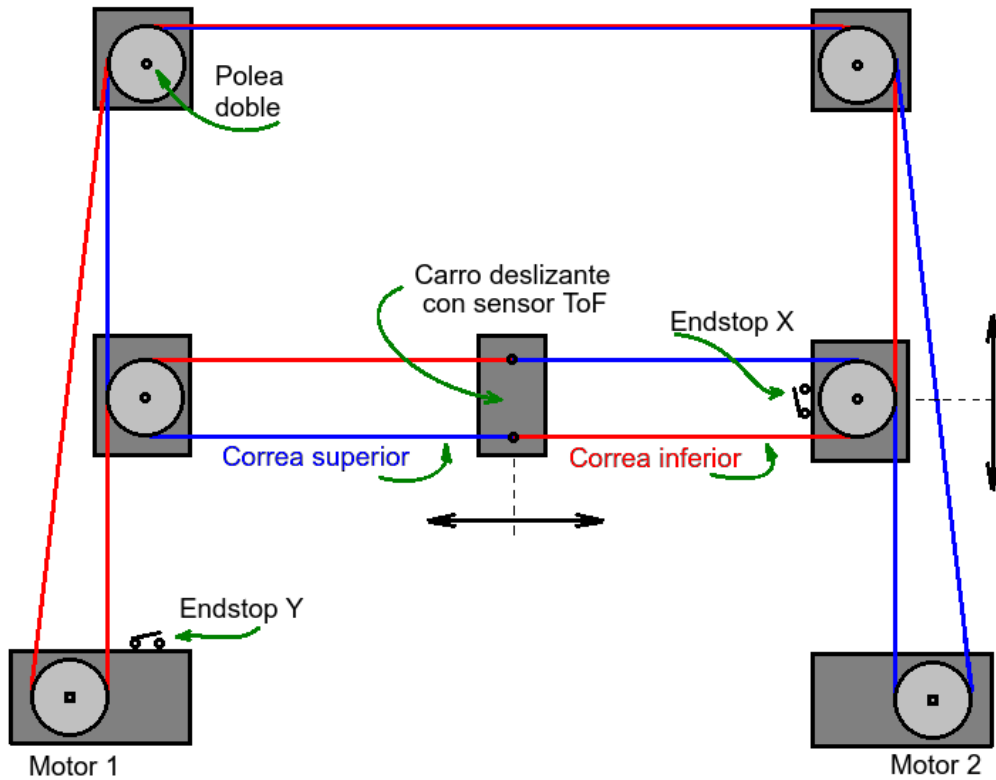


Figura 18. Vista superior del sistema CoreXY para el accionamiento del sensor.

Para implementar el sistema mecánico se utilizaron varillas de acero rectificadas, rodamientos lineales y las piezas de encastre para toda la estructura se diseñaron mediante software CAD (Computer-Aided Design) y se imprimieron en PLA (Ácido Poliláctico). El mecanismo era accionado por motores de paso a paso modelo BYJ48, los cuales son de muy bajo costo y suelen tener buena disponibilidad en el mercado local. La ventaja de usar motores de paso a paso respecto de motores de corriente continua radica en que el control de posición puede realizarse sin la incorporación adicional de sensores de posición.

El modelo seleccionado para el sensor de distancia estuvo basado en el chip VL53L0X de STMicroelectronics, que funciona con tecnología VCSEL (Láser Emisor de Superficie de Cavidad Vertical). Este permite calcular una distancia máxima de 2 m hasta una superficie reflectante, a partir de la medición del tiempo de vuelo de un pulso de luz (ToF, por sus siglas en inglés).

El resto del sistema electrónico se compuso de módulos de prototipado, como un módulo Arduino Nano basado en el microcontrolador ATmega328p y un módulo de comunicación Bluetooth 4.0 basado en el integrado CC2541 de Texas Instruments.

Para el software de adquisición de datos, se propusieron dos alternativas. Por un lado, una conexión USB (Bus Universal en Serie) para registrar los datos de medición con cualquier software de monitoreo de puerto serie. Por el otro, se dispuso una aplicación móvil para sistemas operativos Android que permite vincular el teléfono inteligente con el escáner por medio de un enlace Bluetooth. Las dos opciones contemplaron la etapa de adquisición de datos, lo cual permitió, para cada medición realizada, disponer de un registro en formato CSV (Valores Separados por Coma) con el conjunto de coordenadas X, Y, Z de cada punto del modelo tridimensional.

Pruebas experimentales

Para realizar la puesta a punto y ajustes del prototipo se realizaron una serie de pruebas en laboratorio y al aire libre.

Para las pruebas en laboratorio se elaboraron dos maquetas que simulaban una porción del suelo con rastrojo de trigo, evitando la exposición a la intemperie.

La maqueta 1 (M1) consistió en una base de poliestireno expandido con una superficie de 0,175 m² (0,50 x 0,35 m), recubierta con el horizonte superficial del suelo (Haplustol éntico) del lote experimental de la EEA INTA Hilario Ascasubi, de características mencionadas en el Capítulo 1. Sobre esta base se insertaron dos hileras de rastrojos de trigo separadas a una distancia de 0,175 m (Figura 19). Cuya medida de espaciamiento entre hileras es comúnmente observada en lotes con cultivos de invierno en los establecimientos de productores agropecuarios de esta región. Los vástagos del rastrojo se cortaron a una altura de 0,35 m respecto del nivel del suelo, simulando el corte realizado por la máquina cosechadora de granos. La M1 se utilizó para realizar las siguientes evaluaciones: análisis de error, frecuencia de muestreo y posicionamiento del escáner (incidencia de la altura del sensor).



Figura 19. Maqueta representando una porción de suelo con rastrojo de trigo.

La maqueta 2 (M2), de $0,16 \text{ m}^2$ ($0,40 \times 0,40 \text{ m}$), se elaboró sobre un suelo de cemento, el cual se cubrió con tierra (la misma que se menciona en la M1). Sobre este se establecieron cuatro escenarios de coberturas con rastrojo de trigo distribuidos horizontalmente sobre la superficie del suelo. En cada escenario se realizó la medición con el escáner. Luego se tomó una fotografía del rastrojo contenido en cada marco, desde una altura de $1,2 \text{ m}$. Las fotografías se procesaron mediante el programa CobCal v2.1, para estimar el porcentaje de suelo cubierto por los rastrojos (López *et al.*, 2015). Se recolectó el rastrojo y se llevó hasta peso seco mediante estufa (60° por 48 h) para estimar biomasa por unidad de superficie (kg ha^{-1}). Esta maqueta se utilizó para evaluar el grado de cobertura del suelo.

Las pruebas al aire libre se realizaron en dos sitios:

Una prueba (AL1) se realizó sobre un piso plano de cemento con y sin cubrir el prototipo con una lona para impedir el paso de la luz. Sobre esta, se determinó la influencia de la luz solar en la precisión del sensor láser, ya que es sensible a interferencias de luz ultravioleta.

La otra prueba (AL2) se realizó sobre una microparcela de rastrojo de trigo ubicada en el campo experimental del Departamento de Agronomía de la UNS (Figura 20). Sobre esta se calibró la frecuencia de muestreo en la obtención de un modelo suficientemente preciso y representativo de la superficie a medir.



Figura 20. Microparcela de rastrojo de trigo en el Departamento de Agronomía de la UNS, Bahía Blanca.

Evaluaciones

Frecuencia de muestreo y análisis de error

La frecuencia de muestreo del instrumento se relaciona con la precisión del modelo, de igual manera que la resolución de una fotografía digital se asocia con la calidad de una imagen.

El error de medición asociado al instrumento se relacionó, por un lado, al error de medición de distancia del sensor láser y, por el otro, al error de posicionamiento del sistema mecánico. El primero pudo acotarse dado el error indicado por el fabricante que establece un margen del 6 % de error relativo, lo cual es aceptable si se compara con la técnica tradicional que consiste en usar cinta métrica. Para el cálculo de error del sistema mecánico deben incluirse algunos factores difíciles de analizar como el estiramiento de las correas y el desgaste de las poleas.

Las evaluaciones de estos parámetros se realizaron en AL2 y M1. Luego, a partir del modelo de máxima resolución en M1, se realizó un submuestreo aleatorio sin reemplazo por medio de un software, simulando el uso de distinta densidad de puntos.

Posicionamiento del escáner

El sensor de distancia tiene un campo de visión (FoV, por sus siglas en inglés) que forma un cono de 25 grados (STMicroelectronicsHome, 2018). La medición del tiempo de vuelo

se realiza a partir de la captura del reflejo del haz de luz sobre la superficie de reflexión cuya área aumenta conforme el objetivo se aleja del sensor. Al ampliarse el área de detección, el sensor pierde la capacidad de detectar objetos pequeños, ya que éstos reflejan débilmente la señal lumínica comparada con el fondo que puede estar más lejos. Por lo tanto, se realizó una serie de escaneos de la M1 y AL1 variando la altura del escáner. En el primer caso se ubicó el escáner entre 36 y 52 cm del suelo con incrementos de 2 cm y, en el segundo caso se elevó hasta 100 cm.

Influencia de la luz solar

Se realizó la medición sobre AL1 con y sin la presencia de luz solar. Luego, se compararon los desvíos estándar cuadráticos de cada medición.

Porcentaje de cobertura

Para evaluar las capacidades del escáner en la determinación de este factor se realizaron mediciones en los cuatro escenarios de cobertura del rastrojo en M2. Previo al escaneo se determinó el grado de cobertura y la biomasa de rastrojo tal como se menciona previamente.

Resultados y Discusión

El prototipo de escáner permitió obtener una nube de puntos de la superficie envolvente que aproxima la geometría de la cobertura vegetal. Se avaluó la precisión de esta envolvente para copiar la estructura real de la cobertura con los siguientes parámetros:

Frecuencia de muestreo y análisis de error

Se logró una alta frecuencia de muestreo al incrementar la densidad del barrido a realizar con el sensor por medio del sistema mecánico. En consecuencia, se aumentó el tiempo de escaneo, reduciendo la efectividad del proceso de medición de la cobertura vegetal. Por este motivo, se procedió a identificar el balance adecuado entre la resolución del modelo y el tiempo de escaneo, con el menor impacto de la frecuencia de muestreo en el error de medición.

El modelo obtenido en AL2 presentó una frecuencia de 2279 puntos, de los cuales alrededor del 20 % se descartó debido a que correspondían a ecos no recibidos. El modelo de máxima resolución obtenido en M1 se correspondió con 15500 muestras y se estimó un error relativo de hasta el 14 % en el posicionamiento del cabezal de

medición. Luego, a partir del submuestreo aleatorio de este modelo, se observó un incremento del error en la determinación de la altura del modelo al reducir la densidad de puntos (Figura 21). Con un submuestreo del 1 % (equivalente a una densidad de 150 datos) la altura máxima medida tuvo un error relativo promedio del 13 %, mientras que con un submuestreo del 10 % (modelo de 1500 datos), el error relativo de la altura máxima se redujo, aproximadamente, al 1,2 % (Figura 21).

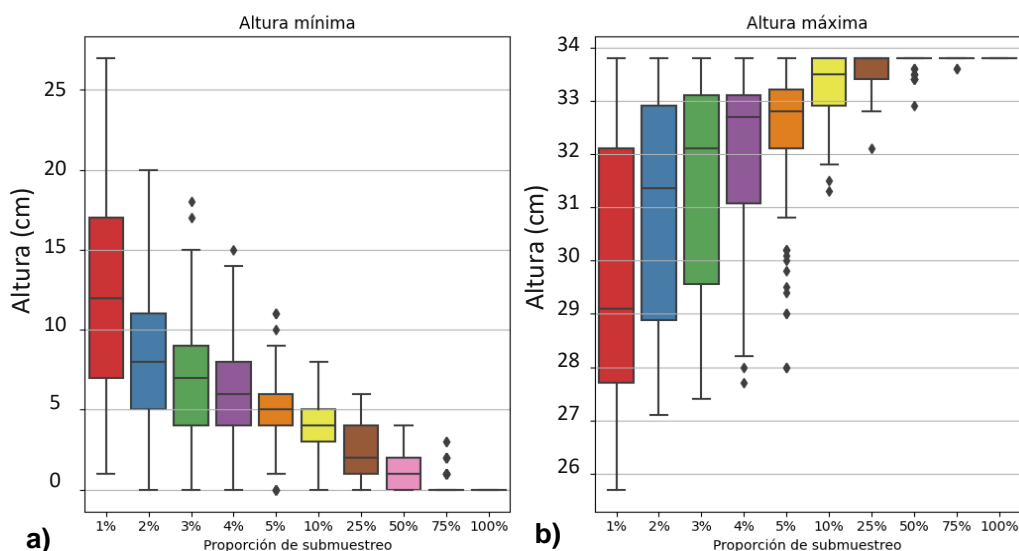


Figura 21. Altura mínima (a) y máxima (b) obtenida a partir del submuestreo del modelo de la M1.

Asimismo, la frecuencia de muestreo no afectó significativamente la precisión del modelo, pero influyó ampliamente en el tiempo de muestreo ya que se requiere incrementar el número de pasadas a realizar con el barrido mecánico. Por este motivo, se fijó un número de 1500 puntos por modelo como valor de resolución recomendada para permitir agilizar la captura manteniendo un buen nivel de precisión. Bajo estas condiciones, el instrumento demora alrededor de 12 minutos en completar el escaneo de un marco de 0,40 x 0,40 m.

Posicionamiento del escáner

Se observó que con distancias por encima de 70 cm se pierde el eco necesario para calcular la distancia y el sensor no retorna correctamente el valor que se debe medir. Además, se observó que en la medida que se ubica el escáner en una posición más alejada del nivel superior del rastrojo, se incrementa el error en la medición. El mayor efecto se produjo sobre la altura máxima, con un incremento en el error de hasta un 35 % relativo al valor real (Figura 22).

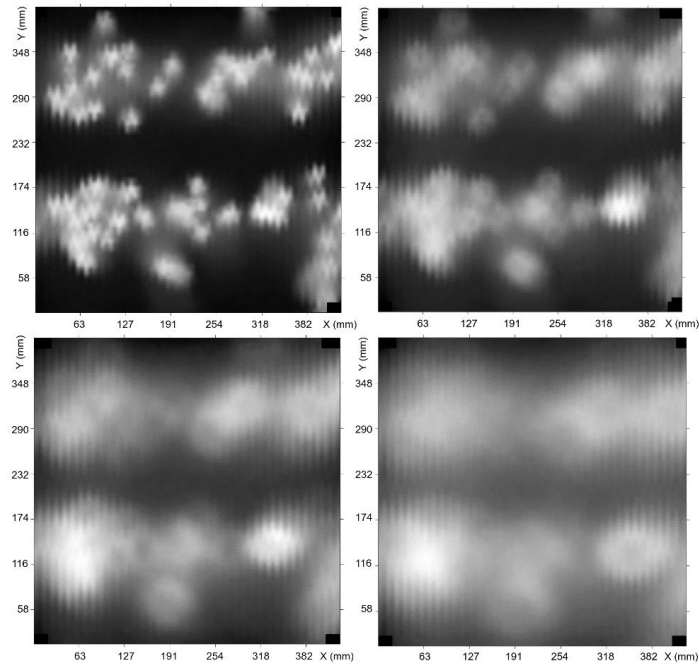


Figura 22. Difuminación del modelo escaneado en función de la altura de escaneo.

Para resolver este inconveniente se agregó a la estructura de soporte del escáner un mecanismo que permite regular manualmente su altura. De esta manera, previo a realizar el escaneo se debe posicionar el instrumento lo más cercano al suelo y/o a la cobertura vegetal, sin que estas superen la altura del sensor para que no interfieran en el mecanismo, con el fin de reducir el error del modelo generado.

Influencia de la luz solar

Las distancias registradas por el sensor láser presentaron una dispersión de 1,82 para la medición con presencia de luz solar y 1,69 al cerrar completamente el espacio de medición (Figura 23).

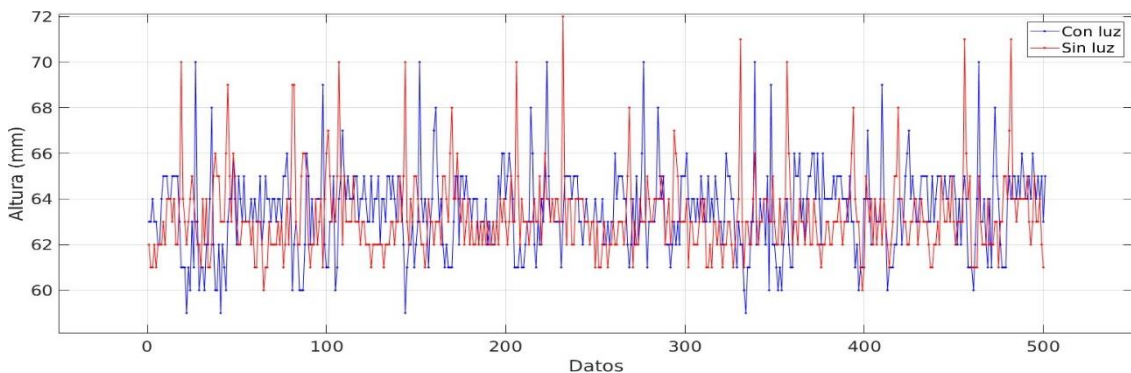


Figura 23. Valores de distancias registrados por el sensor láser al realizar la medición con y sin presencia de luz solar.

Si bien la diferencia en cada caso fue baja, la exclusión de la luz solar en el área a escanear mejoró la lectura debido a que la componente ultravioleta de la luz solar produce interferencia con el haz de luz del sensor láser. Además, se obtuvo el beneficio adicional de evitar el movimiento del material vegetal durante el escaneo por la acción de este factor. Ello resultó en una imagen más precisa, evitando su distorsión.

Porcentaje de cobertura

Las coberturas resultantes de las evaluaciones visuales y experimentales fueron entre 30 % (1,5 Mg ha⁻¹) y 70 % (7,2 Mg ha⁻¹; Tabla 11, Figura 24). Al medir con el escáner se observó que no era posible estimar el grado de cobertura de suelo para estos cuatro escenarios de coberturas planteados. Esto se debió a que el escáner no arroja una medida de altura absoluta de la cobertura en contacto con la superficie del suelo, sino que es relativa al punto capturado más distante del sensor, que a veces puede mostrar una medida inferior. El motivo principal fue que la cobertura se dispuso horizontalmente sobre la superficie del suelo y, principalmente en los escenarios 3 y 4, que la densidad de esa cobertura no permitió que el sensor capture la distancia al suelo.

Tabla 11. Grado de cobertura y biomasa de rastrojo en los cuatro escenarios de coberturas en M2.

	Grado de cobertura	Biomasa de rastrojo
Escenarios	%	Mg ha ⁻¹
1	30	1,5
2	42	2,8
3	57	4,4
4	69	7,2

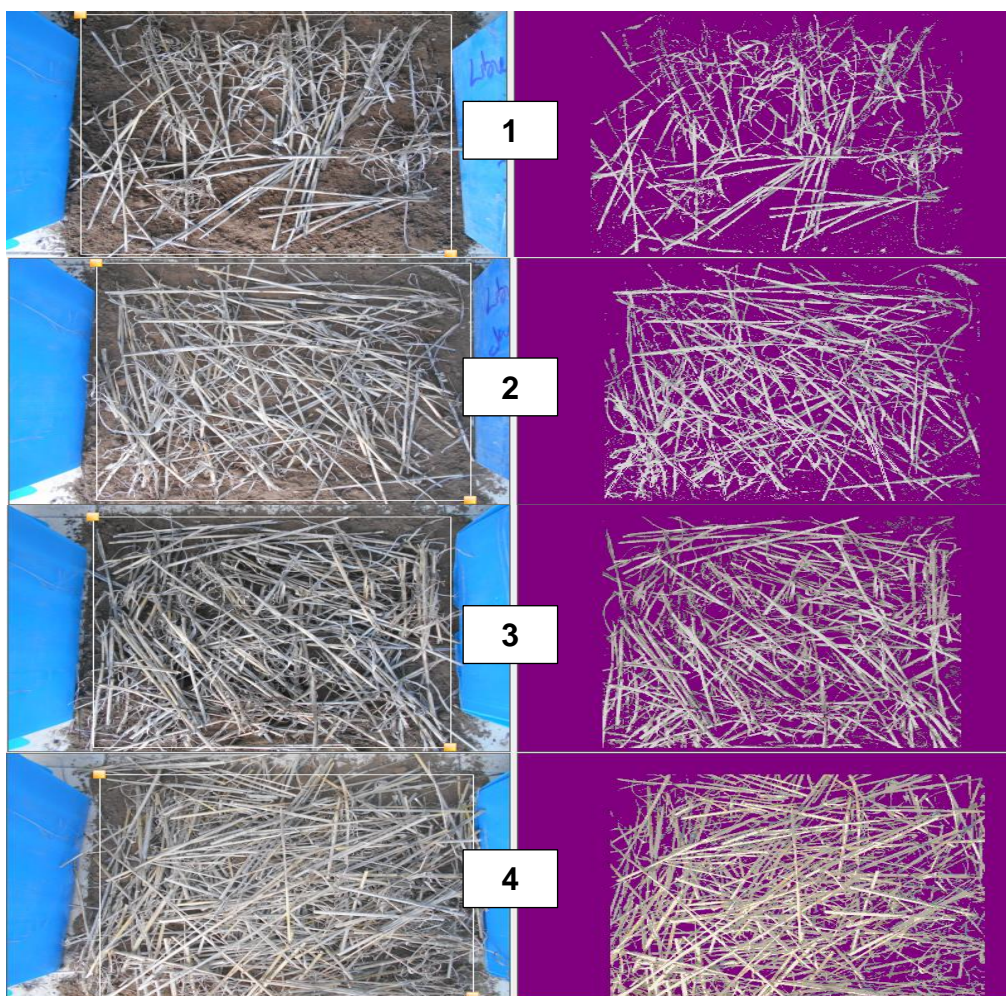


Figura 24. Fotografías (izquierda) y resultado del análisis con el programa Cobcalv (derecha) en los cuatro escenarios de cobertura de suelo (de arriba hacia abajo).

Imagen 3D de la estructura de la cobertura vegetal

Un escáner 3D comprende un dispositivo que analiza un objeto o una escena para reunir datos de su forma (Malik *et al.*, 2011). El modelo tridimensional digital que se genera es una representación numérica de las características visuales del objeto. Este modelo puede obtenerse de dos maneras diferentes. Por un lado, mediante el diseño asistido por un ordenador (CAD). Por el otro, mediante la medición física del objeto, es decir, de manera semiautomática y se basa en la determinación de características geométricas del objeto (Tausch, 2007). El prototipo desarrollado se orientó en este último y permitió escanear una porción de suelo cuadrangular y exportar el resultado a un formato (CSV) compatible con la mayoría de las herramientas de computación científica. Como resultado, se obtuvo un modelo de representación gráfica tridimensional de la geometría de la cobertura superficial de una porción del suelo a partir de una nube de puntos o datos adquiridos por el instrumento durante el escaneo (Figura 25).

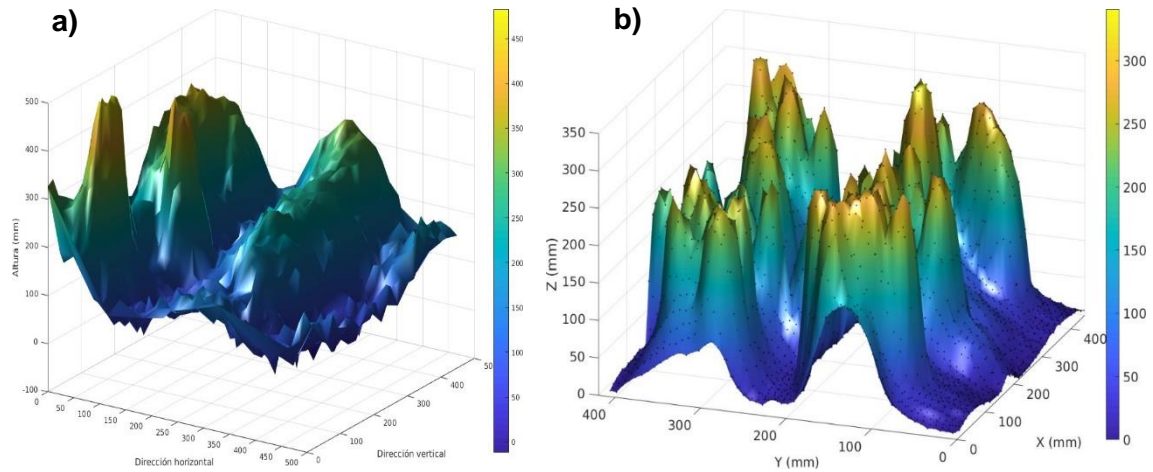


Figura 25. Representación gráfica 3D generada a partir de la medición con el escáner sobre la microparcela (AL2, a) y la maqueta (M1, b) con rastrojo de trigo.

En el gráfico 3D se divisan las líneas de siembra con rastrojo remanente, la cual permite observar la distribución vertical del mismo (Figura 25). Los indicadores que se extrajeron permitieron caracterizar los atributos de la cobertura vegetal que se estaba analizando (Tabla 12). Estos indicadores dependen de los operadores numéricos que se apliquen sobre el modelo de nube de puntos adquirido con el instrumento, pero ya no dependen del funcionamiento del equipo, sino de la técnica de procesamiento de información utilizada.

Tabla 12. Indicadores obtenidos a partir de la nube de puntos registrados por el prototipo escáner, para caracterizar la cobertura vegetal de la porción de suelo analizada.

Nombre	Unidades	Descripción
Altura máxima	mm	Valor de altura máxima registrada por el sensor en cada unidad de escaneo (Uesc)
Altura promedio	mm	Promedio de todas las muestras registradas por el sensor en cada Uesc
Altura mediana	mm	Valor de altura que se encuentra en la mitad del conjunto de muestras registradas por el sensor en cada Uesc
Desvío estándar de la altura		Corresponde a la dispersión o variabilidad del conjunto de del conjunto de muestras registradas por el sensor en cada Uesc
Coefficiente de variación		Relación entre la altura promedio y el desvío estándar de la altura
Volumen aparente	m ³	Espacio que ocupa la envolvente obtenida por la nube de puntos; siendo el volumen total de una masa dada de rastrojo, incluyendo los sólidos de materia seca y el espacio poroso (poros) entre ellos.
Entropía de la imagen (Entropía de información)		Mide la incertidumbre de la fuente de información. Se puede interpretar como la cantidad de información en promedio que contiene el conjunto de datos.
Transformada de Fourier Discreta (DFT)		Extrae las componentes frecuenciales de un conjunto de datos.
“Nivel de ruido” o “índice de ruido” de la sección transversal		Se refiere a las oscilaciones alrededor de la envolvente principal.

Conclusiones

Se acepta la hipótesis. El prototipo de escáner LiDAR desarrollado y presentado en este Capítulo produjo una representación numérica y gráfica de la cobertura del suelo análoga compatible con lo que un analista puede observar visualmente a campo. Mediante este prototipo fue posible incorporar una nueva dimensión, referida a la distribución vertical de la cobertura, superando las limitaciones encontradas en los métodos tradicionales que contemplan solo dos dimensiones en un plano. La ventaja radica en que el proceso puede automatizarse y/o tecnificarse y, al tratarse de un modelo cuantificado, significa una medición objetiva e independiente del observador.

Capítulo IV

Aplicación del prototipo de escáner LiDAR para el análisis de la interfase suelo-atmósfera en barbecho con rastrojo de cultivos de invierno

Introducción

En zonas semiáridas, el agua es un recurso escaso que proviene principalmente de las precipitaciones. La agricultura de secano en clima semiárido generalmente es limitada por una mala gestión del recurso (Madurga, 2005). Si bien el problema de las pérdidas de agua del suelo por evaporación superficial es un factor limitante importante en la producción de cultivos (Passioura & Angus, 2010), esta pérdida improductiva de agua puede reducirse mediante el manejo de rastrojos en sistemas de labranza cero (L0; Monzón *et al.*, 2006). En los últimos años se ha prestado mayor atención a la investigación sobre diversos aspectos de la disponibilidad y la gestión del agua del suelo en la AC (Li *et al.*, 2008).

Los procesos relacionados con la dinámica del agua ocurren principalmente en la zona de contacto entre el suelo y la atmósfera, denominada interfase suelo-atmósfera e incluye una capa de la atmósfera de unos pocos metros, la cobertura superficial, y los horizontes superiores del suelo (Steiner & Schomberg, 1996; Kruger *et al.*, 2014). Esto indica que la cobertura de los rastrojos de cultivos en superficie, tienen importantes efectos sobre el microclima de esta interfase: amortigua las fuerzas del impacto de las gotas de lluvia contra el suelo, la velocidad del viento; influye en los flujos de balance de radiación y la energía; y esto puede conducir a tasas muy diferentes de secado, mediante la alteración de las tasas de transferencia de calor y de agua en la superficie del suelo (Wilhelm *et al.*, 2004). En consecuencia, afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas (Kozak *et al.*, 2007b).

Varios estudios han demostrado que el rastrojo de los cultivos en superficie puede reducir la evaporación potencial del agua del suelo, al sombrear la superficie del suelo y reducir el intercambio convectivo de vapor de agua en la interfase suelo-atmósfera, y aumentar el almacenamiento de agua en el suelo (Van Doren & Allmaras, 1978; Aiken *et al.*, 1997). La eficiencia de almacenamiento se denomina eficiencia de barbecho, la cual es una importante fuente de agua en para los cultivos de secano y se incrementa con la retención de rastrojos (Passioura & Angus, 2010). A su vez, las características de la geometría o estructura de los rastrojos y la cantidad de suelo cubierto alteran el microclima de la interfase y, por lo tanto, influyen en el grado de conservación del agua (McMaster *et al.*, 2000). Los rastrojos que son principalmente verticales tienen un impacto muy diferente de los rastrojos que son principalmente horizontales (Cutforth & McConkey, 1997; Sharratt, 2002).

Uno de los indicadores que describe la estructura de los rastrojos es el factor de silueta, o índice de área del tallo (IAT) siendo el área vertical proyectada de los tallos verticales por unidad de superficie del suelo, es decir, es el producto del diámetro, la altura y la densidad de tallos (Aiken *et al.*, 1997). Estas características de la estructura determinan la eficacia de los rastrojos, es decir, definen la zona de silueta a través de la cual debe pasar el viento. La velocidad de fricción en la superficie del suelo, que impulsa el proceso de erosión, disminuye exponencialmente con el aumento del IAT. Los rastrojos de corta altura, es decir menor IAT, reducen la protección contra la erosión del suelo por el viento y aumentan la evaporación del agua del suelo en comparación con los rastrojos más altos, es decir, mayor IAT (Hagen, 1996).

Un rastrojo vertical puede reducir la velocidad del viento en la superficie del suelo, hasta en un 70 %, y la pérdida de agua por evaporación, resultando en una mayor eficiencia de uso de agua de los cultivos (Cutforth *et al.*, 2002; Aiken *et al.*, 2003). Además, posee un albedo inferior, es decir absorben más radiación solar y son más eficientes para atrapar y retener calor. Por otro lado, un rastrojo horizontal presenta una menor evaporación y temperatura (Flerchinger, 2003). Passioura & Angus (2010) mencionan que aplanando el rastrojo se rompe la continuidad de la vía de pérdida de humedad del suelo a través del xilema de las raíces muertas y los tallos.

Mientras que algunos autores plantean que la mayor altura del rastrojo mantiene un microclima más favorable para las plantas (Aase & Siddoway, 1980; Cutforth & McConkey, 1997), se requiere una mayor investigación para demostrar cuales son las características de la estructura del rastrojo más adecuadas para promover un microclima de la interfase suelo-atmósfera favorable a la conservación del agua y el suelo. En estos ambientes de clima de tipo continental, no está claro cuánto rastrojo se necesita para la producción sostenible de cultivos en sistemas de L0 y si se prefiere el rastrojo en vertical u horizontal. Una mejor comprensión de los efectos de la cobertura de rastrojos de cultivos en la dinámica del microclima de la interfase suelo-atmósfera puede ayudar a determinar estrategias de gestión del rastrojo para conservar el agua en los cultivos de secano.

Si bien existen diferentes técnicas para medir la cobertura vegetal, generalmente se usa el grado de cobertura del suelo por residuos de cultivos. En algunos casos, el peso de la biomasa de la planta se mide habitualmente, en seco o con humedad, pero esta práctica requiere extraer una porción de la cubierta del suelo de la muestra que se está analizando y esto no siempre es posible. La estructura o dimensión 3D del rastrojo

generalmente no se tiene en cuenta debido a su gran complejidad para evaluar, a pesar de ser crucial en la dinámica de la interfase suelo-atmósfera. Por lo tanto, la tecnología propuesta y descrita en el Capítulo III permitiría facilitar la evaluación de la estructura del rastrojo.

La Hipótesis planteada fue:

El volumen aparente obtenido mediante el prototipo de escáner LiDAR permite estimar la estructura del rastrojo de cultivos de invierno y eso se refleja en el microclima de la interfase suelo-atmósfera que modifica el contenido de agua del suelo.

El Objetivo del presente Capítulo fue:

Determinar la factibilidad de estimar las características biofísicas del rastrojo de cultivos de invierno a partir del volumen aparente como indicador obtenido con el prototipo de escáner LiDAR y establecer su relación con la temperatura del suelo, la velocidad laminar del viento, la humedad y la eficiencia de barbecho.

Materiales y Métodos

Descripción del ensayo

Las evaluaciones se realizaron en la unidad de producción de la EEA INTA Hilario Ascasubi durante tres períodos de barbecho.

Durante el barbecho para el cultivo de trigo del Ciclo I (2018), se establecieron diferentes escenarios de altura de corte sobre la disposición vertical del rastrojo en los tres antecesores. Se definieron las alturas 50, 40, 30, 20 y 10 cm en trigo; 70, 50, 20, 10 cm en centeno; y 40, 30, 20, 10 cm en avena; en microparcels de 0,25 m² (0,50 x 0,50 m) establecidas al azar. En cada microparcels se procedió a cortar con tijera el rastrojo a las alturas establecidas, descartando el material excedente.

Luego, se realizaron las evaluaciones durante el barbecho para los antecesores (2019) y el trigo (2020) del Ciclo II sobre las tres disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo) del rastrojo de trigo, bajo las condiciones detalladas en la sección Materiales y Métodos del Capítulo I.

Evaluaciones durante el barbecho mediante métodos tradicionales

Estructura del rastrojo: altura del rastrojo, índice de área de tallo y biomasa aérea de rastrojo

En cada microparcela (barbecho 2018) y marco de muestreo de 0,25 m² (barbechos 2019 y 2020) se estimaron bajo los mismos procedimientos descritos en Materiales y Métodos del Capítulo I y II.

Impacto de la estructura sobre parámetros físicos: temperatura del suelo, velocidad laminar del viento, humedad a la siembra y eficiencia de barbecho

Se determinó la temperatura del suelo y velocidad laminar del viento durante el barbecho 2019; y humedad a la siembra y eficiencia de barbecho durante el barbecho 2019 y 2020, bajo los mismos procedimientos descritos en Materiales y Métodos del Capítulo II.

Evaluaciones durante el barbecho mediante la tecnología LiDAR propuesta

Se realizaron 70 mediciones de la cobertura del suelo con rastrojo de cultivos de invierno empleando el prototipo de escáner LiDAR presentado en el Capítulo III (Micheletto *et al.*, 2018 y 2020b). Las primeras 16 imágenes o unidades de escaneo (Uesc) se obtuvieron en los diferentes escenarios de altura de corte durante el período de barbecho de 2018 con rastrojo de trigo, centeno y avena dispuesto en forma vertical. Las 54 Uesc restantes se obtuvieron durante el período de barbecho de 2019 y 2020 con rastrojo de trigo dispuesto en forma horizontal, vertical y pastoreo (3 bloques x 3 repeticiones x 3 disposiciones del rastrojo).

Previo a realizar las mediciones, se configuró el escáner para obtener modelos con una resolución de 1800 muestras o píxeles y un tiempo estimado de 10 a 15 minutos por medición. Además, se ajustó la altura de medición del escáner en cada Uesc en función de la altura del rastrojo, para que el equipo trabaje levemente por encima del nivel superior máximo del rastrojo.

Dentro del set de indicadores obtenidos con el escáner LiDAR, se seleccionó el volumen aparente (Vap) debido a que era el que mejor explicaba la estructura del rastrojo al considerar la tercera dimensión de la cobertura vegetal. Este indicador se utilizó para

determinar la relación con los parámetros de estructura del rastrojo (altura del rastrojo, índice de área de tallo y biomasa aérea de rastrojo) y físicos (temperatura del suelo, velocidad laminar del viento, humedad a la siembra y eficiencia de barbecho) evaluados mediante los métodos tradicionales.

Además, se realizó el cálculo densidad aparente de la capa del rastrojo (D_{apr}), como indicador compuesto, mediante la relación entre el peso, determinado mediante la técnica tradicional, y el volumen aparente que ocupa la biomasa total del rastrojo, mediante la estimación realizada con el escáner LiDAR, aplicando la ecuación [9].

$$D_{apr} = \frac{B_{tot}}{V_{ap}} \quad \text{Ecuación [9]}$$

D_{apr} : densidad aparente de la capa de rastrojo (kg m^{-3}); B_{tot} : biomasa total del rastrojo mediante la suma del estrato superior e inferior (kg); V_{ap} : volumen aparente determinado con el prototipo escáner LiDAR (m^3).

Análisis estadístico

Los resultados en tablas y figuras se presentan como medias. Las diferencias en los resultados obtenidos afectados por los tratamientos fueron probadas por análisis de la varianza (ANOVA) y la prueba LSD Fisher para la comparación de medias ($p \leq 0,05$). Cuando fue necesario se efectuaron análisis de regresión. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2020).

Resultados y Discusión

Modelos 3D obtenidos mediante el escáner LiDAR

Barbecho con rastrojos de antecesores (2018)

Se observaron diferencias en la estructura de la cobertura de los rastrojos de los tres antecesores mediante los modelos obtenidos con el escáner LiDAR. Se diferenció la línea de siembra, principalmente en trigo y en menor medida en avena debido a una mayor irregularidad en la distribución del rastrojo (Figura 26). En cuanto a centeno, no se diferenció la línea de siembra, debido a la superioridad en la altura del rastrojo (70 cm) y a la distribución más abierta y laxa en la porción superior de los vástagos. Además, a pesar de poseer la mayor altura de los tallos, el antecesor centeno presentó un

volumen aparente del rastrojo similar al de avena. El rastrojo del antecesor trigo fue el que presentó el mayor volumen aparente (Tabla 13). Esto puede atribuirse a que la biomasa total del rastrojo de trigo fue superior a la del centeno y la avena que fueron similares. La densidad de tallos de los antecesores (centeno < trigo < avena) pareció no tener un efecto sobre el volumen aparente.

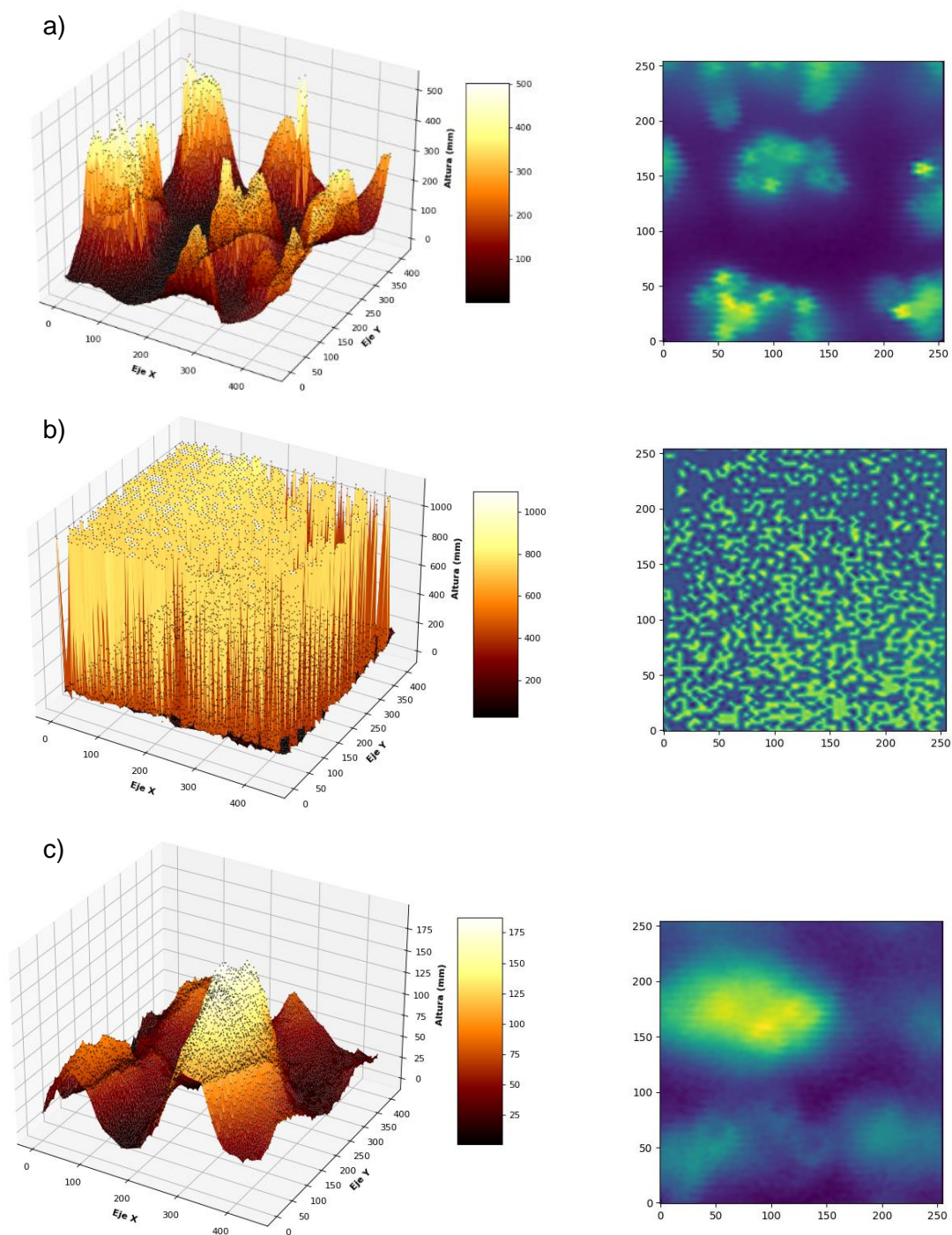


Figura 26. Modelo 3D (izquierda) e imagen equivalente observada desde un plano paralelo a la superficie del suelo (derecha) de la disposición vertical del rastrojo de los antecesores trigo (a), centeno (b) y avena (c) durante el barbecho 2018.

En los tres antecesores, se observó que en la medida que se incrementaba la altura del rastrojo, también lo hacía el volumen aparente, la biomasa seca del estrato superior y, en consecuencia, la biomasa total (Tabla 13). No se observó relación con el estrato inferior ya que el escáner no arrojó una medida de altura absoluta del rastrojo en contacto con la superficie del suelo.

Tabla 13. Características de la estructura del rastrojo de los antecesores trigo, centeno y avena del Ciclo I. Barbecho 2018.

Antecesores	Altura	Volumen aparente	Estrato superior	Estrato inferior	Biomasa total	Dapr
	[cm]	[m ³]		[Mg ha ⁻¹]		[kg m ⁻³]
Trigo	50	0,13	3,7	3,5	7,2	5,58
	40	0,10	3,9	1,0	4,9	4,86
	30	0,08	3,8	1,5	5,3	6,30
	20	0,04	2,5	2,2	4,7	10,77
	10	0,03	1,3	1,1	2,4	8,33
Centeno	70	0,06	4,4	0,4	4,9	7,89
	50	0,04	1,9	0,7	2,6	6,02
	20	0,03	1,9	0,6	2,5	8,49
	10	0,02	1,5	0,5	2,1	9,66
Avena	40	0,06	3,6	1,5	5,1	8,23
	30	0,05	2,4	1,1	3,5	7,58
	20	0,03	2,4	0,9	3,4	12,36
	10	0,02	1,3	1,2	2,5	10,03

Dapr: densidad aparente de la capa del rastrojo.

La Dapr presentó un comportamiento contrario al volumen aparente (Tabla 13). La Dapr fue menor a mayor altura del rastrojo, como consecuencia del incremento en el volumen aparente a partir de una mayor proporción del espacio poroso que de biomasa de rastrojo. Además, la mayor Dapr se observó en los primeros 20 cm de altura debido al aporte de las hojas, que por la morfología de las gramíneas en su parte inferior se encuentra la vaina que envuelve al tallo y en la superior la lámina.

A su vez, la Dapr fue mayor en avena, seguida por el trigo y luego el centeno (Tabla 13), lo que podría atribuirse a la densidad de vástagos que presentaron cada una, siendo de 414, 361 y 343 vástagos m⁻², respectivamente. Además, podría deberse a la mayor relación hoja/tallo en avena y trigo, respecto de centeno.

Barbecho con rastrojo de trigo en tres disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo, 2019 y 2020)

Se observó el mayor volumen aparente en la disposición vertical y, además, se diferenciaron las líneas de siembra. Pastoreo se caracterizó por tener menor altura y volumen aparente de rastrojo que la disposición vertical. En pastoreo también se identificaron las líneas de siembra, pero en menor medida que vertical. El rastrojo horizontal tuvo el menor volumen aparente y, además, no se diferenciaron las líneas de siembra (Figura 27, Tabla 14).

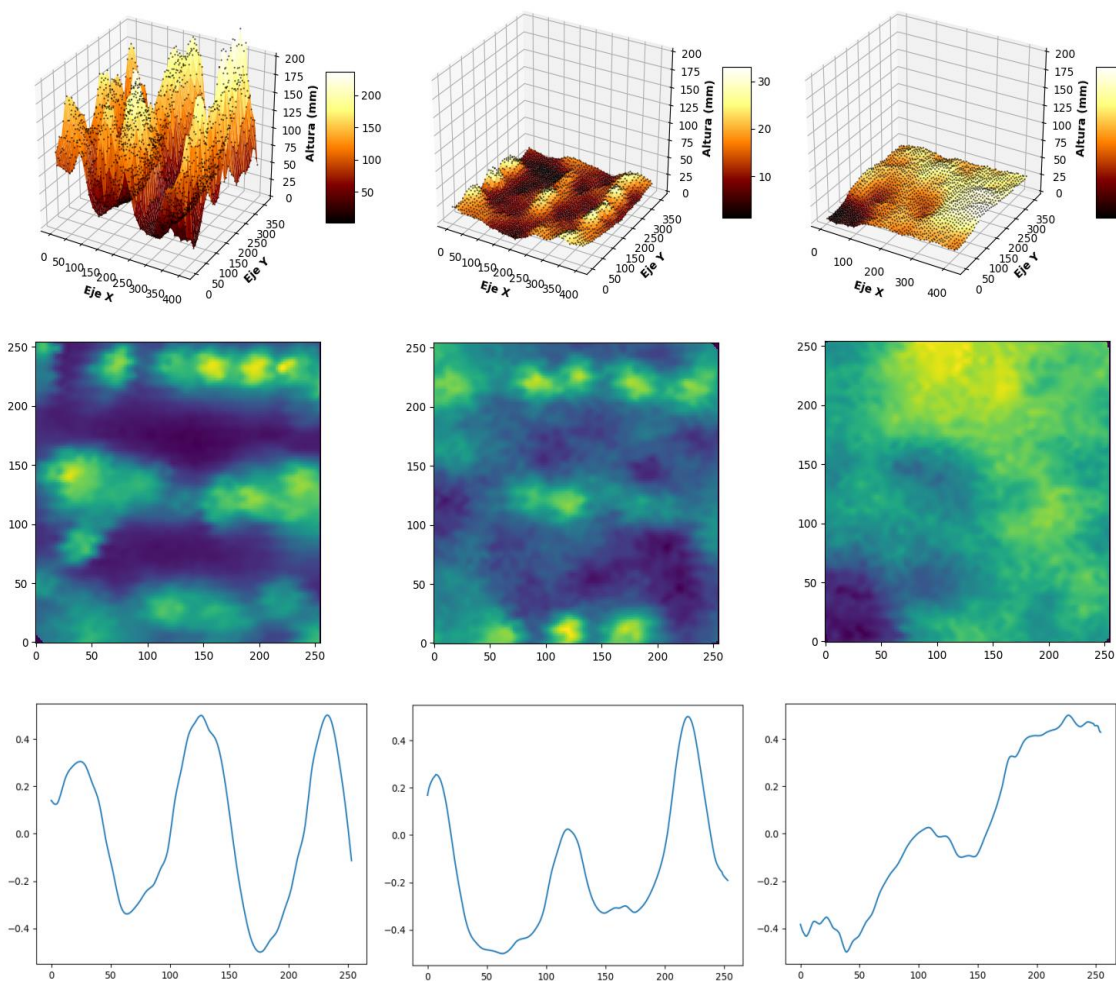


Figura 27. Imágenes de las disposiciones vertical, pastoreo y horizontal (de izquierda a derecha) del rastrojo de trigo durante el barbecho 2020. Modelo 3D, imagen equivalente observada desde un plano paralelo a la superficie del suelo y la sección transversal normalizada (de arriba hacia abajo).

El volumen aparente fue superior en la disposición vertical del rastrojo de trigo respecto de horizontal y pastoreo, que no se diferenciaron a pesar de los grandes contrastes en

la biomasa total en estos últimos (Tabla 14). Esto se debió a la mayor biomasa del estrato superior y altura del rastrojo en la disposición vertical. A su vez, la disposición vertical y horizontal no presentaron diferencias en la biomasa total, pero sí en su composición por estrato superior e inferior y, en consecuencia, distinto volumen aparente. En vertical fue mayor la proporción de la biomasa total correspondiente al estrato superior y menor la proporción correspondiente al estrato inferior; y viceversa para horizontal. El pastoreo fue inferior para las características de biomasa total, estrato superior e inferior y altura. Al observar la Dapr, que relaciona la biomasa total y el volumen aparente, el rastrojo dispuesto horizontal fue superior, seguido de pastoreo y finalmente vertical, como consecuencia de la concentración de la biomasa en una menor unidad de volumen y, por lo tanto, un menor espacio poroso en la capa de la cobertura vegetal (Tabla 14).

Tabla 14. Características de la estructura del rastrojo de trigo en sus disposiciones vertical, horizontal y pastoreo. Promedio de los barbechos 2019 y 2021.

Disposición del rastrojo	Altura	Estrato superior	Estrato inferior	Biomasa total	Volumen aparente	Dapr
	[cm]		[Mg ha ⁻¹]		[m ³]	[kg m ⁻³]
Vertical	29 a	2,15 a	2,59 b	4,75 a	0,058 a	8,54 c
Horizontal	3 c	0,06 b	4,11 a	4,17 a	0,015 b	28,41 a
Pastoreo	11 b	0,62 c	1,77 c	2,36 b	0,017 b	13,72 b
ANOVA						
Disposición	***	***	***	***	***	***

*, **, ***: Significativos a niveles de probabilidad de 0,05; 0,01 y <0,001. Por cada variable, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0,05). Dapr: densidad aparente de la capa del rastrojo.

Relación entre el volumen aparente y las evaluaciones sobre la estructura del rastrojo (altura, biomasa y IAT) y los parámetros físicos (temperatura del suelo, velocidad laminar del viento, humedad a la siembra y eficiencia de barbecho)

Altura del rastrojo

Durante el barbecho del 2018 se observó la relación directa entre el volumen aparente y la altura del rastrojo (Figura 28). La regresión planteada para verificar esta relación entre las dos variables fue altamente significativa para trigo ($R^2 = 0,94$ ***) y avena ($R^2 = 0,98$ **); y significativa para centeno ($R^2 = 0,97$ *). En los tres antecesores el origen o el inicio de las rectas a los 10 cm de altura fue muy similar, pero se diferenciaron en la

pendiente de las rectas. Por lo que, para un mismo volumen aparente mayor era la altura del rastrojo de centeno, seguido de avena y luego trigo.

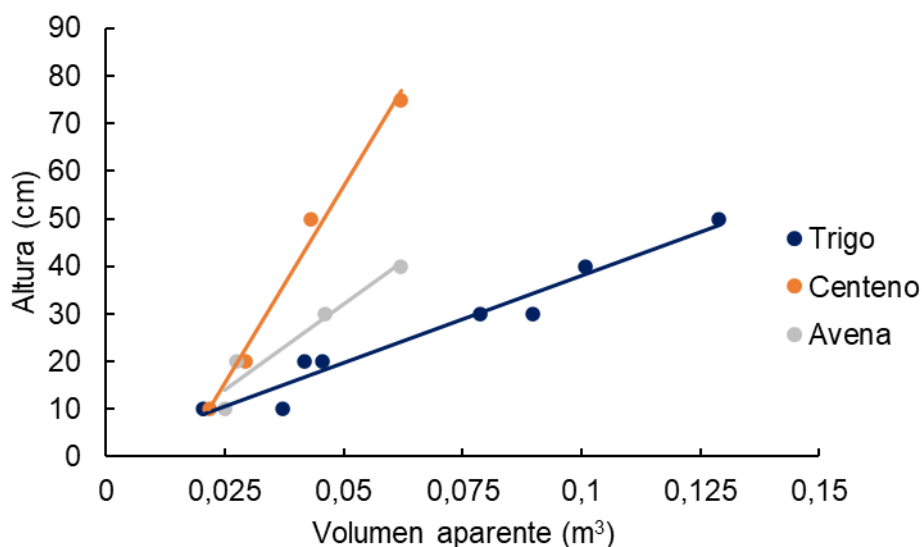


Figura 28. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y la altura del rastrojo de los antecesores trigo, centeno y avena. Barbecho 2018.

Al incluir los datos de los tres períodos de barbecho evaluados, se observó una relación entre la altura del rastrojo y el volumen aparente (Figura 29). La línea de tendencia de segundo grado ajustada ($P < 0,01$) explica el 87 % de la variabilidad de la altura a partir del volumen aparente del rastrojo en superficie para valores de entre 0 y 0,12 m³. En la medida que se incrementa el volumen aparente también lo hace la altura del rastrojo, pero con mayores cambios al inicio y luego se van estabilizando, alcanzando un máximo de 41 cm con un volumen aparente de 0,12 m³.

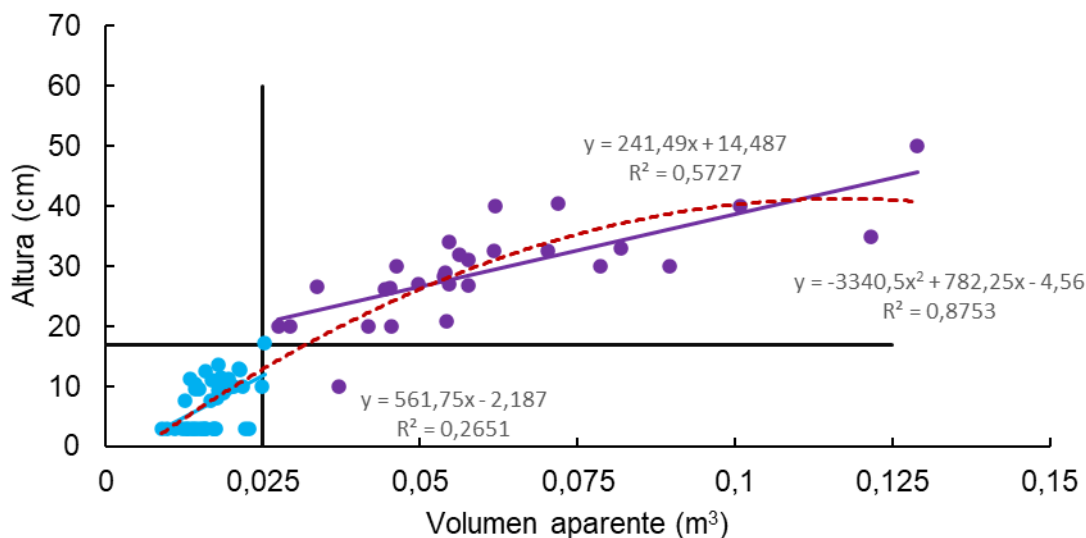


Figura 29. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y la altura del rastrojo de trigo en los tres períodos de barbecho (2018, 2019 y 2020).

Luego se estableció un límite crítico mediante una metodología similar a la establecida por Cate y Nelson (1971), el cual resultó ser de $0,025 \text{ m}^3$ de volumen aparente y 17 cm de altura del rastrojo (Figura 29). Este nivel de rastrojos en superficie separó dos subgrupos dentro de los rastrojos, uno de bajo y otro de alto volumen aparente. Dentro del subgrupo de bajo volumen aparente de rastrojos en superficie se logró una relación lineal ($p < 0,01$, $R^2 = 0,26$) entre el volumen aparente y la altura. En este subgrupo, por cada $0,01 \text{ m}^3$ de aumento de volumen aparente de los residuos en superficie, la altura se incrementó $5,6 \text{ cm}$. Para volúmenes por encima del nivel crítico también se observó una relación lineal entre el volumen aparente y la altura del rastrojo ($p < 0,01$, $R^2 = 0,57$). Dentro de este subgrupo, por cada $0,01 \text{ m}^3$ de aumento de volumen aparente de rastrojos se incrementó $2,4 \text{ cm}$ la altura.

Biomasa de rastrojo

En los tres períodos de barbecho, se observó una relación entre el peso de la biomasa total y el volumen aparente del rastrojo al excluir la disposición horizontal (Figura 30), ya que el escáner no permite realizar una buena medición del estrato inferior, tal como se observó en el barbecho con el rastrojo de los antecesores del Ciclo I (2018).

El modelo cuadrático se ajustó en 69% en la biomasa total para valores de entre 0 y $0,13 \text{ m}^3$ de volumen aparente ($p < 0,01$). Al igual que la altura, a mayor volumen aparente, mayor era la biomasa total del rastrojo, pero con cambios más acelerados al inicio y

luego se van estabilizando, alcanzando un máximo de $6,35 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un volumen aparente de $0,13 \text{ m}^3$.

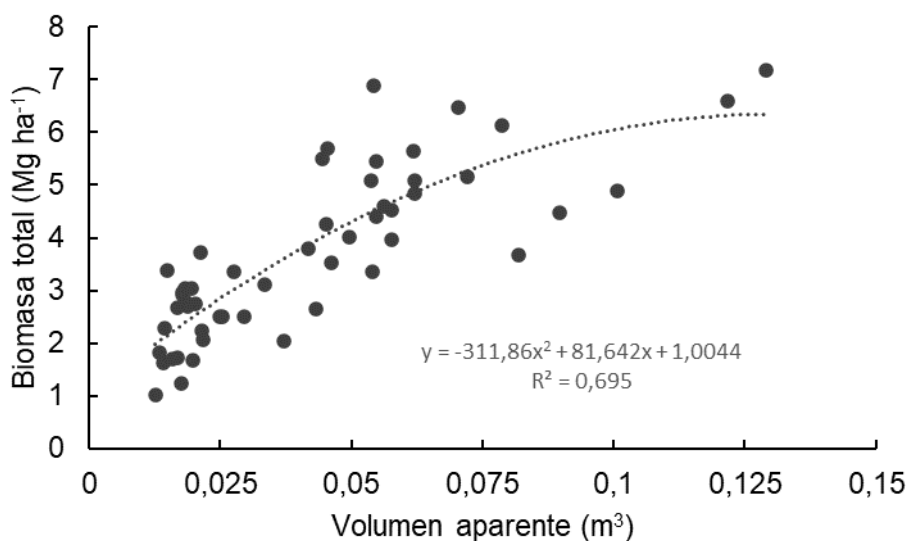


Figura 30. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y el peso de la biomasa total del rastrojo de trigo en los tres períodos de barbecho (2018, 2019 y 2020), excluyendo la disposición horizontal.

Si bien se observó una buena correlación entre la biomasa total y el volumen aparente, el ajuste fue mayor con la biomasa del estrato superior (R^2 0,86; $p < 0,01$). La regresión de segundo grado describió la biomasa del estrato superior en función del volumen aparente, para valores de entre 0 y $0,13 \text{ m}^3$ (Figura 31). Los incrementos en el volumen aparente se asociaron con aumentos en la biomasa del estrato superior del rastrojo de trigo, pero con cambios más acelerados al inicio y luego se van estabilizando, alcanzando un máximo de 4 Mg ha^{-1} con un volumen aparente de $0,13 \text{ m}^3$.

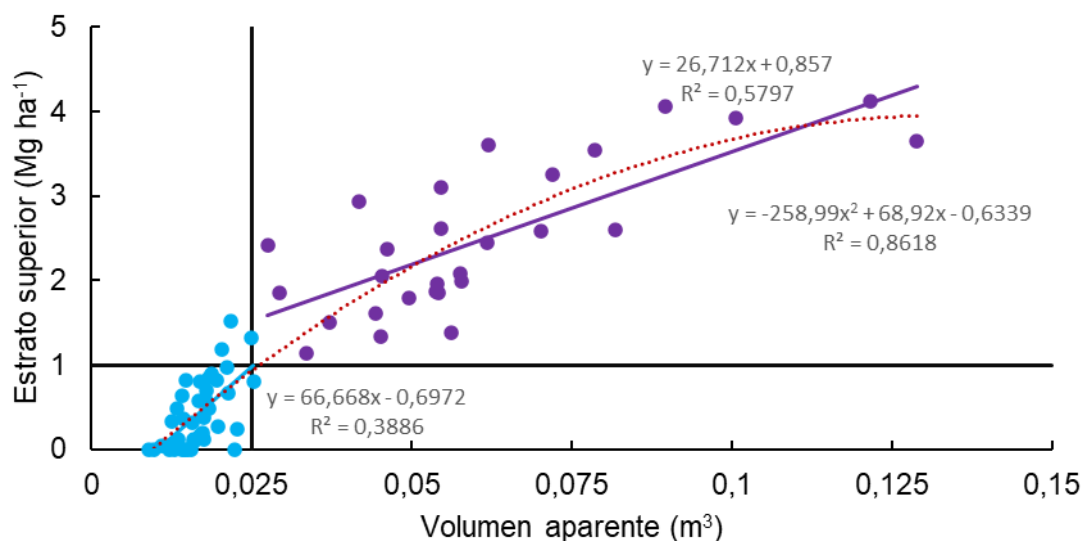


Figura 31. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y la biomasa del estrato superior del rastrojo de trigo en los tres períodos de barbecho (2018, 2019 y 2020).

Se determinó el límite crítico (Cate & Nelson, 1971) para el estrato superior y resultó ser de $0,025 \text{ m}^3$ de volumen aparente y 1 Mg ha^{-1} de biomasa del estrato superior del rastrojo (Figura 31). Al igual que con la altura, este nivel de rastrojos en superficie nos permitió separar dos subgrupos dentro de los rastrojos, entre bajo y alto volumen aparente. Dentro del subgrupo de bajo volumen aparente de rastrojos en superficie se logró una relación lineal ($p < 0,01$, $R^2 0,39$) entre el volumen aparente y la biomasa del estrato superior. En este subgrupo, por cada $0,01 \text{ m}^3$ de aumento de volumen aparente, la biomasa del estrato superior se incrementa $0,7 \text{ Mg ha}^{-1}$. Para volúmenes por encima del nivel crítico también se observó una relación lineal entre el volumen aparente y la biomasa del estrato superior del rastrojo ($p < 0,01$, $R^2 0,58$). Dentro de este grupo, por cada $0,01 \text{ m}^3$ de volumen aparente de rastrojos se incrementó $0,3 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Índice de área de tallo (IAT)

Durante el barbecho del 2018, al igual que con la altura del rastrojo, se observó la relación directa entre el volumen aparente y el IAT (Figura 32). La regresión planteada para verificar esta relación entre las dos variables fue altamente significativa para trigo ($R^2 = 0,96$ ***), avena ($R^2 = 0,98$ ***) y centeno ($R^2 = 0,94$ ***). El origen o el inicio de las rectas fue similar en los tres antecesores, pero se diferenciaron en la pendiente de la recta. Por lo que, para un mismo volumen aparente mayor era el IAT del rastrojo de centeno, seguido de avena y luego trigo.

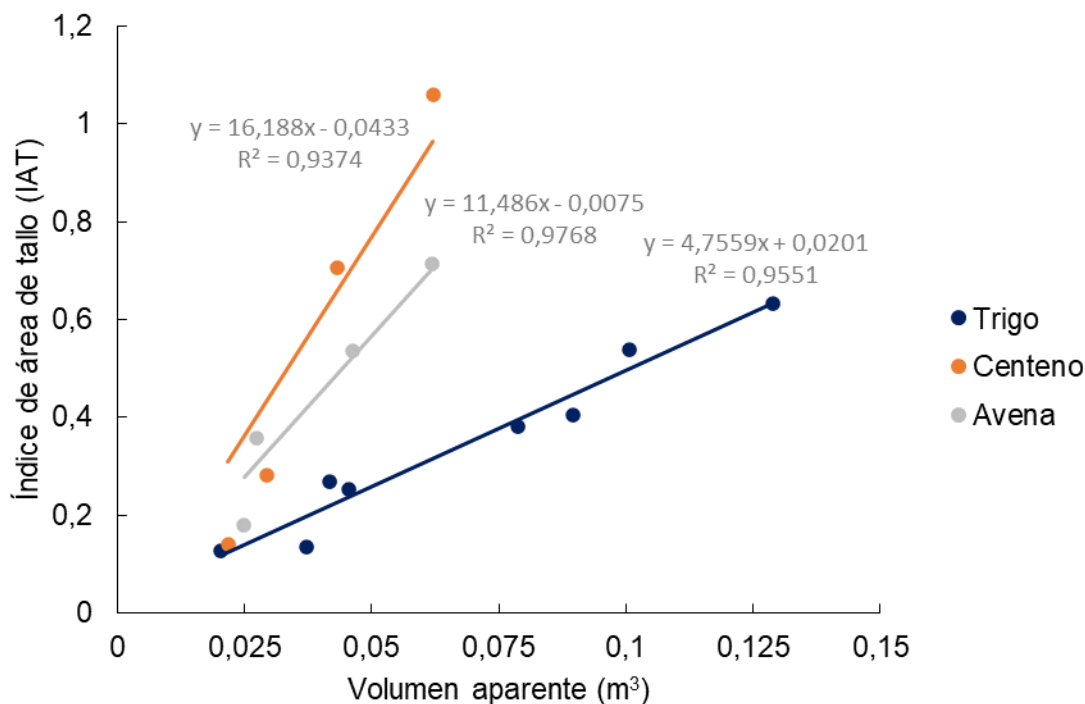


Figura 32. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y el índice de área de tallo (IAT) del rastrojo de los antecesores trigo, centeno y avena. Barbecho 2018.

Al incluir los datos del rastrojo de trigo en los tres períodos de barbecho evaluados (2018, 2019 y 2020), se observó que el ajuste de la regresión cuadrática es del 82 % ($p < 0,01$) para describir el IAT en función del volumen aparente, para valores de entre 0 y $0,11 \text{ m}^3$ (Figura 33). En la medida que incrementó el volumen aparente, mayor era el IAT, pero con cambios más acelerados al inicio y luego se van estabilizando, alcanzando un máximo de IAT de 0,64 con un volumen aparente de $0,11 \text{ m}^3$.

Se determinó el límite crítico (Cate & Nelson, 1971) para el IAT y resultó ser de $0,025 \text{ m}^3$ de volumen aparente y 0,24 de IAT del rastrojo de trigo (Figura 33). Al igual que la altura y la biomasa del estrato superior, este umbral de volumen aparente de rastrojos en superficie permitió separar en dos subgrupos dentro de los rastrojos, entre bajo y alto volumen aparente. Dentro del subgrupo de bajo volumen aparente de rastrojos se logró una relación lineal ($p < 0,01$, $R^2 0,27$). En este subgrupo, por cada $0,01 \text{ m}^3$ de aumento de volumen aparente, el IAT se incrementó 0,11. Para volúmenes por encima del nivel crítico también se observó una relación lineal entre el volumen aparente y el IAT del rastrojo ($p < 0,01$, $R^2 0,37$). Dentro de este grupo, por cada $0,01 \text{ m}^3$ de volumen aparente de rastrojos se incrementó 0,04 el índice.

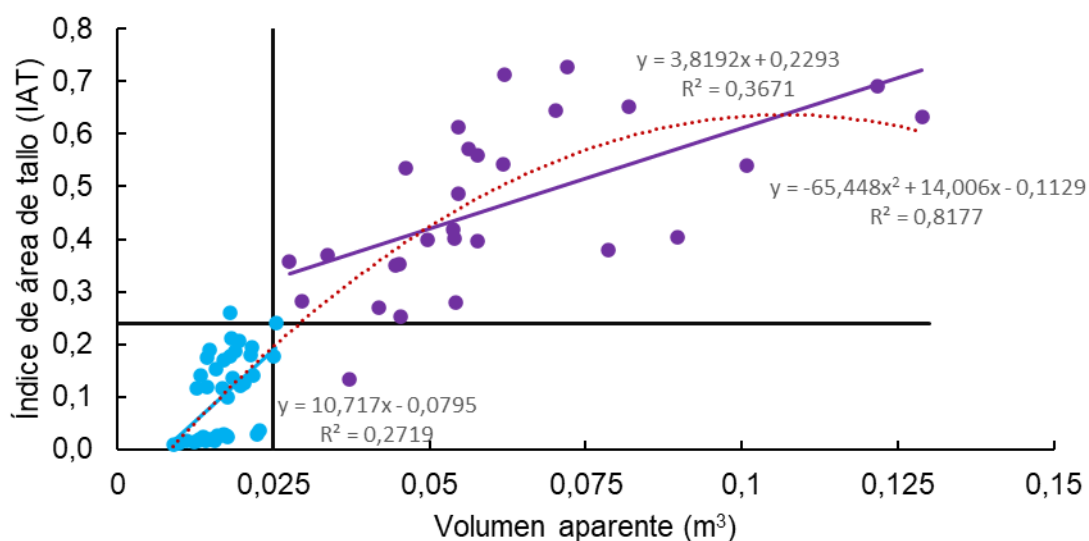


Figura 33. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y el índice de área de tallo (IAT) del rastrojo de trigo en los tres períodos de barbecho (2018, 2019 y 2020).

Temperatura del suelo

En superficie, se observó la tendencia a disminuir el ΔT° en la medida que aumenta el volumen aparente del rastrojo (Figura 34). Esta tendencia fue más marcada en horizontal y pastoreo, y en menor medida en vertical. Además, esta relación permitió diferenciar las disposiciones principalmente a nivel de superficie. A 5 cm de profundidad, se redujo la diferencia entre horizontal y pastoreo.

Si bien la biomasa de rastrojo reduce las pérdidas de agua del suelo por evaporación por amortiguar los cambios de la temperatura de este (Smika, 1983), el volumen aparente ofrece más información sobre el impacto de este factor.

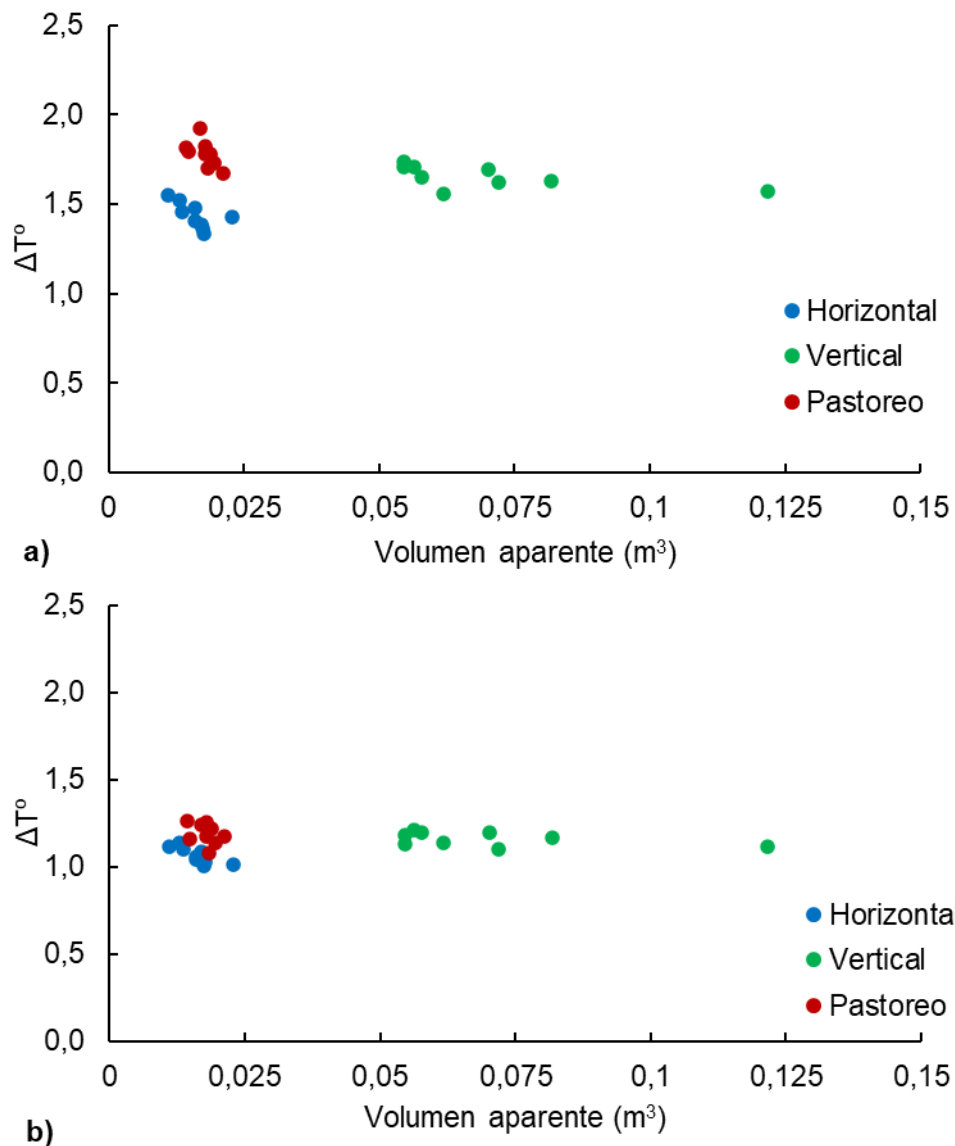


Figura 34. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y el ΔT° (temperatura del suelo / temperatura ambiental) a nivel de superficie del suelo (a) y a 5 cm (b), en las disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo) del rastreo del cultivo de trigo. Barbecho 2019.

Velocidad laminar del viento

A nivel superficial, se observó una relación inversa entre el volumen aparente del rastreo y la velocidad del viento (Figura 35a). El impacto sobre el diferencial de velocidad del viento fue mayor con pequeños aumentos en el volumen aparente inicial, hasta alcanzar el límite crítico $0,025 \text{ m}^3$, tal como se observa en horizontal y pastoreo. La disposición vertical se diferenció de las estructuras del rastreo por tener un mayor volumen aparente y por ende un menor ΔV_v , pero el nivel de reducción del diferencial

es menor en la medida que se aumenta el volumen aparente. Por lo tanto, al aumentar el volumen aparente de la cobertura vegetal se tiende a aumentar la rugosidad aerodinámica, elevando o desplazando el nivel de velocidad del viento cercana a cero de la capa de flujo de aire (Aiken *et al.*, 2003).

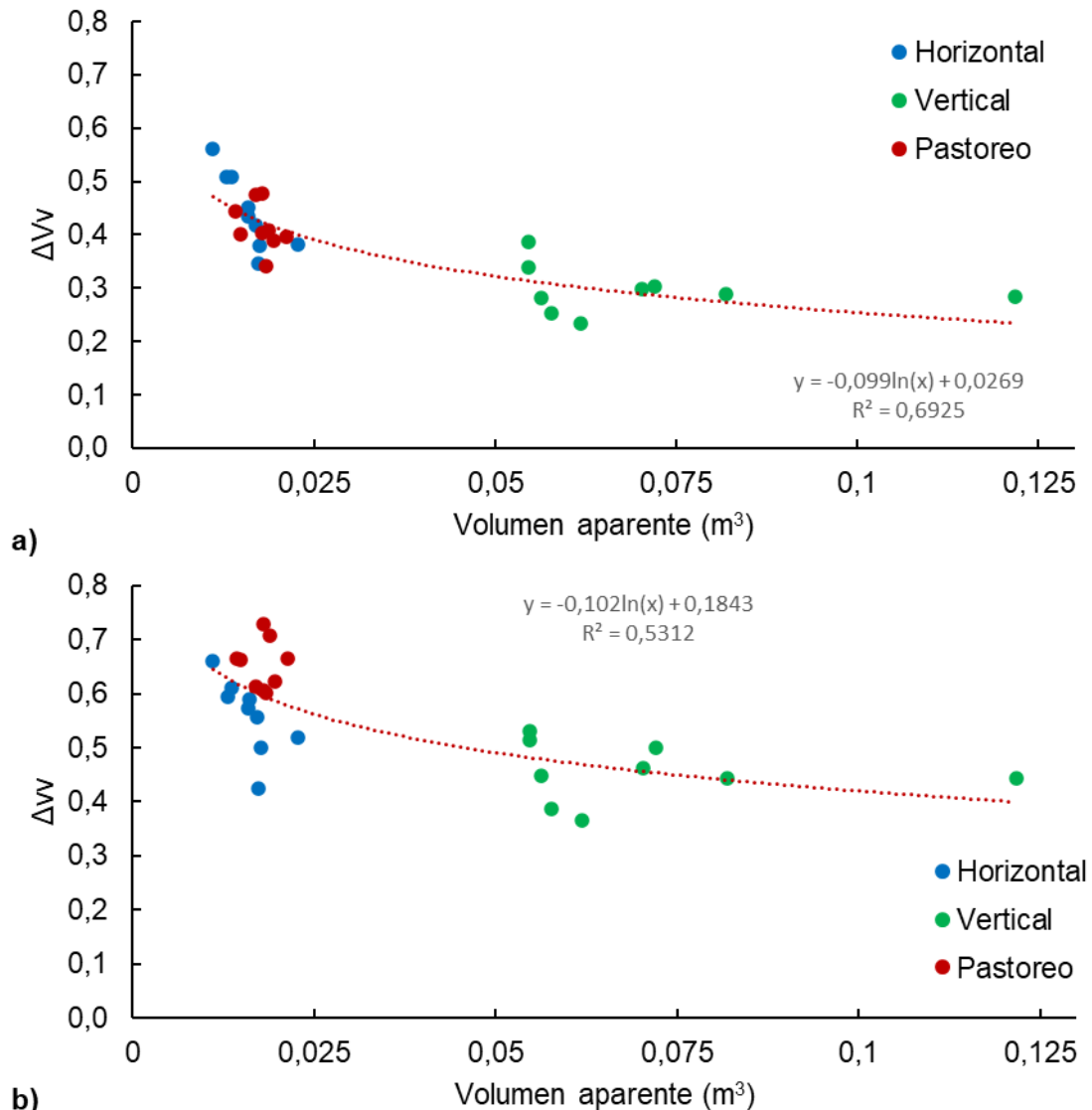


Figura 35. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y el ΔVv (velocidad del viento registrada / velocidad de referencia a 2 m de altura) a nivel de superficie (a) y a 40 cm (b) del suelo, en las disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo) del rastrojo del cultivo de trigo. Barbecho 2019.

A 40 cm sobre el nivel superficial del suelo, la relación entre el volumen aparente del rastrojo y la velocidad del viento y la diferencia entre las disposiciones horizontal y pastoreo fue menor que a nivel de superficie del suelo (Figura 35b). Asimismo, el mayor

volumen aparente del rastrojo vertical determinó la mayor reducción de la velocidad del viento.

Humedad del suelo a la siembra

Debajo del límite crítico de $0,025 \text{ m}^3$, no se observó relación entre el contenido de agua a la siembra en la capa superficial del suelo (0-10 y 10-20 cm) y el volumen aparente del rastrojo, tal como se observa en las disposiciones horizontal y pastoreo (Figura 36).

A partir del límite crítico, es decir el subgrupo de alto volumen aparente como lo es la disposición vertical del rastrojo, se ajustó una regresión cuadrática ($p < 0,01$) con incrementos en la humedad del suelo a mayor volumen aparente del rastrojo. El contenido de humedad máximo equivalente a 18,16 %, equivalente a capacidad de campo o máxima capacidad de retención de agua definida en función de las características físicas del suelo, se alcanzó con $0,13 \text{ m}^3$ de volumen aparente en la profundidad de 0-20 cm (Figura 36).

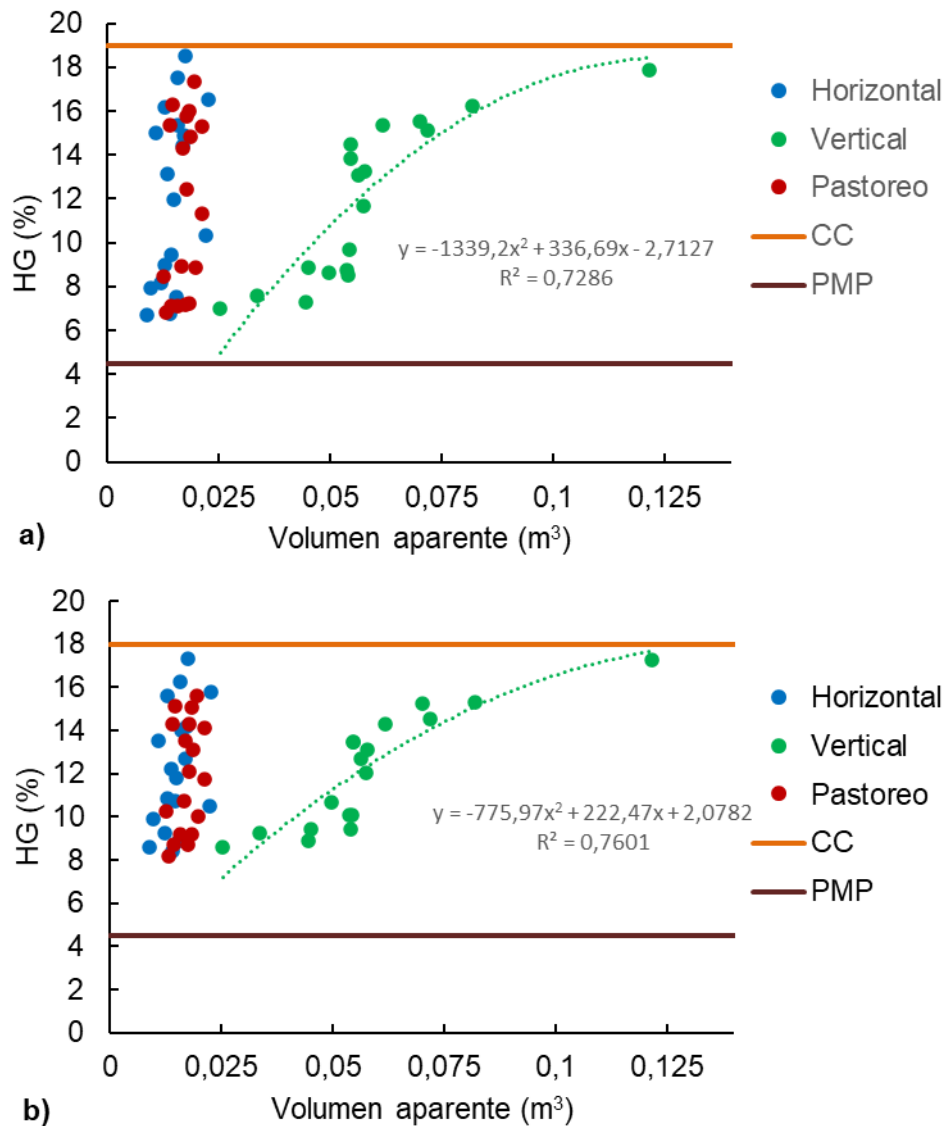


Figura 36. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y la humedad gravimétrica (HG) a la siembra del antecesor trigo y el cultivo de trigo del Ciclo II (2019 y 2020) a 0-10 (a) y 10-20 (b) cm, en las disposiciones horizontal, vertical y pastoreo del rastrojo de trigo.

Eficiencia de barbecho

Al igual que la humedad a la siembra, debajo del límite crítico de 0,025 m³ no se observó relación entre la eficiencia de barbecho y el volumen aparente del rastrojo, tal como se observa en las disposiciones horizontal y pastoreo (Figura 37).

A partir del límite crítico, es decir el subgrupo de alto volumen aparente como la disposición vertical del rastrojo, se ajusta una curva cuadrática ($p < 0,01$) con incrementos

en la eficiencia de barbecho a mayor volumen aparente del rastrojo. La eficiencia máxima equivalente a 30,6 % se alcanza con un volumen aparente de 0,12 m³ (Figura 37). Esta eficiencia de barbecho es similar a las mencionadas por numerosas investigaciones realizadas en el semiárido seco. Mediante una revisión realizada por Glave (1976), mencionan valores promedio de 29 % (entre 16 y 37 %) en áreas de secano de las grandes planicies de los Estados Unidos. Según Passioura & Angus (2010) solo el 25 a 30 % de la precipitación recibida durante dicho período se almacena en una rotación trigo-barbecho, dependiendo del ambiente y el manejo. Quiroga *et al.* (2003) encontraron que tan solo un 34 % de las precipitaciones durante el barbecho en SD lograron ser transferidas al ciclo de los cultivos. El porcentaje restante se pierde, debido principalmente a la evaporación (Holman *et al.*, 2016).

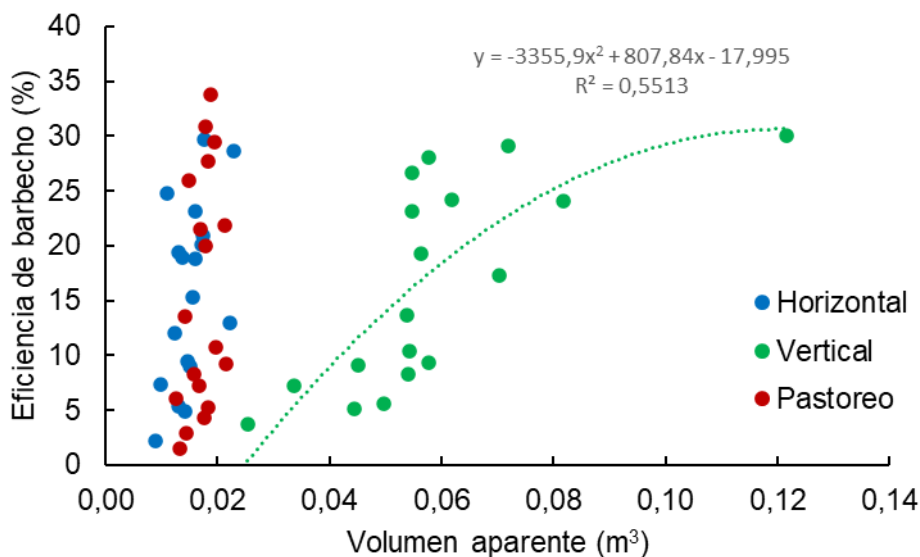


Figura 37. Relación entre el volumen aparente del modelo escaneado y la eficiencia de barbecho (EB), en las disposiciones (horizontal, vertical y pastoreo) del rastrojo del trigo Ciclo I y el antecesor trigo del Ciclo II. Barbecho 2019 y 2020.

El volumen aparente determinado con el prototipo de escáner LiDAR describió adecuadamente la composición o estructura de la cobertura del rastrojo de cultivos invernales. Este indicador tuvo una alta relación con las características biofísicas del rastrojo como la altura, biomasa total, biomasa del estrato superior e índice de área de tallo para valores de volumen aparente entre 0 y 0,13 m³. Por lo tanto, es posible caracterizar con mayor detalle las coberturas de los rastrojos invernales mediante la estimación de los parámetros a través de las mediciones realizadas con el prototipo de escáner LiDAR, constituyendo un abordaje simple que permite superar las limitaciones en tiempo, procedimiento y en las dimensiones de los métodos tradicionales de

estimación de la cobertura. Además, el indicador compuesto Dapr, que relaciona el volumen aparente y la biomasa, permitió describir la distribución y composición de los rastrojos.

Al incrementar el volumen aparente del rastrojo de cultivos de invierno tendió a disminuir la temperatura del suelo y la velocidad del viento a nivel superficial. Estos parámetros también permitieron diferenciar las estructuras planteadas.

El análisis de las variables de la interfase suelo-atmósfera permitió definir y caracterizar un límite crítico mínimo en los rastrojos de cultivos de invierno. Es decir, $0,025 \text{ m}^3$ de volumen aparente, 17 cm de altura, 1 Mg ha^{-1} de biomasa del estrato superior y 0,24 de índice de área de tallo. Este límite clasificó al rastrojo en dos subgrupos, de bajo y alto volumen aparente.

En el grupo de bajo volumen aparente no se encontró relación con la humedad del suelo en la capa superficial a la siembra y la eficiencia de barbecho, pero sí se observó una tendencia a disminuir la velocidad del viento con el aumento del volumen aparente.

A partir del límite crítico mínimo, se observó una relación significativa con la humedad del suelo en la capa superficial a la siembra y con la eficiencia de barbecho, obteniéndose el mayor contenido de agua y eficiencia con $0,12 \text{ m}^3$ de volumen aparente del rastrojo. Este límite crítico máximo se podría considerar como la estructura del rastrojo que se debería obtener para lograr la máxima eficiencia en la conservación del agua del suelo. Este volumen aparente es equivalente a 40 cm de altura, 4 Mg ha^{-1} de estrato superior de biomasa de rastrojo y 0,64 de IAT.

Las grandes variaciones observadas en la cobertura del suelo con rastrojos de cultivos de invierno podrían provocar diferentes resultados frente a la implementación de la L0. En aquellos trabajos donde se evalúen los efectos de la L0 sobre la dinámica del agua, es necesario especificar no solo el grado, sino que además la composición o estructura de la cobertura del suelo. Como se observó en el presente Capítulo, la misma práctica bajo diferentes situaciones podría generar diferentes características biofísicas de cobertura del suelo, lo que provocaría variaciones en el efecto de la L0. Asimismo, dada la variabilidad de cobertura lograda con la misma cantidad de residuos sería importante también especificar las características de los rastrojos en superficie. A partir del prototipo de escáner LiDAR desarrollado se podría facilitar la medición y caracterización de la cobertura del suelo con rastrojos en superficie.

Conclusiones

Se acepta la hipótesis. A partir del volumen aparente obtenido por el escáner LiDAR se logró diferenciar entre las estructuras de disposición del rastrojo establecidas. Además, se correlacionó con la altura, biomasa total, biomasa del estrato superior e índice de área de tallo del rastrojo, es decir, con los distintos parámetros que definen la estructura de la cobertura del suelo con rastrojo. Por lo tanto, esta tecnología permitiría facilitar y mejorar la determinación y descripción de la cobertura vegetal del suelo.

Además de correlacionar con los parámetros de la estructura del rastrojo, también lo hizo con los parámetros físicos como temperatura del suelo, velocidad laminar del viento, humedad del suelo y eficiencia de barbecho, que determinan la dinámica del microclima de la interfase suelo-atmósfera. Por lo tanto, permitió proponer un rango de estructura del rastrojo con efectos sobre la dinámica del agua del suelo.

Capítulo V

Eficiencia hídrica en suelos bajo labranza cero del semiárido austral pampeano

Introducción

La cantidad, disponibilidad y uso del agua del suelo son los principales factores que influyen en la producción de cultivos, especialmente en sistemas agropecuarios del secano semiárido (Smika & Unger, 1986). En estos ambientes, suele ser limitada el agua disponible para las plantas, siendo necesaria la implementación de prácticas de manejo que favorezcan su conservación para el éxito productivo de los cultivos.

La disponibilidad de agua para los cultivos depende, entre otros, de la capacidad de retención de agua útil de los suelos, la cantidad y distribución de las precipitaciones, los cultivos antecesores y la cobertura del suelo con rastrojos. El principal factor que causa la pérdida de agua del sistema es la evaporación, estimándose que entre el 50 y el 75 % de la precipitación anual retorna a la atmósfera sin intervenir en el proceso productivo (Bennie & Hensley, 2001; Casas, 2007).

En regiones semiáridas resulta muy importante la elección de cultivos que se adapten a su dinámica hídrica (Tanaka *et al.*, 2002), considerar la influencia del cultivo antecesor y el manejo del agua previo a la siembra. En la región es usual que las precipitaciones no cubran los requerimientos hídricos de los cultivos (Quiroga *et al.*, 2008; Passioura & Angus, 2010; Bono *et al.*, 2017).

La variabilidad en la cantidad y distribución de las precipitaciones ha sido tradicionalmente considerada uno de los principales factores que afectan la producción agropecuaria en la región semiárida y subhúmeda pampeana. De los beneficios atribuibles al barbecho, la acumulación de humedad en el suelo permite, dentro de ciertos límites, disminuir la incidencia de tal variabilidad climática. El manejo de la cobertura del suelo con rastrojos en superficie bajo L0 es un factor importante para conservar el agua del suelo al reducir la evaporación (Puricelli, 1977; Glave, 1979a; Smika, 1983; Raming & Ekin, 1984; Cantero-Martínez *et al.*, 1995; Kozak *et al.*, 2007b), aunque en algunos casos se destaca la escasa eficiencia hídrica de la práctica (Smika & Unger, 1986). Monzón *et al.* (2006) determinaron que son necesarios 1,86 mm de lluvia durante el período de barbecho por cada mm de capacidad de almacenaje de agua del suelo para maximizar el efecto del manejo de la cobertura del suelo por rastrojo.

Estudios locales observaron que únicamente bajo L0 se lograron coberturas que superaron 1 Mg ha⁻¹ rastrojo, equivalente al 30 % del suelo cubierto (Agamenonni *et al.*, 2012), es decir, umbral sugerido por la FAO (2017a) para ser considerado como AC. A su vez, al igual que otros trabajos (Larney & Lindwall, 1995), no observaron incrementos

en el agua útil a la siembra al compararlos con labranza vertical y convencional, concluyendo que los niveles de cobertura lograda permitirían reducir significativamente la erosión pero que no fueron suficientes para conservar el agua en el suelo.

Existen trabajos regionales en los que se evaluaron los niveles de cobertura logrados y su impacto sobre el almacenaje de agua en el suelo (Puricelli, 1977; Glave, 1979a; Kruger *et al.*, 2005; Quiroga *et al.*, 2005). Sin embargo, a nivel local existe poca información al respecto (Agamenonni *et al.*, 2012). Por lo tanto, en ambientes semiáridos y subhúmedos, como el semiárido austral pampeano, donde la variabilidad de las precipitaciones y las especies de cultivos de invierno pueden modificar tanto el aporte de residuos como su descomposición durante el barbecho, es importante conocer el nivel de cobertura de los suelos logrado bajo L0.

Además, tampoco existen trabajos evalúen o cuantifiquen las características de la composición o estructura del rastrojo y su interacción con almacenaje de agua del suelo. Según Flury *et al.* (2009) las características físicas más importantes que afectan la evaporación son el grosor (profundidad del rastrojo plano por encima de la superficie del suelo o la altura del rastrojo en pie) y la densidad (número de vástagos por superficie determinada) de la capa de residuos. Según McMaster *et al.* (2000), la altura, el diámetro y la densidad de vástagos determinan la eficacia de los rastrojos para reducir la velocidad del viento, ya que estas características determinan el área de silueta por la que debe pasar el viento. El efecto combinado de estos parámetros reduce el potencial de evaporación al ralentizar el intercambio convectivo de vapor, y absorbe la energía radiante que impulsa el proceso de evaporación (Hammel, 1996; McMaster *et al.*, 2000).

La Hipótesis planteada fue:

Los cultivos de invierno bajo labranza cero pueden alcanzar adecuados niveles de cobertura de suelo, pero dada las características de la estructura del rastrojo, no son suficientes para generar un impacto sobre la conservación del agua durante el barbecho.

El Objetivo del presente Capítulo fue:

Evaluar la generación de cobertura de rastrojos de cultivos de invierno y el impacto de la estructura del rastrojo sobre la eficiencia de barbecho en lotes de establecimientos agropecuarios bajo labranza cero en el semiárido austral pampeano.

Materiales y Métodos

Sitios de estudio

El estudio se llevó a cabo en cinco sitios del secano semiárido de los partidos de Villarino y Patagones, sur de la provincia de Buenos Aires, durante 2017-2019 (Figura 38). Se seleccionaron 31 lotes con cultivos de invierno bajo L0, sin intervenir con el manejo implementado por el productor.

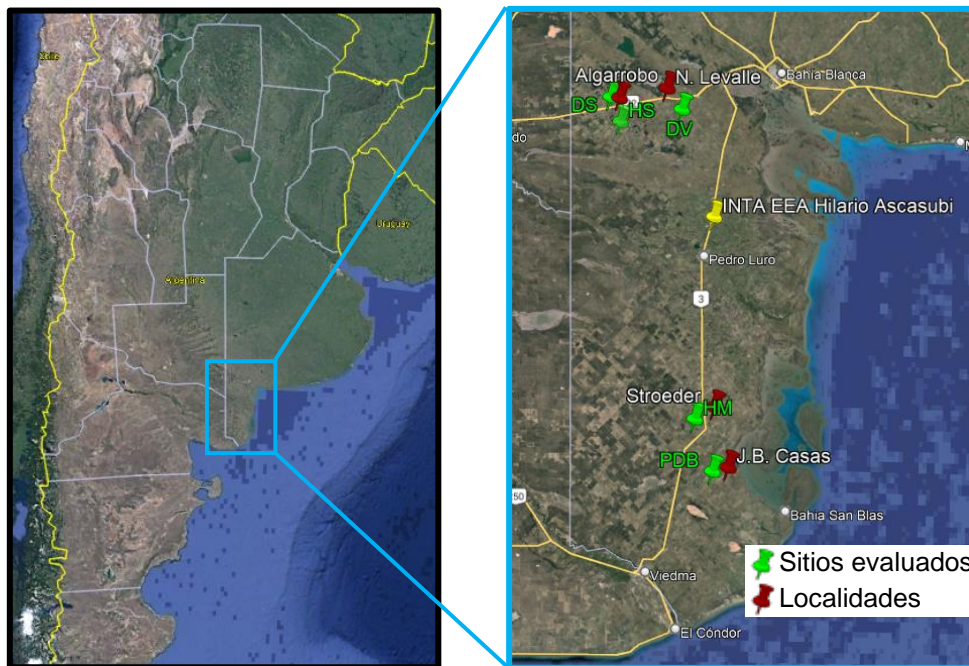


Figura 38. Localización geográfica de los sitios de estudio.

Sitios de estudio / Productores: Porfirio de Brito (PDB) 40°27'2.69"S, 62°37'48.88"O, Hugo Mendioroz (HM) 40°13'28.23"S, 62°44'20.53"O; Darío Valdman (DV) 38°56'20.42"S, 62°48'15.25"O, David Safi (DS) 38°53'27.66"S, 63°11'18.85"O y Hugo Sabugo (HS) 38°59'42.21"S, 63°8'9.06"O.

Los suelos de los productores Darío Valdman (DV), David Safi (DS) y Hugo Sabugo (HS) en Villarino, son Haplustol éntico, Ustortent típico y Calciustol Petrocalcico, respectivamente. Los suelos de los productores Hugo Mendioroz (HM) y Porfirio de Brito (PDB) en Patagones, son Haplustol arídico y Calciortides típico (INTA, 1990). La caracterización fisicoquímica del suelo, realizada en una muestra compuesta, indicó que se trataba de suelos representativos de las condiciones regionales del semiárido (Tabla 15).

Tabla 15. Caracterización química y física del horizonte superficial de suelo (0-20 cm) de los lotes al inicio del seguimiento en el secano de los partidos de Villarino y Patagones.

Sitio	Lote	MO	pH	Pe	Nt	A	L	Ar	Clase textural	IMO
		g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹			
DS	1	10,7	8,2	9	0,4	8	21	72	Franco Arenoso	3,7
	2	14,0	8,6	2	0,9	9	26	64		4,0
	3	11,4	8,6	3	0,8	7	20	73		4,2
	4	16,9	7,2	18	0,8	8	27	65		4,8
DV	1	11,8	7,5	18	0,7	7	12	81	Arenoso Franco	6,2
	2	16,3	7,6	12	1,1	9	23	67	Franco Arenoso	5,2
	3	16,6	7,7	9	1,0	7	26	67	Franco Arenoso	5,0
HS	4	12,0	7,5	10	0,9	7	13	80	Arenoso Franco	6,0
	1	13,4	8,2	6	0,8	9	19	72	Franco Arenoso	4,8
PDB	1	12,4	8,6	4	0,8	10	24	66	Franco Arenoso	3,6
	2	10,6	8,7	3	0,8	11	23	66		3,1
	3	9,9	8,0	13	0,7	9	16	75		4,0
	4	11,9	8,4	13	0,8	12	25	63		3,2
	5	12,3	8,7	6	0,8	9	25	66		3,6
HM	1	14,4	7,3	16	0,9	14	22	64	Franco Arenoso	4,0
	2	17,2	7,5	17	1,1	14	26	59		4,3
	3	9,6	7,5	15	0,6	4	15	81		5,0

MO: materia orgánica, escala semimicro (Walkley & Black, 1934); pH: contenido de iones hidrógeno (acidez / alcalinidad), potenciometría; CE: conductividad eléctrica, conductimetría; Pe: fósforo extraíble (Bray & Kurtz, 1945); Nt: nitrógeno Kjeldahl, escala semimicro (Bremner, 1996); A: arcilla, hidrómetro de Bouyoucos; L: limo, hidrómetro de Bouyoucos; Ar: arena, separación gravimétrica; IMO: indicador de la relación entre la materia orgánica y la fracción arcilla + limo (Pieri, 1995). Método del hidrómetro de Bouyoucos (1962), modificado por Red de Laboratorios INTA de Suelos, Agua y Material Vegetal (RILSAV).

Descripción del seguimiento

En cada lote se georreferenciaron tres puntos con GPS, con un distanciamiento de aproximadamente 50 m entre sí, para realizar en la misma ubicación los muestreos sucesivos en los momentos y años posteriores (Figura 39). Cada punto definió el centro del área circular de muestreo, establecida por un radio de 20 m. Se tuvo en cuenta que los mismos fueran representativos del lote, minimizando la variabilidad espacial en las propiedades bajo evaluación.



Figura 39. Se ejemplifica un lote (productor DS) con los tres puntos georreferenciados (pinches amarillos) como centro del área de muestreo (circulo azul).

Suelo y clima

Se realizaron muestreos de suelo a la siembra y cosecha de cada cultivo. Para ello se tomó una muestra compuesta por 15 submuestras dispuestas al azar, mediante un barreno acanalado en cada área de muestreo. Las muestras se extrajeron a las profundidades 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 y 60-90 cm.

La lámina de agua total del suelo (LAT) fue estimada mediante la determinación de la humedad por el método gravimétrico y la densidad aparente por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986).

La precipitación mensual durante el período de seguimiento y el promedio histórico (1891-2021) se obtuvo de NASA POWER (Prediction of World Energy Resources, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>). Los datos se obtuvieron mediante la geolocalización de cada establecimiento, mediante el modelo MERRA-2, GPCP y TRMM (White *et al.*, 2008; Stackhouse *et al.*, 2016). El conjunto de datos POWER se ha utilizado en investigaciones de simulación de rendimiento de cultivos (Monteiro *et al.*, 2018; Duarte & Sentelhas, 2020) y se han validado con datos obtenidos *in situ* (de Aguiar & Junior, 2020; García *et al.*, 2022). POWER tiene una resolución espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de la tierra global y está disponible desde 1981 hasta la actualidad con una resolución temporal diaria.

Para el análisis del impacto global de las precipitaciones, el período de barbecho se subdividió en dos sub-períodos correspondiente a los meses de mayor temperatura del verano; enero-febrero y los meses templados del fin de verano-inicio del otoño; marzo-

mayo. Por su parte, las precipitaciones caídas durante el ciclo de los cereales invernales se agruparon en dos sub-períodos. Por un lado, se consideraron las precipitaciones de los meses de junio a octubre, cuando acontecieron las etapas de siembra a aparición de la estructura reproductiva (Z5.0, espigazón o panojamiento), y las de noviembre-diciembre que abarcan desde ese período hasta la madurez fisiológica (Z9.0), cuando se define el tamaño de los granos.

Biomasa aérea durante el ciclo del cultivo

Al final de cada cultivo, luego de madurez fisiológica, se realizó un corte manual y recolección de dos líneas de siembra adyacentes ($0,175 \text{ m}^2$), con dos repeticiones por área de muestreo. Se determinó la altura del vástago fértil (AL_{Tvf}), considerando desde el nivel del suelo hasta el extremo superior de las aristas de la espiga o panoja ($n = 10$ vástagos fértiles); la densidad de vástagos fértiles ($N^{\text{ovf}} \text{ m}^{-2}$) se determinó mediante el conteo manual de la cantidad de vástagos fértiles por repetición para luego llevarlo a m^2 , la biomasa fresca total mediante el pesado de toda la biomasa recolectada. Luego, se realizó el trillado mediante una trilladora estacionaria para estimar el rendimiento en grano. Se realizó la diferencia entre la biomasa total (B_{tot}) y biomasa de grano (Grano) para estimar el aporte de biomasa de rastrojo (Rastrojo). La biomasa total, el rendimiento en Grano y la biomasa de Rastrojo se expresaron como materia seca, previo secado a estufa (60°C) hasta peso constante. El índice de cosecha (IC) se calculó como cociente entre la biomasa seca de grano y biomasa seca aérea total.

El uso consuntivo (UC) o agua consumida se calculó a partir del balance determinado por la diferencia en el almacenaje de agua en el suelo al inicio y final del período de cultivo y de las precipitaciones, aplicando la ecuación [1] desarrollada en el Capítulo I. Este método de cálculo asume escurrimiento cero (López & Arrúe, 1997).

Las estimaciones de eficiencia de uso del agua para la acumulación de biomasa seca total, de grano y de rastrojo (EU_{Abtot}, EU_{Agr} y EU_{Arast}, en $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) se calcularon mediante el cociente entre B_{tot}, Grano y Rastrojo (kg ha^{-1}) y el UC (mm), aplicando las ecuaciones 2, 3 y 4, respectivamente (López & Arrue, 1997). Estas ecuaciones se encuentran desarrolladas en el Capítulo I.

Estructura del rastrojo durante el barbecho

Para el muestreo se evitaron sectores con notoria recarga de material muerto, para minimizar el efecto de la desuniformidad espacial en la distribución de rastrojo. Al inicio

del barbecho, además de la biomasa de rastrojo (Rastrojo) a partir del valor de aporte de cada antecesor, se estimó la altura del rastrojo (ALTrastIB) mediante la utilización de una regla (n = 10 repeticiones por área de muestreo).

Al final del barbecho se estimó la cobertura del suelo (CobFB), la biomasa de rastrojo (BRastFB) y el índice de área de tallo (IAT). En primera instancia se estimó utilizando fotografías del rastrojo (n = 10 repeticiones por área de muestreo) dentro de un marco de 0,25 m² (0,5 x 0,5 m) dispuesto al azar. Las fotos se tomaron desde una altura de 1,2 m en una posición perpendicular a la superficie del suelo (López *et al.*, 2015). Se utilizó un equipo celular Motorola E7 plus para tomar las fotografías, que contaba con dos cámaras con 48 megapíxeles (MP) principales y 2 MP para lecturas de profundidad. Las fotografías se procesaron mediante el programa CobCal v2.1 para estimar el grado de cobertura del suelo, expresado como porcentaje (Ferrari *et al.*, 2008). Luego se procedió a recolectar la biomasa contenida en el marco de 0,25 m² dispuesto al azar (n = 2 repeticiones por área de muestreo). El rastrojo recolectado se llevó a estufa (60°C) hasta peso constante. La estimación del IAT se realizó de acuerdo con la ecuación [5] y metodología descrita en el Capítulo II.

Análisis estadístico

Se realizó la estadística descriptiva de todas las variables determinadas, separadas según el cultivo antecesor. Para analizar la relación entre cantidad de residuos en superficie y cobertura del suelo se realizó un análisis de regresión no lineal en dos tramos, donde se ajustó una recta lineal ascendente hasta un punto de inflexión a partir del cual se alcanza una meseta. Se efectuaron análisis de componentes principales (ACP) con los datos estandarizados. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2020).

Resultados y Discusión

Condiciones agroclimáticas durante los ciclos

En el área de estudio las precipitaciones anuales ocurridas durante el período 2017-2019 fueron entre 300 y 700 mm, representando una probabilidad de ocurrencia entre 10 y 90 %. Asimismo, en el 60 % de los ambientes evaluados ocurrieron precipitaciones por encima del promedio, representando una probabilidad menor al 40 %, es decir, que en 4 de cada 10 años ocurren los niveles de lluvia medidos (Figura 40).

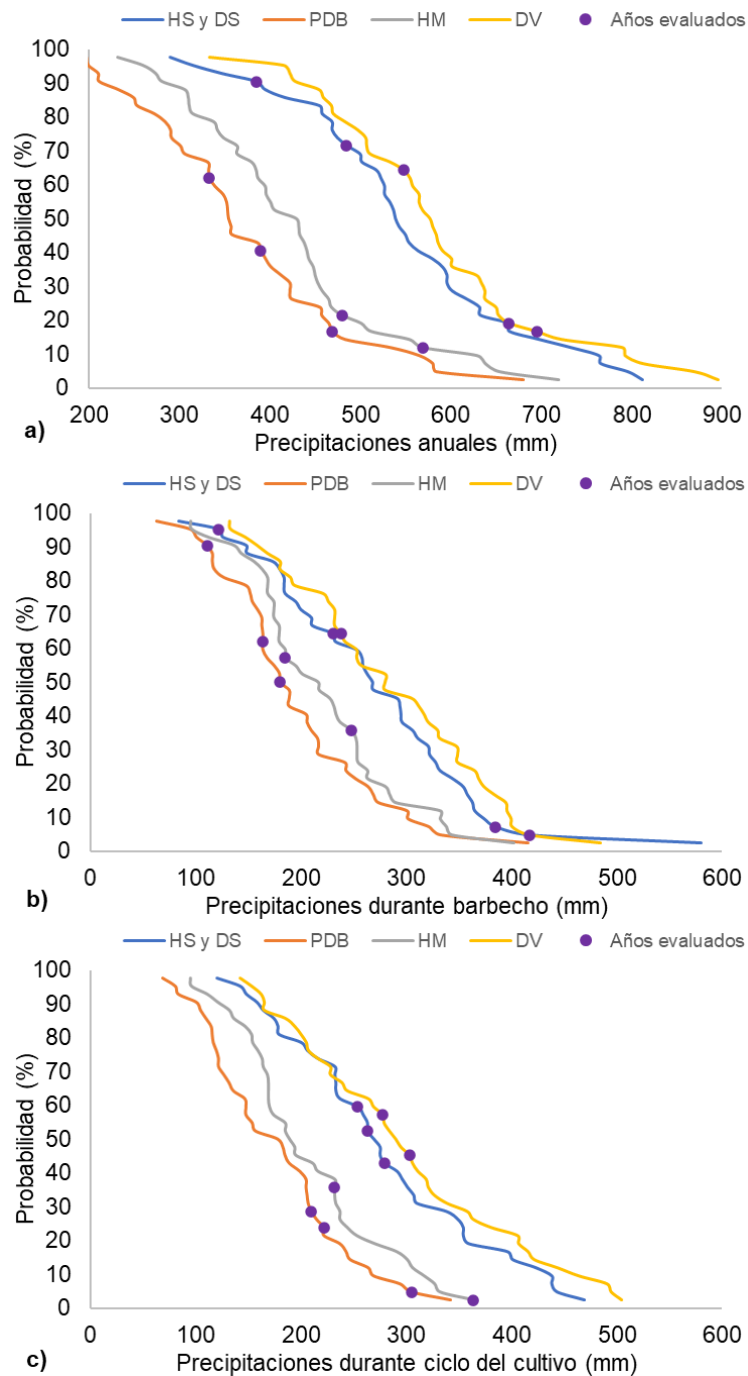


Figura 40. Probabilidad de ocurrencia de precipitaciones para el acumulado anual (a), durante el barbecho (b) y el ciclo del cultivo (c) a partir del promedio histórico de los productores evaluados. Además, se incluye el acumulado en los tres períodos de los años evaluados.

DS: David Safi, DV: Darío Valdman, HS: Hugo Sabugo, PDB: Porfirio de Brito, HM: Hugo Mendioroz.

En el promedio histórico de los ambientes evaluados, se observó que el 50 % de las precipitaciones anuales se producen durante el barbecho y la otra mitad durante el ciclo

del cultivo de trigo, lo cual se vio reflejado en el 60 % de los años evaluados (Figura 40, por más detalles ver Anexo 10).

Durante el ciclo del cultivo ocurrieron entre 200 y 400 mm durante el período 2017-2019 (ver Anexo 10), mayormente por debajo de la requerida para el cultivo de trigo, que asciende a 350 mm (Bono *et al.*, 2010), a pesar que representan una baja probabilidad (menor al 60 %, Figura 40). Es decir, las lluvias ocurridas durante el período evaluado tendieron hacia el potencial de precipitaciones para los ambientes.

La precipitación ocurrida durante el período en que se define el número de granos por superficie, estrechamente asociado al rendimiento (Magrin *et al.*, 1993; Slafer *et al.*, 1994), fue mayor que durante el período posterior de llenado de granos. Además, durante el período crítico que se definía la densidad de órganos reproductivos (espigas o panojas), durante octubre y noviembre (Quiroga & Paccapelo, 1990; Kruger, 2015), se acumularon entre 90 y 170 mm, es decir, entre el 30 y 70 % de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (ver Anexo 10).

Las precipitaciones durante el barbecho oscilaron entre 100 y 400 mm, las cuales son importantes para iniciar el ciclo del cultivo con una reserva de agua en el suelo, complementando las lluvias durante el ciclo para cubrir los requerimientos hídricos del cultivo en función del déficit estimado entre 50 y 150 mm. En general, las precipitaciones durante el período inicial del barbecho (verano) fueron menores que el final (otoño). En este último período ocurrieron por encima del 60 % de las precipitaciones del barbecho lo que favoreció la recarga hídrica del perfil y el menor tiempo de exposición a la pérdida de agua por evaporación. Teniendo en cuenta que el promedio de la profundidad efectiva del perfil del suelo es de 1,2 m y la capacidad de retención de agua útil de los suelos es de 8 mm cada 10 cm, resultaría posible almacenar 96 mm en el total del perfil (Israelsen & Hansen, 1972; Sanchez *et al.*, 1998).

Caracterización del rastrojo de los antecesores

El 84 % de los lotes muestreados estuvo cultivado con gramíneas invernales, principalmente trigo (78 %) y en menor medida cebada y avena (3% cada uno). El 16 % restante fue el cultivo de vicia. La presencia dominante del cultivo y antecesor trigo concuerda con la alta implementación del monocultivo de este cereal en el semiárido austral pampeano (Iurman, 2009; Cantamutto *et al.*, 2016).

La densidad de tallos fértiles fue de 300, es decir, se encontró por encima de 200 vástagos fértiles m^{-2} (Tabla 19 en Anexo 11), límite considerado suficiente para alcanzar el rendimiento esperable en los mejores años (Cantamutto *et al.*, 2016). Además, superó los 280 vástagos fértiles m^{-2} , límite por encima del cual se consideran altas densidades de tallos, ofreciendo una mayor protección contra los vientos y las pérdidas de agua por evaporación directa del suelo (McMaster *et al.*, 2000). Estos autores observaron que se requiere una altura de corte del rastrojo de 45 cm para lograr el 80 % de los beneficios máximos de conservación de agua para densidades de 300 tallos m^{-2} . Bajo las condiciones del área bajo estudio, con cultivos generalmente bajos, esa altura de corte acarrearía altas pérdidas de espigas.

La biomasa total acumulada por los cereales invernales fue en promedio 6 Mg ha^{-1} (entre 2 y 14 Mg ha^{-1}). Ello determinó a partir del IC 0,4 un rendimiento de grano de $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, es decir, niveles por encima de los promedios obtenidos en la zona de $1,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ (www.siiia.gob.ar).

La biomasa de rastrojo remanente luego de la cosecha de los cereales invernales se encontró entre $1,3$ y $9,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Tabla 19 en Anexo 11). La mayoría de los casos (93 %) presentó niveles de biomasa de rastrojo por debajo del valor indicativo de $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ propuesto por Unger (1978) y Quiroga *et al.* (2005), como umbral mínimo para lograr una buena protección del suelo.

El uso consuntivo, fue en promedio cercano a 300 mm (Tabla 20 en Anexo 11), similar al observado por Bono *et al.* (2017) pero por debajo de otros valores observados en la región, cercanos a 400 mm (Quiroga & Paccapelo, 1990; Scianca *et al.*, 2006; Barraco *et al.*, 2009). La EUAgr fue de $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ cercano al límite inferior observado en experimentos regionales (Iglesias *et al.*, 1990; Caviglia *et al.*, 2001; Venanzi *et al.*, 2006; Martínez, 2011, Gaggioli *et al.*, 2018), dentro de un rango entre 3 a $21 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Esto demostraría la posibilidad de alcanzar los niveles de producción potenciales de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ propuestos por Cantamutto *et al.*, 2016 empleando modelos extrapolados de otras regiones semiáridas.

La eficiencia de utilización de agua para la producción de biomasa de rastrojo fue de $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Por lo tanto, serían necesarios más de 650 mm de agua para alcanzar el umbral de biomasa de rastrojo mencionado. Los registros pluviométricos históricos de los sitios bajo estudio muestran que las precipitaciones durante el ciclo del cultivo rondan

en 200 y 300 mm, y el barbecho rondan entre 200 y 270 mm para Patagones y Villarino, respectivamente.

Teniendo en cuenta que la densidad de vástagos de los cereales invernales mostró valores compatibles con el potencial de rendimiento, IAT estuvo limitado por la altura del rastrojo remanente, condicionado por el bajo porte del cultivo. La altura del rastrojo se encontró entre 10 a 30 cm. A pesar de ello, parece tener una baja exposición del suelo debido a que no se observaron signos de erosión en ninguna de las situaciones evaluadas.

Al final del barbecho, la biomasa de rastrojo en las gramíneas fue de 2,7 Mg ha⁻¹, es decir, se redujo en 1,3 Mg ha⁻¹ durante el período del barbecho. Estas características del rastrojo definieron que la cobertura del suelo fuera 63 % (Tabla 21 en Anexo 11), valor por encima del límite sugerido por la FAO (2017a) para la agricultura de conservación, pero por debajo del 80 % definido para lograr una reducción sustancial de la evaporación del agua del suelo (Klocke *et al.*, 2009). Solo el 20 % de los casos estuvo por debajo del umbral inferior, menor al 50 % de los lotes bajo L0 observado por López *et al.* (2015). Además, el 50 % de los casos estuvo por encima del umbral superior.

En concordancia con Van Doren & Allmaras (1974) y Agamenonni *et al.* (2012), se obtuvo el 30 % de cobertura del suelo con 1 Mg ha⁻¹ de biomasa de rastrojo (Figura 41 en Anexo 11). Por su parte, López *et al.* (2015) obtuvieron la misma cobertura con el doble de biomasa de rastrojo. La máxima cobertura de suelo se alcanzó con 3,4 Mg ha⁻¹ de rastrojo, muy por debajo de los 10 Mg ha⁻¹ observado en otros trabajos (Scopel *et al.*, 1998; López *et al.*, 2015). Debajo de 3,4 Mg ha⁻¹, se observó una relación lineal entre cobertura y biomasa de rastrojo, con incrementos aproximados al 30 % en la cobertura por cada unidad de biomasa en Mg ha⁻¹. Por encima de ese umbral, el incremento en la biomasa no se reflejó en el grado de cobertura (Figura 41).

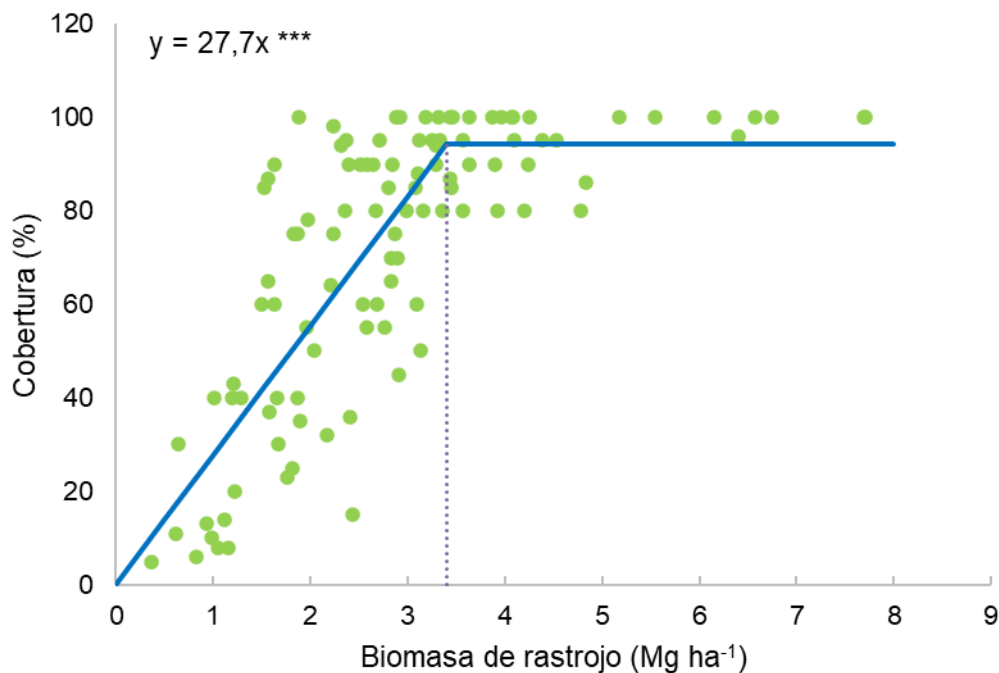


Figura 41. Relación entre biomasa superficial de rastrojo y cobertura de suelos en los sitios evaluados (n=105).

Utilizando como referencia el umbral mínimo de estructura del rastrojo definido en el Capítulo IV, es decir, 17 cm de altura, 1 Mg ha⁻¹ de biomasa del estrato superior y 0,24 de índice de área de tallo del rastrojo, se clasificó las estructuras del rastrojo evaluadas en el presente Capítulo. En promedio, la mayoría de los lotes presentaron características que se encuentran al límite o por debajo del umbral definido entre alto y bajo volumen aparente y en consecuencia sería esperable la falta de relación de las características del rastrojo con la eficiencia de barbecho.

Solo el 20 % de las estructuras del rastrojo evaluadas se encontró por encima del umbral mínimo establecido y a su vez, solo el 10 % presentaría una composición que permitiría alcanzar la máxima eficiencia de conservación del agua (Figura 42).

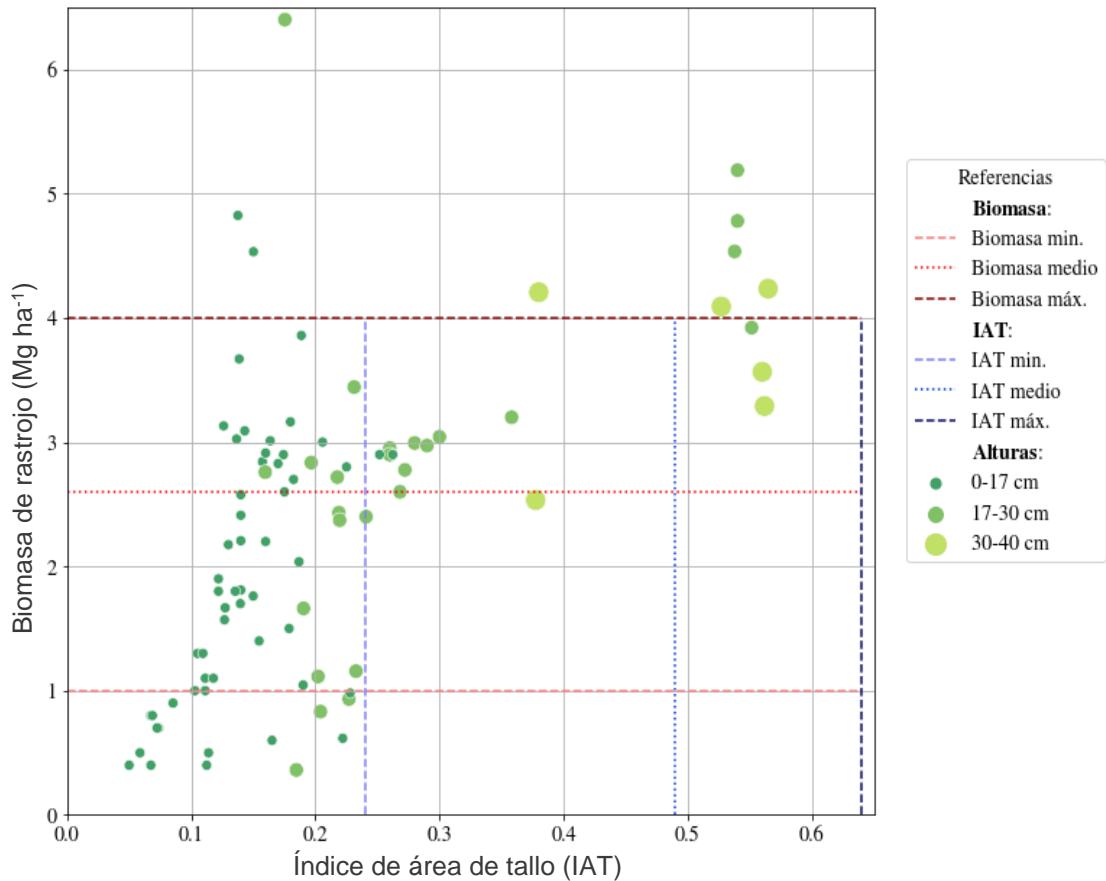


Figura 42. Relación entre las características de la estructura del rastrojo (altura, biomasa de rastrojo e índice de área de tallo) evaluadas en lotes de productores del secano de Villarino y Patagones.

La eficiencia de barbecho con rastrojo de gramíneas fue del 24 %. Además, presentó una mayor variabilidad, es decir, alcanzando a obtener valores negativos y positivos elevados (Tabla 22 en Anexo 11).

El análisis de componentes principales mostró la falta de relación entre la eficiencia de barbecho y la biomasa y grado de cobertura del rastrojo, pero sí correlacionó con el IAT (Figura 43). A pesar de esto, tal como se menciona previamente, la mayoría de las estructuras se encontraron por debajo del límite crítico mínimo y en consecuencia se asocia con la falta de relación con la eficiencia de barbecho. Por lo tanto, si solo consideramos el criterio de porcentaje de suelo cubierto, en el 60 % de los casos habría un impacto sobre la eficiencia de barbecho, con lo cual estaríamos obteniendo conclusiones incorrectas en base a la evaluación realizada. Esto demostraría la importancia de considerar las características de la estructura del rastrojo para definir el impacto sobre la conservación del agua en el suelo.

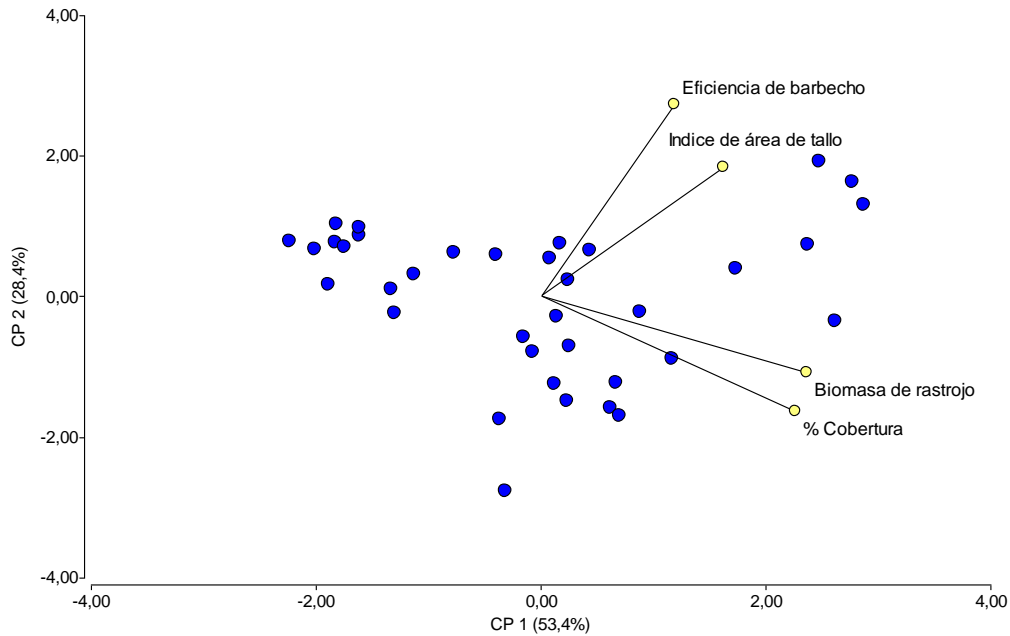


Figura 43. Análisis de componentes principales de las variables del barbecho de los cultivos invernales del secano de los partidos de Villarino y Patagones.

Conclusiones

Se acepta la hipótesis. Más de dos tercios de los lotes bajo L0 en el secano del semiárido austral pampeano presentaron una cobertura del suelo mayor a la establecida por la bibliografía como necesaria para considerarla agricultura de conservación, la que le proporciona una adecuada protección contra la erosión. Además, la mitad de los lotes presentaron una cobertura del suelo mayor a la establecida por la bibliografía como necesaria para reducir en forma sustancial la evaporación del suelo.

A pesar del grado de cobertura observado no hubo un impacto sobre la eficiencia de barbecho, ya que la mayoría de las estructuras del rastrojo evaluadas se encontraron por debajo del umbral mínimo, es decir, con mayor grado de exposición o pérdida potencial del suelo por la acción del viento y el potencial de evaporación. Son necesaria futuras evaluaciones sobre la cantidad y estructura de las coberturas para tener una idea más clara de su impacto sobre la eficiencia de uso del agua.

Capítulo VI

Discusión general y Conclusiones

Discusión general

En ambientes semiáridos, la sustentabilidad de los sistemas de producción resulta dependiente del aporte de residuos vegetales (Quiroga & Gaggioli, 2010). En el presente estudio, tanto a nivel experimental como en campos de productores, se observó la factibilidad de lograr un adecuado nivel de biomasa y grado de cobertura de suelo mediante L0. En la mayoría de las situaciones evaluadas se superó el umbral mínimo de 30 % de cobertura que es el valor recomendado para reducir la erosión eólica (FAO, 2017a). Este nivel de cobertura resultó equivalente a 1 Mg ha⁻¹ de biomasa de rastrojo. Asimismo, no se observaron signos de erosión eólica en ninguna de las situaciones evaluadas, a pesar que este proceso tuvo lugar en varios sectores del área estudiada, asociado al manejo convencional con suelo desnudo y al sobrepastoreo.

En condiciones experimentales el nivel de biomasa de rastrojo al inicio del barbecho se encontró por encima de 8 Mg ha⁻¹, principalmente con antecesor centeno. Con ese nivel de acumulación de biomasa la cobertura de suelo fue de 80 %. Ambos parámetros superan los umbrales aceptados para lograr una reducción sustancial de la evaporación del agua del suelo (Unger, 1978; Quiroga *et al.*, 2005; Klocke *et al.*, 2009). Entre los cereales estudiados, el centeno aportó el mayor nivel de biomasa de rastrojo (20 % por encima del trigo y avena), con buena persistencia durante el período de barbecho. La inclusión del centeno como antecesor del trigo en la generalizada rotación bianual que alterna el trigo con un período anual de descanso en el que generalmente se sobrepastorea, permitiría atenuar la pérdida de carbono orgánico de los suelos, mejorar la dinámica de uso del agua y lograr buena cobertura para prevenir la erosión. Asimismo, se debe tener presente dos aspectos claves para el cultivo de trigo. Por un lado, la mayor biomasa de rastrojo de centeno podría dificultar la siembra e implantación y por lo tanto la densidad de plantas logradas. Por el otro, la limitación en el control de plantas voluntarias de centeno sobre el cultivo de trigo, lo cual suele expresarse vulgarmente como “el centeno ensucia los trigos”, ya que no existen herbicidas selectivos.

En la mitad de los lotes de productores relevados se observó que el grado de cobertura era casi completo. Teniendo en cuenta esto, se podría suponer un impacto positivo de los rastrojos en superficie sobre la eficiencia hídrica del barbecho. Aunque se acepta que existe una fuerte relación entre el grado de cobertura por los residuos vegetales y el agua almacenada en el suelo (Greb *et al.*, 1967; Unger, 1976; Wilhelm *et al.*, 1986; Quiroga *et al.*, 1996), esta relación no se observó en los casos evaluados.

La biomasa y el grado de cobertura del suelo son descriptores que presentan limitaciones para caracterizar el beneficio de los rastrojos sobre la dinámica del agua. La principal limitante que presenta la expresión de la cobertura en términos de porcentaje es que considera un único plano (bidimensional). Sin embargo, se conoce que la dimensión tridimensional o estructura del rastrojo determina grandes diferencias que no se manifiestan en el plano bidimensional. La estructura del rastrojo no solamente determina el grado de suelo cubierto bajo una misma biomasa de rastrojo, sino que modifica el microclima de la interfase suelo-atmósfera y, por lo tanto, el grado de conservación del suelo y el agua (Van Doren & Allmaras, 1978; Smika, 1993; McMaster *et al.*, 2000; Swella *et al.*, 2015).

Las disposiciones de rastrojo investigadas en esta tesis tuvieron mayor impacto sobre el nivel de biomasa y grado de cobertura de suelo, que los antecesores. Mediante el manejo del rastrojo se logró una cobertura de suelo cercana al 100 % cuando estaba dispuesto de manera horizontal. El planchado del rastrojo podría servir para mitigar la erosión eólica e incrementar la conservación del agua en el suelo.

Contrariamente a lo esperado, aunque el pastoreo mecánico de los rastrojos redujo hasta 70 % el aporte de biomasa superficial, el grado de cobertura de suelo tuvo una merma menor, sin descender por debajo del umbral o límite por el cual aumentaría el riesgo de erosión eólica. Por lo tanto, bajo las condiciones estudiadas, la reducción en la cobertura por pastoreo mecánico parece no favorecer la pérdida de suelo por erosión. Ello podría ser diferente bajo pastoreo directo con animales, donde el pisoteo pulveriza la capa superior del suelo, afectando la generalizada débil estructura de los suelos de este ambiente. El aprovechamiento del rastrojo de cereales de invierno con ganadería podría exponer al suelo a procesos de erosión eólica, aún con coberturas por encima del 30 %. La extracción parcial de rastrojo mediante pastoreo disminuye el contenido de carbono del suelo. Bono (2010) considera que en la región pampeana semiárida el contenido de C de los residuos tiene mayor efecto que la labranza sobre el balance de C del suelo.

Tanto los antecesores como las disposiciones del rastrojo demostraron diferencias en los parámetros que definen la estructura del rastrojo. La disposición del rastrojo repercutió sobre el microclima de la interfase suelo-atmósfera, amortiguando los cambios de temperatura del suelo, disminuyendo la velocidad laminar del viento a nivel de superficie y aumentando la retención de agua. El rastrojo horizontal fue el más efectivo para amortiguar las variaciones de la temperatura ambiental e incrementar el

contenido de agua en el suelo. Esto se describió en el Capítulo II, cuando se realizaron mediciones luego de un evento de lluvia extrema. El rastrojo vertical se caracterizó por presentar la mayor protección frente a los efectos del viento, pero no superó el contenido de agua obtenido por el rastrojo horizontal. En función de lo observado, la temperatura parece tener un impacto mayor que el viento sobre el contenido de agua del suelo durante el barbecho extendido entre enero y mayo. La práctica del pastoreo demostró el menor efecto amortiguador de las temperaturas y la velocidad del viento, que impactó en el menor contenido de agua del suelo. En función de lo expuesto durante la tesis se reafirma el impacto negativo de la práctica del pastoreo sobre la sostenibilidad de los sistemas.

Tal como se observó, el impacto de los cambios en las coberturas con rastrojos ocurrió a nivel de interfase suelo-atmósfera, que incluye una capa de la atmósfera, la cobertura superficial, y los horizontes superiores del suelo (Steiner & Schomberg, 1996; Kruger *et al.*, 2014). En tanto, la presencia de agua gravitacional por debajo de 60 cm que supone el aporte del nivel freático (Capítulo II, ver Anexo 8), no anularía el efecto de la cobertura en el microclima de dicha interfase y por ende en los contenidos de agua observados en los primeros centímetros de suelo. Por ello, no se esperaría un impacto en las etapas iniciales del cultivo, pero sí en estados avanzados que conduciría a sobreestimar los valores de eficiencia de uso de agua para la producción de grano, alcanzando valores de alrededor de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ tal como se observan en el Capítulo I. En los cultivos manejados por los productores, la eficiencia de uso de agua para la producción de grano fue en promedio $9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, pero en algunos casos alcanzó el mismo valor máximo que se observó a nivel de las parcelas experimentales.

Al demostrarse el impacto de la estructura del rastrojo sobre el microclima de la interfase suelo-atmósfera, el desarrollo del escáner LiDAR mostró capacidad para estimar dicha estructura de la cobertura del rastrojo (Capítulo III). Mediante la utilización de este equipo resultó posible realizar mediciones de la estructura del rastrojo, y demostrar la relación con el indicador volumen aparente. Ello permite superar las limitaciones en la determinación a campo de los parámetros que componen la estructura.

Esta relación permitió proponer un umbral mínimo de los parámetros de la estructura del rastrojo de cultivos de invierno bajo las condiciones evaluadas, tales como: $0,025 \text{ m}^3$ de volumen aparente, equivalentes a 17 cm de altura, 1 Mg ha^{-1} de biomasa del estrato superior y 0,24 de índice de área de tallo. A partir de este umbral se observó una relación directa de entre el volumen aparente y la eficiencia hídrica del barbecho y el contenido

de agua a la siembra del cultivo siguiente. La máxima eficiencia de barbecho ($EB = 30\%$) y contenido de agua en su máxima capacidad de retención (humedad gravimétrica = 18%) se alcanzaría con un volumen aparente de rastrojo de $0,12\text{ m}^3$, es decir, 40 cm de altura, 4 Mg ha^{-1} de estrato superior de biomasa de rastrojo y $0,64$ de IAT.

Estos umbrales de referencia permitieron analizar las estructuras de rastrojo en lotes de productores y explicar la falta de relación entre los niveles de biomasa y grado de cobertura, con la eficiencia de barbecho bajo situaciones en campo de productores. Si bien presentaron niveles de biomasa de rastrojo y porcentaje de suelo cubierto según lo establecido por la agricultura de conservación, la mayoría de la evaluaciones de la estructura del rastrojo en los campos de los productores se encontraron por debajo del umbral mínimo. En condiciones experimentales, los rastrojos verticales mostraron parámetros por encima de estos umbrales, y presentaron una relación positiva entre el volumen aparente y la eficiencia de barbecho.

En tal sentido, estos umbrales permitirían sentar las bases para manejo de la estructura del cultivo, la cosecha y el rastrojo durante el barbecho ya que definen la estructura final del rastrojo a partir del cual se incrementa eficiencia hídrica durante el barbecho.

Validación de las hipótesis

Capítulo I

“Los cultivos de invierno antecesores y la disposición de su rastrojo durante el barbecho, difieren en el aporte de biomasa y grado de cobertura al suelo y, en consecuencia, condicionan la productividad del trigo”.

Capítulo II

“El cereal antecesor y la disposición de los residuos vegetales determinan la estructura del rastrojo, modificando la incidencia de la temperatura y el viento y, en consecuencia, el contenido de agua edáfica durante el barbecho para el cultivo de trigo”.

Capítulo III

“Es factible desarrollar una metodología de medición de la cobertura vegetal del suelo en tres dimensiones incorporando, a la descripción bidimensional, la escala vertical de la distribución de la cobertura del suelo”.

Capítulo IV

“El volumen aparente obtenido mediante el prototipo de escáner LiDAR permite estimar la estructura del rastrojo de cultivos de invierno y eso se refleja en el microclima de la interfase suelo-atmósfera que modifica el contenido de agua del suelo”.

Capítulo V

“Los cultivos de invierno bajo labranza cero pueden alcanzar adecuados niveles de cobertura de suelo, pero dada las características de la estructura del rastrojo, no son suficientes para generar un impacto sobre la conservación del agua durante el barbecho”.

Conclusiones

El manejo de los residuos de cosecha, mediante los antecesores, y la modificación de la disposición del mismo son prácticas que pueden emplearse para establecer la estructura de la cobertura del rastrojo más adecuada para la conservación del suelo y el agua, con el consiguiente beneficio para el cultivo siguiente.

Mediante la gestión de la estructura del rastrojo durante el barbecho se modificó el microclima de la interfase suelo-atmósfera, alterando la incidencia de la temperatura y el viento sobre la capa superficial del suelo, y en consecuencia la dinámica del agua.

Se demuestra que tecnológicamente es posible resolver evaluaciones complejas como la estructura de un cultivo, que influyen significativamente con la eficiencia de uso del agua.

El volumen aparente y su relación con los factores que componen la interfase suelo-atmósfera, permitió establecer un umbral mínimo de estructura del rastrojo a partir del cual se presenta un efecto sobre la conservación del agua durante el barbecho.

La mayoría de las coberturas evaluadas, en lotes bajo labranza cero del secano de Villarino y Patagones, presentaron características de la estructura del rastrojo por debajo del umbral mínimo, es por eso que son indispensables investigaciones futuras que evalúen las características de la estructura y su impacto en la eficiencia de uso del agua.

Bibliografía

- AAPRESID. 2019. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. www.aapresid.com.ar (último acceso octubre de 2022).
- Aase J & F Siddoway. 1980. Stubble height effects on seasonal microclimate, water balance, and plant development of no-till winter wheat. *Agricultural meteorology*, 21(1), 1-20.
- Abdollahi L & L Munkholm. 2014. Tillage system and cover crop effects on soil quality: I. Chemical, mechanical, and biological properties. *Soil Science Society of America Journal*, 78(1), 262-270.
- Agamennoni R. 1993. Problemas y posibles soluciones en las explotaciones agrícola-ganaderas de secano en Villarino y Patagones INTA EEA Hilario Ascasubi, PROSUELOS. Boletín de divulgación, (1).
- Agamennoni R, H Giorgiotti & O Montenegro. 1994. Influencia de la rotación corta, tipo de barbecho y la fertilización con N sobre: I La producción y calidad comercial del trigo en Patagones. II Congreso Nacional de Trigo, Bahía Blanca. Actas: 99-100.
- Agamennoni R, J Vanzolini, O Reinoso & A Logiúdice. 2012. Labranzas en el sur de Buenos Aires: I. Efecto en la cobertura del suelo. En XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina. INTA-Balcarce y Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Aiken R, G Flerchinger, H Farahani & K Johnsen. 1997. Energy balance simulation for surface soil and residue temperatures with incomplete cover. *Agronomy Journal* 89(3), 404-415.
- Aiken R, D Nielsen & L Ahuja. 2003. Scaling effects of standing crop residues on the wind profile. *Agronomy Journal*, 95(4), 1041-1046.
- Amigone M, A Kloster, S Chiacchiera, M Conde & B Masiero. 1997. Verdeos de invierno. Invernada bovina en zonas mixtas. Centro Regional Córdoba. INTA. Información Técnica N° 35.
- Araus J, G Slafer, M Reynolds & C Royo. 2002. Plant breeding and drought in C3 cereals: what should we breed for?. *Annals of botany*, 89(7), 925-940.
- ArduinoHome. 2017. Open-source electronic prototyping platform enabling users to create interactive electronic objects. (En línea), <https://www.arduino.cc>.
- Baldock, J. 2009. Building soil carbon for productivity and implications for carbon accounting. In: *Proceedings; Agribusiness Crop Updates*, 1-6.

- Barraco M, C Scianca, C Álvarez & C Justo. 2009. Disponibilidad de agua en el suelo para cultivos de trigo: relevamiento de lotes (Campaña 2010). Memoria técnica. EEA General Villegas. 2009-2010.
- Bennie A & M Hensley. 2001. Maximizing precipitation utilization in dryland agriculture in South Africa - a review. *Journal of Hydrology*, 241(1-2), 124-139.
- Berkenkamp A, E Priesack & JC Munch. 2002. Modelling the mineralisation of plant residues on the soil surface. *Agronomie*, 22(7-8), 711-722.
- Blake G & K Hartge. 1986. Bulk density. In *Methods of Soil Analysis, Part 1*, ed. A. Klute, 363-375. Madison, WI: Am. Soc. Agron.
- Blanco-Canqui H & R Lal. 2009. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical reviews in plant science*, 28(3), 139-163.
- Bohn V, R Sánchez, N Carrascal & F Romagnoli. 2014. Estudio preliminar de variables climatológicas y productividad de los suelos (Resap, Argentina). XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, II Reunión Nacional, 1-6.
- Bond J & W Willis. 1970. Soil water evaporation: first stage drying as influenced by surface residue and evaporation potential. *Soil Science Society of America Journal*, 34(6), 924-928.
- Bono A. 2010. Flujos de carbono y nitrógeno bajo distintos sistemas de labranza en la región semiárida pampeana. Tesis de Doctor. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Bono A, R Álvarez & J de Paepe. 2017. Water use of wheat, corn and sunflower in the semiarid pampas. *Ciencia del suelo*, 35(2), 273-283.
- Bono A, A Quiroga & I Frasier. 2010. El cultivo de trigo en la región semiárida y subhúmeda pampeana. Publicación técnica INTA Anguil.
- Bouyoucos G. 1962. Hydrometer method for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54, 4661-4665.
- Bray R & L Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil science*, 59(1), 39-46.
- Bremner J. 1996. Nitrogen - Total. In: Sparks, DL. (Ed), *Methods of soil analysis. Part 3 - Chemical Methods. Chapter 37*. ASA, SSSA, CSSA, Madison WI, 1085-1121.
- Brown P & D Dickey. 1970. Losses of wheat straw residue under simulated field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 34(1), 118-121.
- Cabrera A. 1951. Territorios fitogeográficos de la República Argentina. *Boletín de la sociedad Argentina de Botánica*, 4(1-2).
- Campbell C, B McConkey, R Zentner, F Dyck, F Selles & D Curtin. 1995. Carbon sequestration in a Brown Chernozem as affected by tillage and rotation. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(4), 449-458.

- Cantamutto M, C Bertucci & D Huarte. 2016. El trigo en el sudoeste bonaerense. Documento de discusión encomendado por el consejo del plan de desarrollo del sudoeste bonaerense. 76 p.
- Cantero Martínez C, P Anga's & J Lampurlanes. 2007. Long-term yield and water use efficiency under various tillage systems in Mediterranean rainfed conditions. *Annals of Applied Biology*, 150(3), 293-305.
- Cantero Martínez C, G O'Leary & D Connor. 1995. Stubble retention and nitrogen fertilisation in a fallow-wheat rainfed cropping system. 1. soil water and nitrogen conservation, crop growth and yield. *Soil and Tillage Research*, 34(2), 79-94.
- Capelli de Steffens A & C de Ferraras. 1994. La transición climática en el sudoeste bonaerense (No. 551.6982123). Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía.
- Carestía C, L Escudero, J Frascina & D Gómez. 2016. Efecto de la fecha de espigazón sobre el rendimiento y sus componentes en distintas especies de cereales invernales. *Trigo 2017*, 34.
- Casagrande G & G Vergara. 1996. Características climáticas de la región, Cap. 2, en: *Labranzas en la región semiárida Argentina*, INTA, Centro Regional La Pampa-San Luis, 11-17.
- Casas R. 2006. Preservar la calidad y salud de los suelos: una oportunidad para la Argentina. *Academia nacional de agronomía y veterinaria*. Tomo LX, 37-61.
- Cate R Jr. & L Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35(4), 658-660.
- Caviglia O & V Sadras. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water-and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crops Research*, 69(3), 259-266.
- Coppens F, P Garnier, A Findeling, R Merckx & S Recous. 2007. Decomposition of mulched versus incorporated crop residues: modelling with PASTIS clarifies interactions between residue quality and location. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(9), 2339-2350.
- Cutforth H & B McConkey. 1997. Stubble height effects on microclimate, yield and water use efficiency of spring wheat grown in a semiarid climate on the Canadian prairies. *Canadian journal of plant science*, 77(3), 359-366.
- Cutforth H, B McConkey, D Ulrich, P Miller & S Angadi. 2002. Yield and water use efficiency of pulses seeded directly into standing stubble in the semiarid Canadian prairie. *Canadian journal of plant science*, 82(4), 681-686.

- Damon P, B Bowden, T Rose & Z Rengel. 2014. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 74, 127-137.
- de Aguiar J & M Lobo Jr. 2020. Reliability and discrepancies of rainfall and temperatures from remote sensing and Brazilian ground weather stations. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100301.
- Derpsch R. 2007. How to get no-tillage to the next level. In *Proc. No-Till on the Plains Winter Conference, AIM Symposium (Vol. 1)*.
- Derpsch R, A Franzluebbers, S Duiker, D Reicosky, K Koeller, T Friedrich, W Sturny, J Sa & K Weiss. 2014. Why do we need to standardize no-tillage research?. *Soil and Tillage Research*, 137, 16-22.
- Derpsch R, T Friedrich, A Kassam & H Li. 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International journal of agricultural and biological engineering*, 3(1), 1-25.
- Derpsch R & T Friedrich. 2009. Global overview of conservation agriculture adoption. In *Proc. 4th World Congress on Conservation Agriculture "Innovations for Improving Efficiency, Equity and Environment"* (pp. 429-439). New Delhi: Indian Council of Agricultural Research (ICAR)/Food and Agriculture Organization.
- Díaz-Ambrona C, G O'leary, V Sadras, M O'connell & D Connor. 2005. Environmental risk analysis of farming systems in a semi-arid environment: effect of rotations and management practices on deep drainage. *Field Crops Research*, 94(2-3), 257-271.
- Di Rienzo J, F Casanoves, M Balzarini, L Gonzalez, M Tablada & C Robledo. 2020. *InfoStat*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Douglas C & R Rickman. 1992. Estimating crop residue decomposition from air temperature, initial nitrogen content, and residue placement. *Soil Science Society of America Journal*, 56(1), 272-278.
- Duarte Y & P Sentelhas. 2020. NASA/POWER and DailyGridded weather datasets—how good they are for estimating maize yields in Brazil?. *International Journal of Biometeorology*, 64(3), 319-329.
- Dumanski J & R Peiretti. 2013. Modern concepts of soil conservation. *International soil and water conservation research*, 1(1), 19-23.
- Duval M, J Galantini, J Iglesias & H Kruger. 2013. El cultivo de trigo en la región semiárida bonaerense: impacto sobre algunas propiedades químicas del suelo. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 39(2), 178-184.
- Ebelhar S, W Frye & R Blevins. 1984. Nitrogen from Legume Cover Crops for No-Tillage Corn. *Agronomy journal*, 76(1), 51-55.

- Ehlert D, R Adamek & H Horn. 2007. Assessment of laser rangefinder principles for measuring crop biomass. In Precision agriculture'07. Papers presented at the 6th European Conference on Precision Agriculture, Skiathos, Greece. Wageningen Academic Publishers, 317-324.
- FAO. 2012. Basic Principles of Conservation Agriculture. <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html>.
- FAO. 2017a. Conservation agriculture. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/981ab2a0-f3c6-4de3-a058-f0df6658e69f/>.
- FAO. 2017b. FAO apoya la agricultura de conservación en el 25° Congreso de Aapresid <https://www.fao.org/argentina/noticias/detail-events/zh/c/1027623/>. (Último acceso octubre de 2022).
- Ferrari M, Pozzolo O & H Ferrari. 2008. Software CobCal. Page Basado en software Silk Icons. INTA EEA Concepción de Uruguay.
- Fernández López C & Mendoza R. 2008. Evaluación del fósforo disponible mediante tres métodos en distintos suelos y manejos productivos. *Ciencia del suelo*, 26(1), 13-27.
- Fernández R, A Quiroga & E Noellemeyer. 2012. Cultivos de cobertura, ¿una alternativa viable para la región semiárida pampeana? *Ciencia del suelo*, 30(2). 137-150.
- Fischer R, 1975. Yield potential in a dwarf spring wheat and the effect of shading 1. *Crop Science*, 15(5), 607-613.
- Fischer R & N Turner. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. *Annual Review of Plant Physiology*, 29(1), 277-317.
- Fischer R. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *The Journal of Agricultural Science*, 105(2), 447-461.
- Flury M, J Mathison, J Wu, W Schillinger & C Stöckle. 2009. Water vapor diffusion through wheat straw residue. *Soil Science Society of America Journal*, 73(1), 37-45.
- Forjan H & L Manso. 2018. Los rastrojos de cultivos y sus efectos sobre el suelo. *Revista Agrobarrow* N° 62: 16-19.
- Fabrizzi K, F García, J Costa & L Picone. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 81(1), 57-69.
- Flerchinger G, T Sauer & R Aiken. 2003. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer at the soil surface. *Geoderma*, 116(1-2), 217-233.
- Franzluebbers A. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research*, 66(2), 95-106.

- Fraschina J, C Bainotti & J Salines. 2003. El cultivo de trigo y la siembra directa en la Región Central Norte. Actualización 2003. EEA Marcos Juárez.
- Freitas P, E Mantovani, G Sedyama & L Costa. 2006. Influência da cobertura de resíduos de culturas nas fases da evaporação direta da água do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10, 104-111.
- Gabella J. 2014. Gestión territorial y degradación ambiental en áreas rurales de la diagonal árida templada argentina: partido de Patagones, provincia de Buenos Aires. Tesis de doctorado en geografía, Universidad Nacional del Sur. 216p.
- Gabella J, M Luorno & A Campo. 2013. Análisis integral de un sistema territorial degradado. El caso del partido de Patagones, Buenos Aires, Argentina. *proyección* vol. VIII: 68-91.
- Gaggioli C. 2019. Alternativas de cultivos tendientes a mejorar la sustentabilidad de los sistemas de producción de la Región Semiárida Pampeana. Tesis de doctor en agronomía. Universidad Nacional del Sur. 269 p.
- Gaggioli C, A Quiroga & E Noellemeyer. 2018. Evaluación de la eficiencia de uso de agua y productividad en cultivos invernales en la región semiárida pampeana. *Semiárida*, 23(2).
- Galantini J, Iglesias J, Miglierina A, Rosell R & A Glave. 1992. Rotación y fertilización en sistemas de producción de la región semiárida bonaerense. I. Productividad (calidad y rendimiento) del trigo. *Rev. Facultad de Agronomía*, 13, 67-75.
- García Bu Bucogen G, M Piccolo & V Bohn. 2022. Implementación de datos meteorológicos modelados en el norte patagónico argentino (1982-2017). *Investigaciones Geográficas*, (78), 67-87.
- Glave A. 1983. Manual del cultivo de trigo. INTA EEA Bordenave. Informe técnico N° 33.
- Glave A. 1982. Agricultura en regiones semiáridas. INTA EEA Bordenave. Informe técnico N° 29.
- Glave A. 1979a. El barbecho para trigo en la Región Semiárida Pampeana. INTA EEA Bordenave. Informe técnico N° 15.
- Glave A. 1979b. Problemas actuales de la erosión, su importancia y su incidencia en la productividad. INTA EEA Bordenave. Informe técnico N° 14.
- Glave A. 1976. Influencias de las técnicas de manejo de suelos en el rendimiento del cultivo de trigo en áreas de secano. INTA EEA Bordenave. Informe técnico N° 16. 7p.
- Govaerts B, N Verhulst, A Castellanos-Navarrete, K Sayre, J Dixon A & L Dendooven. 2009. Conservation agriculture and soil carbon sequestration: between myth and farmer reality. *Critical Reviews in Plant Science*, 28(3), 97-122.

- Greb B, D Smika & A Black. 1967. Effect of straw mulch rates on soil water storage during summer fallow in the Great Plains. *Soil Science Society of America Journal*, 31(4), 556-559.
- Hagen L. 1996. Crop residue effects on aerodynamic processes and wind erosion. *Theoretical and Applied Climatology*, 54(1), 39-46.
- Hagen L & D Armbrust. 1994. Plant canopy effects on wind erosion saltation. *Transactions of the ASAE*, 37(2), 461-465.
- Hammel J. 1996. Water conservation practices for sustainable dryland farming systems in the Pacific Northwest. *American Journal of Alternative Agriculture*, 11(2-3), 58-63.
- Hanway J & R Olson. 1980. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans, and small grains. *The role of phosphorus in agriculture*, 681-692.
- Hernández-Campuzano A, C Martínez-Rueda, G Estrada-Campuzano & A Domínguez-López. 2018. Efecto de la fertilización nitrogenada y del genotipo sobre el rendimiento y el contenido de nitrógeno y β -glucanos en el grano de la avena (*Avena sativa* L.). *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 44(2), 88-95.
- Hobbs P, K Sayre & R Gupta. 2008. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 543-555.
- Holman J, T Roberts & S Maxwell. 2016. Fallow replacement crop (cover crops, annual forages, and short-season grain crops) effects on wheat and grain sorghum yields. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 2(7), 2.
- Horton R, K Bristow, G Kluitenberg & T Sauer. 1996. Crop residue effects on surface radiation and energy balance. *Theoretical and Applied Climatology*, 54(1), 27-37.
- Iglesias J, J Galantini, A Andriulo, R Rosell & A Glave. 1990. Sistemas de producción con trigo en el sudoeste bonaerense. III. El agua del suelo y el crecimiento del cultivo. En: AIANBA (Ed.). *Actas II Congreso Nacional de Trigo*. Cap.1 (338p). Pergamino.
- Imaz MJ, I Virto, P Bescansa, A Enrique, O Fernández-Ugalde & DL Karlen. 2010. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. *Soil and Tillage Research*, 107(1), 17-25.
- INTA-CIRN. 1990. Mapa de Suelos de la provincia de Buenos Aires, Escala 1:500.000. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca, Buenos Aires, Argentina, 533 p.
- Iurman D. 2009. Diagnóstico y evaluación económica de alternativas tecnológicas para productores agropecuarios familiares de la zona de secano del partido de Patagones (Buenos Aires). Tesis de Magíster en Economía Agraria y Administración Rural, Universidad Nacional del Sur, 195 p.

- Iurman D, J Marinissen, F Castoldi, M Mosciaro, J Tosi, V Larreguy, A Perlo, R Agamennoni, J Pérez Pizarro & D García. 2010. Sistemas agropecuarios de Villarino y Patagones. Análisis y propuestas. Boletín técnico INTA Ascasubi. <http://inta.gob.ar/documentos/sistemas-agropecuarios-devillarino-y-patagones.-analisis-y-propuestas>.
- Israelsen O & H Hansen. 1972. Principios y aplicaciones del riego. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- Kassam A, R Derpsch & T Friedrich. 2014. Global achievements in soil and water conservation: The case of Conservation Agriculture. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(1), 5-13.
- Kennelly J & Z Weinberg. 2003. Small grain silage. *Silage science and technology*, 42, 749-779.
- Kirkegaard J & J Hunt. 2010. Increasing productivity by matching farming system management and genotype in water-limited environments. *Journal of Experimental Botany*, 61(15), 4129-4143.
- Klocke N, R Currie & R Aiken. 2009. Soil water evaporation and crop residues. *Transactions of the ASABE* 52(1), 103-110.
- Kozak J, L Ahuja, T Green & L Ma. 2007a. Modelling crop canopy and residue rainfall interception effects on soil hydrological components for semi-arid agriculture. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(2), 229-241.
- Kozak J, R Aiken & G Flerchinger. 2007b. Comparison of modeling approaches to quantify residue architecture effects on soil temperature and water. *Soil and Tillage Research*, 95(1-2), 84-96.
- Kruger H. 2015. Secuencias de cultivos con trigo para el ambiente semiárido bonaerense: rendimientos y efectos sobre el suelo. Ediciones INTA, 1, 52p.
- Kruger H, R Agamennoni & M Ripoll. 2005. Siembra directa de trigo en el sur de la región semiárida pampeana. *Boletín Técnico N° 14*. EEA Hilario Ascasubi INTA. 15p.
- Kruger H & A Quiroga. 2013. La interfase suelo-atmósfera y su valor estratégico en regiones semiáridas. Contribución de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción (Eds. Álvarez C., Quiroga A., Santos D. & Bodrero M.), 5-6.
- Kruger H & S Venanzi. 2010. "El agua y el rendimiento del trigo. Algunos cálculos".
- Kruger H, S Venanzi, G Minoldo & J Galantini. 2011. Rendimientos de trigo en el SO Bonaerense. II Efectos de rotación y fertilización nitrogenada. VII Congreso nacional del trigo. 6 p.

- Kruger H, J Zilio & F Frolla. 2014. Procesos en la interfase suelo-atmósfera que inciden en la eficiencia de uso del agua. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Kuo S, U Sainju & E Jellum. 1997. Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 145-152.
- Lal R. 2005. World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environment International*, 31(4), 575-584.
- Lal R. 2004a. Agricultural activities and the global carbon cycle. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 70(2), 103-116.
- Lal, R., 2004b. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *science*, 304(5677), 1623-1627.
- Lampurlanes J, P Angás & C Cantero-Martínez. 2002. Tillage effects on water storage during fallow, and on barley root growth and yield in two contrasting soils of the semi-arid Segarra region in Spain. *Soil and Tillage Research*, 65(2), 207-220.
- Larney F & C Lindwall. 1995. Rotation and tillage effects on available soil water for winter wheat in a semi-arid environment. *Soil and Tillage Research*, 36(3-4), 111-127.
- Lascano R, R Baumhardt, S Hicks & J Heilman. 1994. Soil and plant water evaporation from strip-tilled cotton: Measurement and simulation. *Agronomy Journal*, 86(6), 987-994.
- Leyes M. 2021. Intensificación agrícola sustentable: siembra directa en Argentina y Brasil, evolución, difusión e impactos. Tesis de Licenciatura en Economía. Universidad Nacional de Rosario. 18 p.
- Li X, Y Li, F Li, M Ma, P Zhang & P Yin. 2009. Changes in soil organic carbon, nutrients and aggregation after conversion of native desert soil into irrigated arable land. *Soil and Tillage Research*, 104(2), 263-269.
- Li Y, J Tullberg, D Freebairn, N McLaughlin & H Li .2008. Effects of tillage and traffic on crop production in dryland farming systems: I. Evaluation of perfect soil crop simulation model. *Soil and Tillage Research* 100(1-2), 15-24.
- Madurga M. 2005. Los colores del agua, el agua virtual y los conflictos hídricos. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid*, 99, 369-389.
- Llorens J. 2005. Posada a punt d'un sistema d'adquisició de dades basat en un sensor làser LMS 200 per a la caracterització geomètrica de cultius arboris. R. Sanz y J. Rosell (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 217.
- Llorens J, J Rosell, R Sanz, A Escolà & J Palacín. 2007. Determinació de paràmetres vegetatius amb un sistema lidar terrestre, a partir de la generació de models

- tridimensionals d'arbres fruiters. In: V Congrés Institució Catalana d'Estudis Agraris. Comunicació nº 8 de l'àrea III.
- Loewy T. 2005. Rotación de cultivos en la región pampeana, volviendo a las fuentes. En: Actas de las III Jornadas Interdisciplinarias del Sudoeste Bonaerense. Ed: Universidad Nacional del Sur.
- López M & J Arrue. 1997. Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. *Soil and Tillage Research*, 44(1-2), 35-54.
- López F, M Duval, J Martínez & J Galantini. 2015. Cobertura en el sudoeste bonaerense en suelos bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 33(2): 273-281.
- Lucanera, G. 2020. Banco de Datos Socioeconómicos de la Zona de CORFO - Río Colorado. Estimación del Producto Bruto Agropecuario Regional. 2019/2020. Universidad Nacional del Sur. Departamento de Economía.
- Magrin G, A Hall, C Bldy & M Grondona. 1993. Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67(1-2), 29-41.
- Malik A, T Choi, H Nisar. 2011. Depth map and 3D imaging applications: algorithms and technologies. Hershey, PA, USA, Proc IGI Global Hershey. (editors).
- Martínez P. 2011. Consumo y eficiencia en el uso del agua en trigos de diferentes ciclos, bajo siembra directa y labranza convencional. Cultivos II, Facultad de Agronomía, UNLPam.
- Mathews O & T Army. 1960. Moisture storage on fallowed wheatland in the Great Plains. *Soil Science Society of America Journal*, 24(5), 414-418.
- Mbuthia L, V Acosta-Martínez, J DeBryun, S Schaeffer, D Tyler, E Odoi, M Mpheshea, F Walker & N Eash. 2015. Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. *Soil Biology & Biochemistry* 89, 24-34.
- McMaster G, R Aiken & D Nielsen. 2000. Optimizing wheat harvest cutting height for harvest efficiency and soil and water conservation. *Agronomy Journal*, 92(6), 1104-1108.
- Mellado M, I Matus & R Madariaga. 2008. Antecedentes sobre el centeno en Chile y otros países. *Boletín INIA*, 182, 39-40.
- Micheletto M, L Zubiaga, R Santos & J Galantini. 2018. Diseño e implementación de un escáner LiDAR para análisis tridimensional de cobertura vegetal de suelos. X Congreso de Agrolnformática (CAI)-JAIIO 47 (CABA).

- Micheletto M. 2020a. Desarrollo de sistemas computacionales para sustento de tareas agropecuarias en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires. Tesis de doctor en Ingeniería. Universidad Nacional del Sur.
- Micheletto M, L Zubiaga, R Santos, J Galantini, M Cantamutto & J Orozco. 2020b. Development and Validation of a LiDAR Scanner for 3D Evaluation of Soil Vegetal Coverage. *Electronics*, 9(1), 109.
- Miguez, F & G Bollero. 2006. Winter cover crops in Illinois: Evaluation of ecophysiological characteristics of corn. *Crop science*, 46(4), 1536-1545.
- Minoldo G, J Galantini, H Kruger, S Venanzi, J Iglesias & R. Rosell. 2004. Efecto de las rotaciones con leguminosas y la fertilización sobre el rendimiento y calidad de trigo. In *Actas VI Congreso Nacional de Trigo y IV simposio Nacional de cereales de siembra otoñal invernal (en CD)*. Bahía Blanca, Bs. As., Argentina.
- Monsalvo M. 1969. Duración del barbecho limpio y los rendimientos en trigo. INTA EEA Anguil. Hoja informativa Nº 45. 1p.
- Monteiro L, P Sentelhas & G Pedra. 2018. Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. *International Journal of Climatology*, 38(3), 1571-1581.
- Montgomery D. 2008. A case for no-till farming. *Sci. Am.* 299(1), 70-77.
- Monzon J, V Sadras & F Andrade. 2006. Fallow soil evaporation and water storage as affected by stubble in sub-humid (Argentina) and semi-arid (Australia) environments. *Field Crops Research*, 98(2-3), 83-90.
- Müller D, M Saluzzio & J De Battista. 2008. Comparación de distintos cultivos de cobertura en un suelo vertisol. *Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Potrero de los Funes. San Luis.
- Murillo B, A Escobar, H Fraga & R Pargas. 2001. Rendimiento de grano y forraje de líneas de triticale y centeno en Baja California Sur, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 24(2), 145-153.
- NASA POWER | Data access viewer. 2021. <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/>.
- Naudin K, E Scopel, A Andriamandroso, M Rakotosolofo, N Andriamarosa Ratsimbazafy, J Rakotozandriny, P Salgado & K Giller. 2012. Trade-offs between biomass use and soil cover. The case of rice-based cropping systems in the Lake Alaotra region of Madagascar. *Experimental Agriculture*, 48(2), 194-209.
- Noellemeyer E, R Fernández & A Quiroga. 2013. Crop and tillage effects on water productivity of dryland agriculture in Argentina. *Agriculture*, 3(1), 1-11.
- O'Leary G & D Connor. 1997. Stubble retention and tillage in a semi-arid environment: 3. Response of wheat. *Field Crops Research*, 54(1), 39-50.

- Palacín J, T Pallejà, M Tresánchez, R Sanz, J Llorens, M Ribes-Dasi, J Masip, J Arnó, A Escolà & J Rosell. 2007. Real-time tree-foliage surface estimation using a ground laser scanner. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56(4), 1377-1383.
- Pansera M, R Rivas & H Narvaez-Mena. 2017. Frugalidad e innovación popular: nuevos caminos para la sustentabilidad y la inclusión social en Ecuador. *Revista Iberoamericana de Ciencia Tecnología y Sociedad*, 12(35), 131-152.
- Pansera M & S Sarkar. 2016. Crafting sustainable development solutions e frugal innovations of grassroots entrepreneurs. *Sustainability*, 8(1), 51.
- Parr J & R Papendick. 1978. Factors affecting the decomposition of crop residues by microorganisms. *Crop residue management systems*, 31, 101-129.
- Passioura, J. 1977. Grain yield, harvest index, and water use of wheat. *J. Austr. Inst. Agric. Sci.* 43: 117-120.
- Passioura J & J Angus. 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 106, 37-75.
- Pedreño N, M Herrero, L Gómez & B Matayx. 2008. Residuos orgánicos y agricultura. Ed. Espagrafic, 155 p.
- Pérez S, E Sierra & G Casagrande. 2003. Comportamiento de las precipitaciones (1918/2000) en el centro oeste de Buenos Aires (Argentina). *Revista de la facultad de agronomía; volumen 14, N° 1/2*, 39-46. Universidad Nacional de La Pampa. Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- Pezzola A, R Agamennoni, C Winschel, M Enrique & H Giorgetti. 2010. Monitoreo multitemporal de la erosión eólica en el sur de la provincia de Buenos Aires con productos EVI del satélite Terra- Modis. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario prov. Santa Fe.
- Pieri C. 1995. Long-term soil management experiments in semi-arid Francophone Africa. En: Lal, R. y B. Steward (Eds.). *Soil Management: experimental basis for sustainability and environmental quality*. Lewis Publishers-CRC. 266 p.
- Pittelkow C, X Liang, B Linqvist, K van Groenigen, J Lee, M Lundy, N van Gestel, J Six, R Venterea, C van Kessel. 2015. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517(7534), 365-368.
- Prasad R & J Power. 1991. Crop residue management. In *Advances in soil science*, 15, 205-251.
- Pulido M, J Lavado & S Schnabel. 2011. Estimación de la cobertura del suelo para estudios de degradación: influencia de la escala espacial y la técnica de muestreo. *Nimbus: Revista de climatología, meteorología y paisaje*, (27), 169-181.

- Puriccelli C. 1977. Eficiencia hídrica de los barbechos y sus efectos sobre los rendimientos de los cultivos en un sector de la República Argentina. Comisión Nacional para la conferencia de las Naciones Unidas sobre el agua. INTA, EERA, Marcos Juárez – Córdoba. Reuniones técnicas y científicas, Mar del Plata. 18 pp.
- Puriccelli C. 1969. Rotaciones, técnica de cultivo y fertilización. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Simposio del trigo. Ed. Crisol, Buenos Aires. p. 233-265.
- Quiroga A, F Babinec, O Ormeño & L Goñi. 1996. Labranza conservacionista y fertilización de trigo en la región semiárida pampeana. XV Congreso AACCS, La Pampa.
- Quiroga A, P Carfagno, M Eiza & R Michelena. 2007. Inclusión de Cultivos de Cobertura bajo Agricultura de Secano en la Región Semiárida Pampeana. Actas de Jornadas de Cultivos de Cobertura. INTA.
- Quiroga A, R Fernández, P Azcárate & A Bono. 2008. Agua del suelo. Bases funcionales para su manejo. En: Manual de Fertilidad y Evaluación de Suelos. Ediciones INTA. EEA Anguil. Publicación Técnica N° 71: 35-50.
- Quiroga A, D Funaro, R Fernandez & E Noellemeyer. 2005. Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la Región Pampeana. Ciencia del Suelo, 23(1), 79-86.
- Quiroga A, D Funaro & O Ormeño. 2003. Aspectos del manejo del agua del suelo para el cultivo de trigo. En: Trigo actualización 2003, INTA Anguil, Boletín Técnico 76: 33-44.
- Quiroga A & C Gaggioli. 2010. Gestión del agua y viabilidad de los sistemas productivos. En Condiciones para el desarrollo de producciones agrícolas-ganaderas en el SO Bonaerense. Pub. Especial de la Academia Nacional Agronomía y Veterinaria, tomo LXIV:233-249.
- Quiroga A & H Paccapelo. 1990. Evaluación de algunos aspectos de las relaciones hídricas en trigo, en la Región Semiárida Pampeana. Rev. Fac. Agronomía-UNLPam. 5: 109-115.
- Raming R & L Ekin. 1984. Effect of stubble management in a wheat-fallow rotation on water conservation and storage in eastern Oregon. In: 1984 Columbia Basin Agricultural Research, Oregon Agric. Exp. Stn. Special Report 713, 30-33.
- Rataj D, D Kohoutek, M Ovsiaikova & J Petrovic. 1998. A possibility of growing (*Secale cereale* f. multicaule Metzg.) in the region of the Low Tatras Mountains. Agriculture, Journal for Agricultural Sciences.

- Reicosky D. 2007. Beneficios ambientales globales del manejo del carbono del suelo. XII Congreso AAPRESID, 41-48.
- RepRapHome. 2017. Replicating Rapid Prototyped. <https://reprap.org>.
- Russel J. 1939. The effect of surface cover on soil moisture losses by evaporation. *Proceedings. Soil Science Society of America Proc.* 48(1), 65-70.
- Sadras V & J Angus. 2006. Benchmarking water-use efficiency of rainfed wheat in dry environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57(8), 847-856.
- Sánchez R. 2011. Historia de la evolución de las condiciones ambientales de los partidos bonaerenses Villarino y Patagones. En *Jornada sobre Evolución y Futuro del Desarrollo de Producciones Agrícola-Ganaderas en el SO Bonaerense*. p.362–372. ISSN: 0327-8093.
- Sánchez R, A Pezzola & J Cepeda. 1998. Caracterización edafoclimática del área de influencia del INTA EEA Hilario Ascasubi. Partidos de Villarino y Patagones, Prov. de Buenos Aires. *Boletín de divulgación N° 18*. ISSN 0328-3321.
- Sanders, D. 1992. International activities in assessing and monitoring soil degradation. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(1-2), 17-24.
- Sanz R, J Llorens, M Ribes-Dasi, J Masip, J Arnó, J Vallès, A Escolà, P Massana, F Camp, J Palacín, F Solanelles, E Gil, S Planas, L Val & J Rosell. 2005. First results of a non-destructive LIDAR system for the characterization of tree crops as a support for the optimization of pesticide treatments. *Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing*, 85-87.
- Sanz R, J Palacín, J Sisó, M Ribes-Dasi, J Masip, J Arnó, J Llorens, J Vallès & J Rosell. 2004. Advances in the measurement of structural characteristics of plants with a LIDAR scanner. *Leuven (Belgium), Book of Abstracts of the AgEng Conference*, 400-401, Paper NR 277.
- Satorre E. 2003. Las posibilidades ambientales y tecnológicas de la pradera pampeana para la producción de granos. En: *Bolsa de Cereales de Buenos Aires (Ed). Las Ciento y Una: "Hacia los 100 millones de toneladas de granos y la exportación de 1 millón de toneladas de carne*. Buenos Aires: Bolsa de Cereales, 100, 37-38.
- Sauer T, J Hatfield, J Prueger & J Norman. 1998. Surface energy balance of a corn residue-covered field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89(3-4), 155-168.
- Savin R & G Slafer. 1991. Shading effects on the yield of an Argentinian wheat cultivar. *The Journal of Agricultural Science*, 116(1), 1-7.
- Scherger M, M Rosell & A Campo. 2012. Impacto ambiental en áreas marginales del río Colorado, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Perspectiva Geográfica*. ISSN: 0123-3769, Vol. 17, 9-28.

- Schmidt E & N Amiotti. 2015. Propiedades edáficas superficiales en sistemas de agricultura de conservación en la región pampeana semiárida sur. *Ciencia del Suelo*, 33(1), 79-88.
- Schroeder V & N Formiga. 2011. Oportunidades para el desarrollo local: el caso del Sudoeste Bonaerense (Argentina). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 20(2), 91-109.
- Scianca C. 2010. Cultivos de cobertura en molisoles de la región pampeana. Producción de materia seca, eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno e incidencia sobre el cultivo de soja. Tesis de Magíster en Cs. Agrarias. Universidad Nacional del Sur.
- Scianca C, C Álvarez, M Barraco & M Díaz-Zorita. 2006. Fertilización nitrogenada y eficiencia de uso de agua de trigo en la Región Subhúmeda Pampeana. *Publicación técnica*, (67), 55-60.
- Scianca C, C Álvarez, M Barraco & A Quiroga. 2007. Cultivos de cobertura: aporte de nutrientes y rastrojo de las diferentes especies. *Memoria Técnica 2006-2007*, 13.
- Scopel E, B Muller, J Arreola-Tostado, E Chavez Guerra & F Maraux. 1998. Quantifying and modeling the effects of light crop residue mulch on the water balance: an application to rainfed maize in Western Mexico. In: *World Congress of Soil Science*, Montpellier.
- Ségui L, S Bouzinac & O Husson. 2006. Direct-seeded tropical soil systems with permanent soil cover: Learning from Brazilian experience. In: Uphoff, N., Ball, A.S., Fernandes, E. (Eds.), *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL, 323-342.
- Sfeir A. 2009. La conservación del suelo en el contexto productivo agrario. *Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria*. Tomo LXIII.
- Sharratt B. 2002. Corn stubble height and residue placement in the northern US Corn Belt: Part I. Soil physical environment during winter. *Soil and Tillage research*, 64(3-4), 243-252.
- Siddoway F. 1970. Barriers for wind erosion control and water conservation. *Journal of soil and water conservation*, 25(5), 180-4.
- Siddoway F, W Chepil & D Armbrust. 1965. Effect of kind, amount, and placement of residue on wind erosion control. *Trans. ASAE* 8:327-331.
- Silenzi J, N Echeverría, A Vallejos, M Bouza & M De Lucia. 2012. Wind erosion risk in the southwest of Buenos Aires Province, Argentina, and its relationship to the productivity index. *Aeolian Research*, 3(4), 419-425.
- Silenzi J, N Echeverría, M Bouza & M De Lucia. 2011. Degradación de suelos del SO Bonaerense y su recuperación. En *Jornada sobre "Evolución y Futuro del*

- Desarrollo de Producciones Agrícola-Ganaderas en el SO Bonaerense", Bahía Blanca, Argentina.
- Six J, S Ogle, F Breidt, R Conant, A Mosier & K Paustian. 2004. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. *Global change biology*, 10(2), 155-160.
- SIIA. 2022. Sistema integral de información administrativa. Datos abiertos. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Consultado agosto 2022. <http://www.sii.gov.ar>.
- Simula H, M Hossain & M Halme. 2015. Frugal and reverse innovations—Quo Vadis?. *Current Science Association*, 109, 1567-1572.
- Slafer G & F Andrade. 1989. Genetic improvement in bread wheat (*Triticum aestivum*) yield in Argentina. *Field Crops Research*, 21(3-4), 289-296.
- Slafer G, E Satorre & F Andrade. 1994. Increases in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. En: "Genetic Improvement of Field Crops: Current status and development" (Ed Slafer GA) pp 1-68. (Marcel Dekker Inc. New York).
- Smika D. 1970. Summer Fallow for Dryland Winter Wheat in the Semiarid Great Plains. *Agronomy Journal*, 62(1), 15-17.
- Smika D. 1983. Soil water change as related to position of wheat straw mulch on the soil surface. *Soil Science Society of America Journal*, 47(5), 988-991.
- Smika D & P Unger. 1986. Effect of surface residues on soil water storage. *Advances in Soil Science* (5), 1-28.
- Soil Survey Staff. 2022. Keys to Soil Taxonomy, 13th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. 401 p.
- Sommer R, C Piggitt, A Haddad, A Hajdibo, P Hayek & Y Khalil. 2012. Simulating the effects of minimum tillage and crop residue retention on water relations and yield of wheat under rainfed semiarid Mediterranean conditions. *Field Crop Research* 132, 40-52.
- Stackhouse P, W Chandler, T Zhang, D Westberg, A Barnett & J Hoell. 2016. Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) Release 6.0 Methodology. Version 3.2.0.
- Steiner J & H Schomberg. 1996. Impacts of crop residue at the Earth-atmosphere interface: introduction. *Theoretical and Applied Climatology*, 54(1), 1-4.
- STMicroelectronicsHome. 2018. World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>.
- Stockmann U, M Adams, J Crawford, D Field, N Henakaarchchi, M Jenkins, B Minasny, A McBratney, V Courcelles, K Singh, I Wheeler, L Abbott, D Angers, J Baldock, M Bird, P Brookes, C Chenu, J Jastrow, R Lal, J Lehmann, A O'Donnell, W

- Parton, D Whitehead & M Zimmermann. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80-99.
- Studdert G & H Echeverria. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1496-1503.
- Swella G, P Warda, K Siddique & K Flower. 2015. Combinations of tall standing and horizontal residue affect soil water dynamics in rainfed conservation agriculture systems. *Soil & Tillage Research*, 147, 30-38.
- Tanaka D, J Krupinsky, M Liebig, S Merrill, R Ries, J Hendrickson, H Johnson & J Hanson. 2002. Dynamic cropping systems: An adaptable approach to crop production in the Great Plains. *Agronomy Journal*, 94(5), 957-961.
- Teutsch C. 2007. Model-based Analysis and Evaluation of Point Sets from optical 3D Laser Scanners. PhD Thesis. Magdeburger Schriften zur Visualisierung, Shaker Verlag, 145p.
- Thorburn P, M Probert & F Robertson. 2001. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM–Residue. *Field Crops Research*, 70(3), 223-232.
- Triplett G & W Dick. 2008. No-tillage crop production: A revolution in agriculture!. *Agronomy journal*, 100, S-153.
- Tumbo S, M Salyani, J Whitney, T Wheaton & W Miller. 2002. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(3), 367-372.
- Unger P. 1976. Surface residue, water application, and soil texture effects on water accumulation. *Soil Science Society of America Journal*, 40(2), 298-300.
- Unger P. 1978. Straw-mulch rate effect on soil water storage and sorghum yield. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 486-491.
- Unger P & J Parker. 1976. Evaporation reduction from soil with wheat, sorghum, and cotton residues. *Soil Science Society of America Journal*, 40(6), 938-942.
- Van de Ven T, D Fryrear & W Spaan. 1989. Vegetation characteristics and soil loss by wind. *Journal of soil and Water Conservation*, 44(4), 347-349.
- Van Doren D & R Allmaras. 1978. Effect of residue management practices on the soil physical environment, microclimate, and plant growth. *Crop residue management systems*, 31, 49-83.
- Van Kessel C, R Venterea, J Six, M Adviento-Borbe, B Linquist, & K Van Groenigen. 2013. Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. *Global change biology*, 19(1), 33-44.

- Venanzi, S, E Sá Pereira, E Fernandez & H Kruger. 2006. Uso del agua por dos secuencias de cultivos en el sur de la región semiárida pampeana. XX Congreso argentino de la ciencia del suelo. Congreso AACS. Salta. 475 p.
- Verhulst N, B Govaerts, E Verachtert, A Castellanos-Navarrete, M Mezzalama, P Wall, J Deckers & K Sayre. 2010. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems. In: Lal, R., Stewart, B.A. (Eds.), *Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 137-208.
- Villablobos F & E Fereres. 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. *Agronomy Journal* 82(6), 1153-1159.
- Walkley A & I Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wei J & M Salyani. 2004. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 1. Prototype development. *Transactions of the ASAE*, 47 (6), 2101-2107.
- Wei J & M Salyani. 2005. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 2. Foliage density measurement. *Transactions of the ASAE*, 48 (4), 1595-1601.
- White J, G Hoogenboom, P Stackhouse & J Hoell. 2008. Evaluation of NASA satellite- and assimilation model-derived long-term daily temperature data over the continental US. *agricultural and forest meteorology*, 148(10), 1574-1584.
- Wilhelm W, J Doran & J Power. 1986. Corn and Soybean Yield Response to Crop Residue Management Under No-Tillage Production Systems. *Agronomy journal*, 78(1), 184-189.
- Wilhelm W, J Johnson, J Hatfield, W Voorhees & D Linden. 2004. Crop and soil productivity response to corn residue removal: A literature review. *Agronomy journal*, 96(1), 1-17.
- Willis W. 1962. Effect of partial surface covers on evaporation from soil. *Soil Science Society of America Journal*, 26(6), 598-601.
- Willis W & J Bond .1971. Soil water evaporation: Reduction by simulated tillage. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35(4), 526-529.
- Winschel C. 2017. Integración por medio de geotecnologías de la información ambiental en estudios de degradación de los suelos para los partidos de Villarino y Patagones, Provincia de Buenos Aires-Argentina. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional del Sur. 219 p.

- Zadoks J, T Chang & C Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415-421.
- Zhai R, R Kachanoski & R Voroney. 1990. Tillage effects on the spatial and temporal variation of soil water. *Soil Science Society of America Journal*, 54(1), 186-192.
- Zhang T. 2005. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews of Geophysics*, 43(4).
- Zhang X, S Chen, H Sun, Y Wang & Shao. 2010. Water use efficiency and associated traits in winter wheat cultivars in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97(8), 1117-1125.
- Zhang H, J Fangel, W Willats, M Selig, J Lindedam, H Jorgensen & C Felby. 2014. Assessment of leaf/stem ratio in wheat straw feedstock and impact on enzymatic conversion. *GCB Bioenergy*, 6(1), 90-96.
- Zilio, J. 2015. Aspectos de calidad de suelos representativos del sur de la provincia de Buenos Aires y efectos de la actividad agropecuaria sobre la misma. Tesis de Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur, 100 p.
- Zubiaga L, J Vanzolini, L Dunel, R Storniolo, D Ombrosi, C Álvarez, M Cantamutto & J Galantini. 2022. Profundidad de la napa durante el cultivo de trigo en el Valle Bonaerense del Río Colorado. XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo.
- Zubiaga L, J Vanzolini, L Dunel, R Storniolo, D Ombrosi, C Álvarez, M Cantamutto & J Galantini. 2020a. Efecto de la arquitectura del rastrojo de cultivos de invierno bajo labranza cero: I. Conservación del agua del suelo. XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo.
- Zubiaga L, J Vanzolini, L Dunel, R Storniolo, D Ombrosi, C Álvarez, M Cantamutto & J Galantini. 2020b. Efecto de la arquitectura del rastrojo de cultivos de invierno bajo labranza cero: II. Microclima de la interfase suelo-atmósfera. XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo.
- Zubiaga L, J Vanzolini, L Dunel, R Storniolo, D Ombrosi, C Álvarez, M Cantamutto & J Galantini. 2020c. Efecto de la arquitectura del rastrojo de cultivos de invierno bajo labranza cero: III. Dinámica del agua del suelo luego de un evento de precipitación. XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo.

Anexos

Anexo 1. Calidad de la semilla y densidad de siembra

Se realizó el muestreo representativo de la semilla utilizada cada año y cultivar para el análisis del valor cultural en el laboratorio de semillas de la EEA INTA Hilario Ascasubi. A partir de ello, y en función de la densidad objetivo de plantas (200 plantas m⁻²), se calculó la densidad de semillas para la correcta regulación de la máquina sembradora. Luego de la emergencia y hasta Z1.3 (tres hojas por planta), se realizó un relevamiento del stand de plantas logradas (Tabla 16).

Tabla 16. Calidad de la semilla y densidad durante los dos ciclos de experimentación.

Período	Cultivo	Cultivar	Valor Cultural			Densidad	
			Pureza	Poder germinativo	Peso mil semillas	Semilla	Plantas logradas
			%	%	gr	Kg ha ⁻¹	Plantas m ⁻²
Ciclo I							
2017	Trigo	Buck Meteoro	97	94	34	75	210
	Centeno	Don José INTA	97	89	24	57	193
	Avena	Florencia INTA	97	90	34	80	214
2018	Trigo	Buck Meteoro	98	98	38	82	202
Ciclo II							
2019	Trigo	Buck Meteoro	99	99	44	91	185
	Centeno	Don José INTA	97	89	25	59	187
	Avena	Florencia INTA	98	87	33	79	201
2020	Trigo	Buck Meteoro	99	95	42	92	194

Anexo 2. Precipitaciones en sitio experimental Hilario Ascasubi

A partir de los registros de la estación meteorológica de la EEA Hilario Ascasubi desde 1966, se realizó la distribución mensual de las precipitaciones en cada año, el promedio de los años que abarcó la experimentación y el promedio histórico (1966-2021, Figura 44).

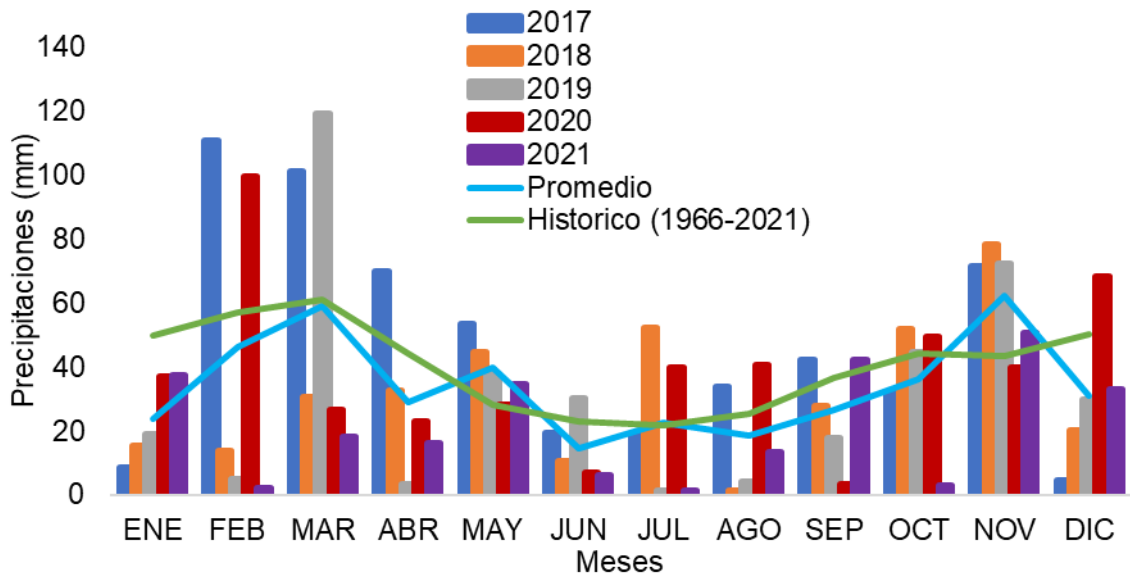


Figura 44. Distribución de la precipitación mensual (mm) para cada año, del promedio del período de experimentación y del promedio histórico para la serie 1966-2021 (Zura, Dpto. Agrometeorología, INTA EEA Hilario Ascasubi).

Anexo 3. Temperatura en sitio experimental Hilario Ascasubi

A partir de los registros de la estación meteorológica de la EEA Hilario Ascasubi desde 1966, se realizó la distribución mensual de las temperaturas máximas, mínimas y promedio de cada año, el promedio de los años que abarcó la experimentación y el promedio histórico (1966-2021, Figura 45).

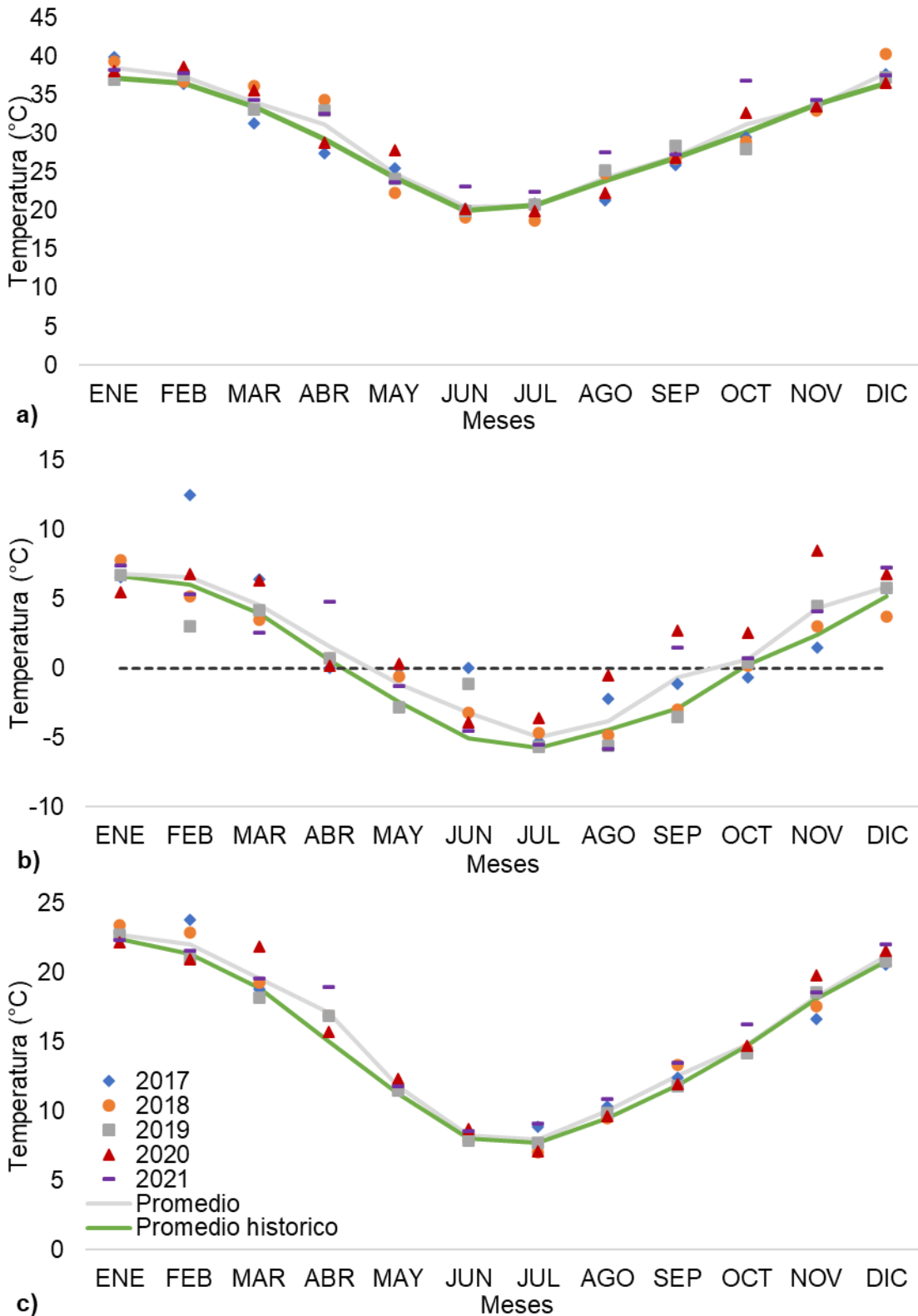


Figura 45. Distribución de la temperatura mensual (°C) máxima (a), mínima (b) y media (c) para los 5 años y el promedio del período de experimentación, y el promedio histórico para la serie 1966-2021 (Zura, Dpto. Agrometeorología, INTA EEA Hilario Ascasubi).

Anexo 4. Heladas en sitio experimental Hilario Ascasubi

A partir de los registros de la estación meteorológica de la EEA Hilario Ascasubi desde 1966, se realizó la distribución mensual y el acumulado de las heladas de cada año y el promedio histórico (1966-2021, Figura 46).

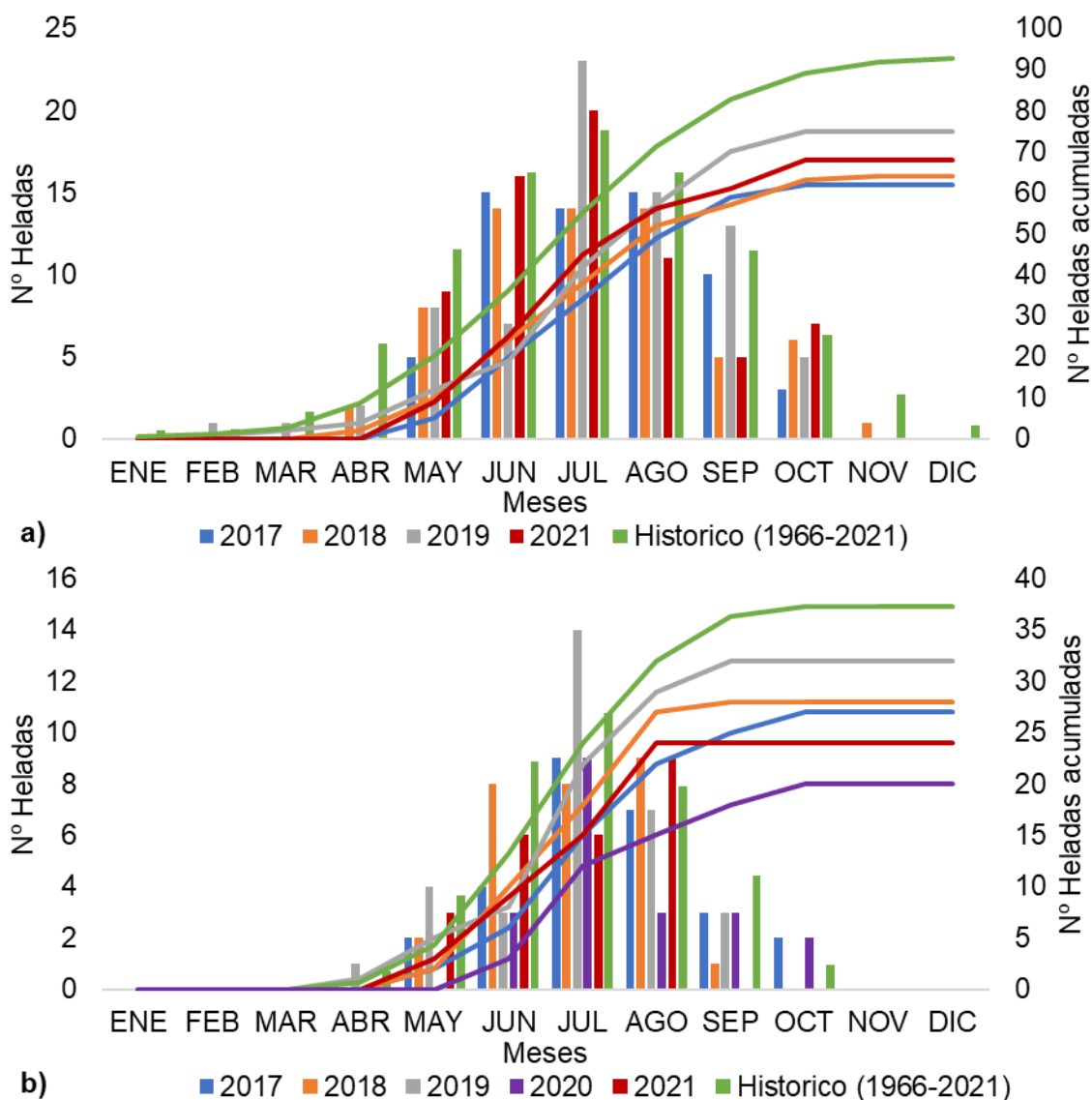


Figura 46. Número de heladas a 5 (a) y 150 (b) cm sobre el nivel del suelo para los 5 años, en el promedio del período de experimento y en el promedio histórico para la serie 1966-2021 (Zura, Dpto. Agrometeorología, INTA EEA Hilario Ascasubi).

Anexo 5. Estructura del rastrojo: Biomasa de rastrojo de trigo del Ciclo II

Al finalizar el barbecho del 2021 (Ciclo II), se evaluó el impacto de la disposición del rastrojo (horizontal, Vertical y Pastoreo) de trigo sobre la estructura del rastrojo mediante

la distribución por estrato. Se determinó mediante el mismo procedimiento descrito en la sección Estructura del rastrojo en Materiales y Métodos del Capítulo II. La composición de la estructura del rastrojo por estratos coincide con la observada en la sección de resultados de la estructura del rastrojo de los antecesores durante el barbecho para trigo (Ciclo II). Es decir, la disposición horizontal de rastrojo llevó a que la biomasa total se encontrara en el estrato inferior, bajo disposición vertical, más de la mitad de la biomasa de rastrojo estaba en el estrato inferior y el pastoreo redujo los niveles de biomasa total de rastrojo y aumentó la proporción en el estrato inferior (Figura 47).

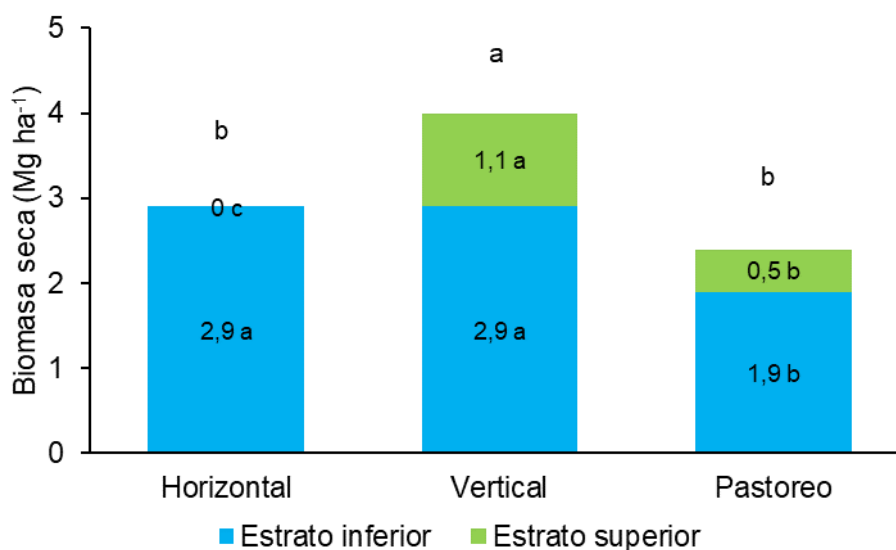


Figura 47. Biomasa de rastrojo total al final del barbecho del rastrojo de trigo con sus composiciones en estrato superior e inferior. Ciclo II.

Por cada estrato de biomasa, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Anexo 6. Temperatura del suelo durante el barbecho para los antecesores del Ciclo II

Durante el barbecho con rastrojo de trigo del Ciclo I, al igual que en el barbecho con rastrojo de los antecesores, se evaluó el efecto de las disposiciones sobre la temperatura del suelo y el diferencial respecto al ambiente (ΔT°). Las observaciones se realizaron en 4 oportunidades entre el 5 de febrero y el 14 de marzo de 2019 (5, 14 y 20 de febrero; y 14 de marzo), siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección Temperatura del suelo en Materiales y Métodos del Capítulo II.

Se observaron diferencias significativas entre disposiciones de rastrojo en la temperatura del suelo y el ΔT° , en superficie y a 5 cm en todas las fechas de medición (Figura 48). A 10 cm, no se observó diferencias, pero si la misma tendencia que la observada a 0 y 5 cm. A medida que se profundizó en el suelo y las temperaturas ambientales fueron más bajas, estas diferencias se redujeron. En todas las fechas y profundidades la temperatura del suelo y ΔT° fue en orden decreciente para pastoreo > vertical > horizontal. En tanto, las mayores diferencias se observaron entre horizontal versus pastoreo, siendo inferior la primera y el rastrojo vertical ubicándose en posición intermedia o similar al pastoreo (Figura 48).

En todas las fechas y profundidades, el pastoreo mostró mayor temperatura del suelo y ΔT° , respecto de horizontal y vertical (Figura 48), posiblemente debido a la disminución en la biomasa y altura del rastrojo (Swellá *et al.*, 2015). A nivel superficial, la temperatura del suelo en pastoreo fue entre 5 a 14 °C por encima de las otras disposiciones y superó la temperatura ambiental hasta el doble de su valor ($\Delta T^\circ = 2$) debido a la época del año en el cual se realizó la medición (pleno verano, Figura 48).

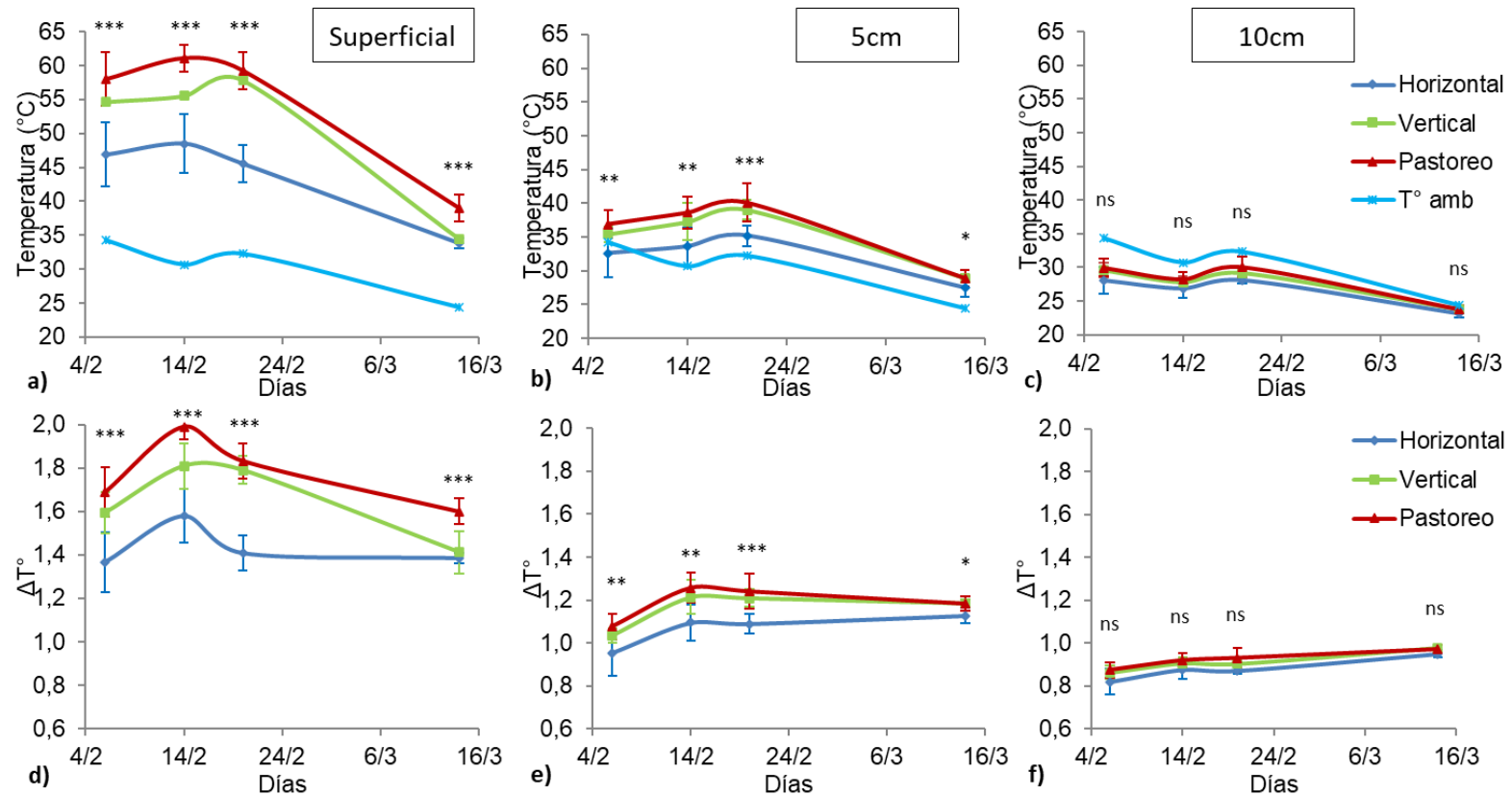


Figura 48. Temperatura del suelo y ambiente (arriba) y ΔT° (temperatura del suelo en relación con la temperatura ambiental, abajo) durante el barbecho para los antecesores del Ciclo II en tres profundidades de suelo: superficial (a y d), 5 cm (b y e) y 10 cm (c y f); bajo tres disposiciones del rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo).

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***). Ciclo I (2019). T° amb: Temperatura ambiental a las 15:00 h (Estación meteorológica EEA INTA H. Ascasubi).

Al observar los perfiles de temperatura, al igual que los antecesores, se demuestran las diferencias entre las disposiciones y su reducción en la medida que se profundiza en el perfil del suelo, en esta oportunidad un ΔT° mayor en las 3 profundidades debido a la época en el cual se realizó. El rastrojo horizontal presentó entre un 20 y 40 % menos de temperatura respecto de las otras disposiciones, es decir, presenta un mayor efecto amortiguador (Figura 49).

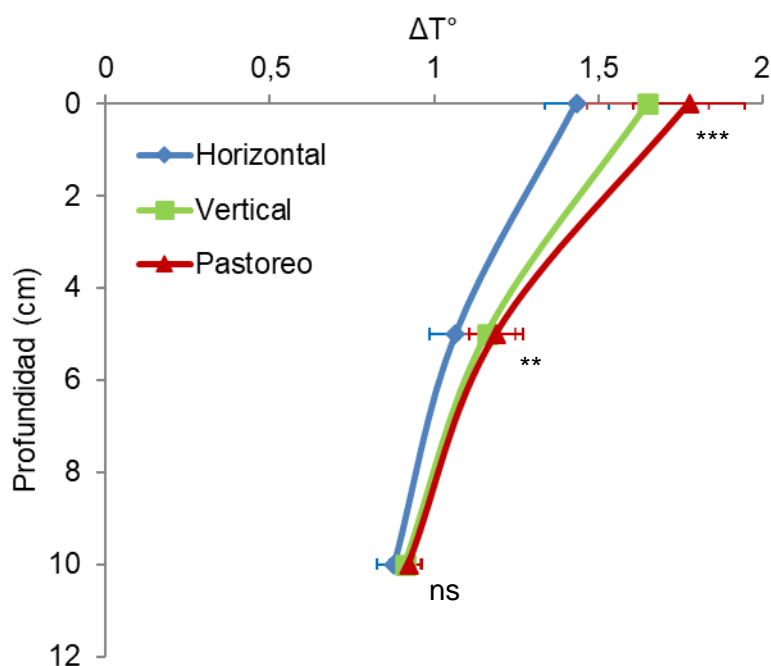


Figura 49. Perfiles de ΔT° (temperatura del suelo en relación con la temperatura ambiental a las 15:00 h) de las disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo) durante el período de barbecho para los antecesores del Ciclo II. Ciclo I (2019).

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***)

Anexo 7. Velocidad laminar del viento durante el barbecho para los antecesores del Ciclo II

Durante el barbecho con rastrojo de trigo del Ciclo I, al igual que en el barbecho con rastrojo de los antecesores, se evaluó el efecto de las disposiciones sobre la velocidad del viento y el diferencial respecto de la velocidad de referencia (ΔVv). Se realizó la observación el 14 de marzo de 2019, siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección Velocidad laminar del viento en Materiales y Métodos del Capítulo II.

Se observaron diferencias significativas para la velocidad del viento y el ΔVv a nivel de superficie y a 40 cm, pero no a 90 cm. No se observaron diferencias entre horizontal y

pastoreo, excepto a nivel de superficie donde el primero fue inferior (Figura 50). La disposición vertical presentó el menor valor de velocidad del viento y el ΔVv , con reducciones de la velocidad entre 10 y 20 % mayor que horizontal y pastoreo. En la medida que nos alejábamos de la superficie del suelo, el efecto de las disposiciones sobre la velocidad del viento era menor.

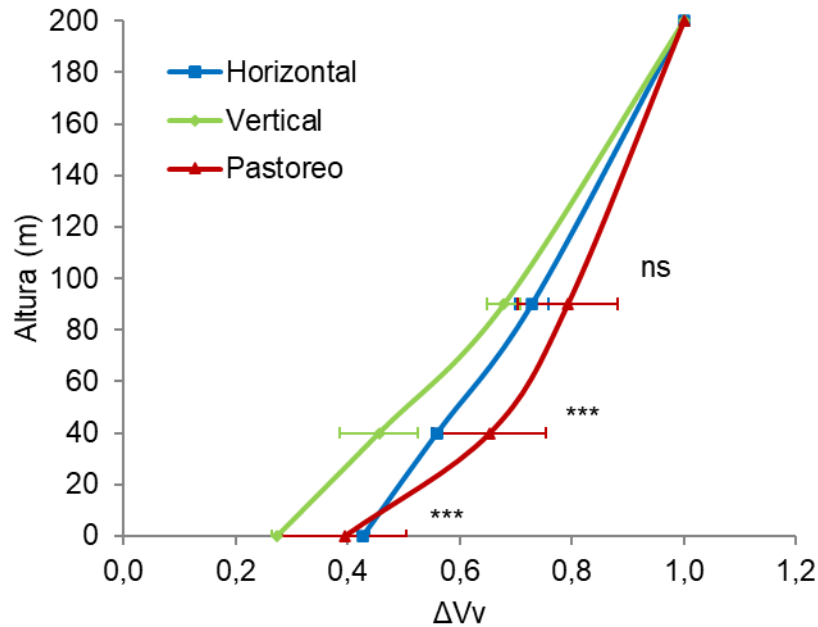


Figura 50. Perfiles de velocidad del viento (ΔVv = velocidad del viento en relación con la velocidad de referencia a 200 cm) de las disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo) en función de la altura respecto de la superficie del suelo.

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***).

A diferencia de los antecesores, la magnitud de las reducciones en la velocidad del viento fue inferior, lo cual pudo deberse principalmente a una menor altura del rastrojo del trigo a pesar de tener un mayor número de vástagos. Al igual que los antecesores, el rastrojo vertical sería la disposición más efectiva para reducir la velocidad del viento y la evaporación directa del agua del suelo ya que reduce el intercambio de vapor por convección.

Anexo 8. Dinámica del nivel freático

Debido a que en todos los años de experimentación se determinó la presencia de agua gravitacional en el estrato edáfico 60-90 cm, se realizó un estudio de la dinámica de la napa freática del lote experimental entre mayo y diciembre de 2021, suponiendo un aporte extra de esta fuente de agua. Por lo tanto, se propuso evaluar las fluctuaciones

en la profundidad del nivel freático durante el ciclo del trigo y relacionarlo con el aporte potencial de agua al cultivo.

Se colocaron 4 freatómetros (F1, F2, F3 y F4), hasta una profundidad de 2 m, equidistanciados por 50 m atravesando el centro del lote. Los mismos se colocaron sobre el ensayo que presentó un diseño en bloques divididos. El F1 se ubicó al inicio del Bloque 1 (B1), el F2 entre B1 y Bloque 2 (B2), el F3 entre el B2 y Bloque 3 (B3) y el F4 al final del B3. Se determinó un desnivel de terreno de 10 cm entre F1 y F4. El nivel freático se midió durante el ciclo del trigo, con una frecuencia entre 15 y 30 días. Se tuvo en cuenta la humedad del suelo (gravimetría) hasta los 90 cm (estratos 0-20, 20-40, 40-60 y 60-90 cm) a la siembra (junio) y cosecha (diciembre) del trigo desde 2017 al 2020. Se determinó la eficiencia de uso del agua (EUA) al relacionar el rendimiento con el uso consuntivo (UC) del trigo. Se determinó de contenido de agua a saturación (Sat), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Las precipitaciones se registraron en la Estación Meteorológica ubicada a 2400 m del lote.

Durante el ciclo del cultivo de trigo se observó que en promedio se ubicó a 1,65 m, oscilando entre 1,40 y 1,90 m (Figura 51). Entre fin de julio y fin de septiembre el nivel freático se encontró por debajo de la profundidad analizada (2,0 m, Figura 51). Las diferencias temporales en la presencia y profundidad del nivel freático son atribuibles a los cambios producidos en la dinámica hídrica subterránea propia del área de riego, ya que el aporte de las precipitaciones fue limitado con un acumulado de 135 mm durante el ciclo del trigo, un registro mensual máximo de 50 mm ocurrido en noviembre y eventos de precipitación no superaron 30 mm día⁻¹.

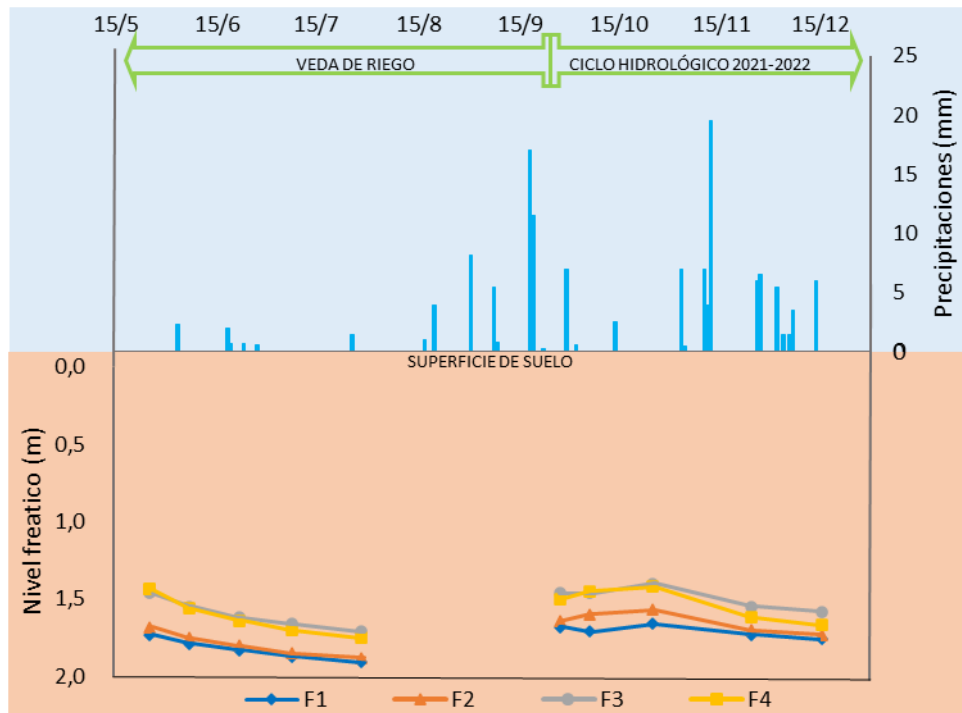


Figura 51. Nivel freático en 4 freaímetros (F1 al F4) y precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo de trigo. El nivel "0" se refiere a la superficie del suelo.

En los cuatro ciclos de cultivo de trigo (2017-2020), a la siembra y cosecha se observó la presencia de agua gravitacional en el estrato de suelo a 60-90 cm, lo que supone el aporte de agua del nivel freático mediante capilaridad. El nivel freático a 1,7 m de profundidad en junio y diciembre de 2021 (Figura 51), permite inferir una extensión de la zona semi-saturada con aporte por capilaridad sobre el plano freático de aproximadamente 1,1 m, contribuyendo 325 mm de agua disponible (Figura 52).

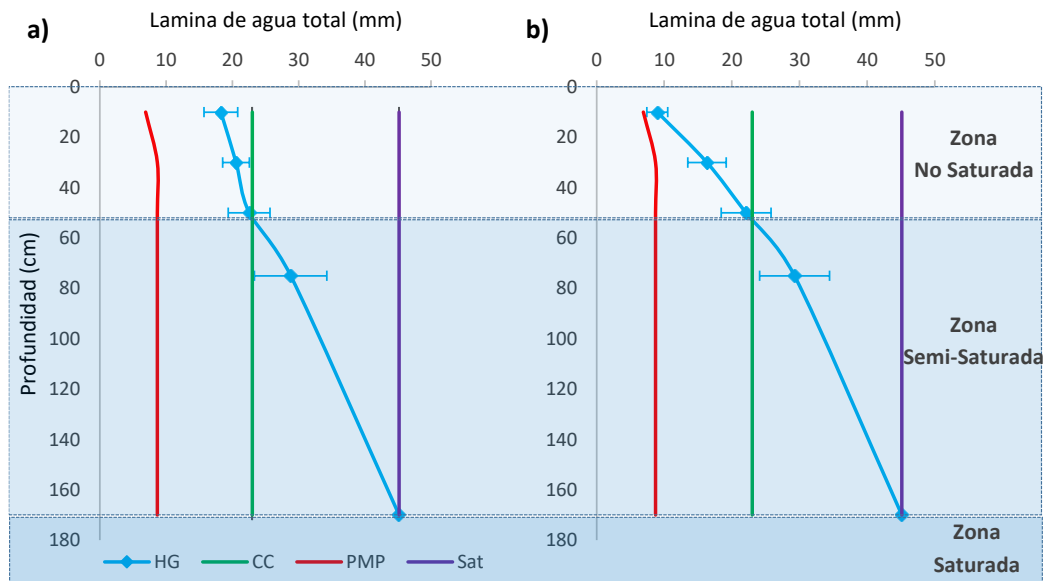


Figura 52. Lámina de agua total (mm) promedio entre 2017-2020, a la siembra (a) y cosecha (b) del cultivo de trigo en función de la profundidad del suelo.

PMP: punto de marchitez permanente, CC: capacidad de campo, Sat: saturación.

Teniendo cuenta que el trigo alcanza su punto máximo de desarrollo radicular en anthesis (0,6 a 1,4 m), los niveles freáticos observados durante octubre y noviembre suponen el aporte de agua capilar estimado en 220 mm. El rendimiento promedio (2017-2020) del trigo fue de 4 Mg ha⁻¹. El UC se estimó en 245 mm, pero al incluir el aporte del nivel freático asciende a 465 mm, resultando en una EUA de 16,3 y 8,6 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente. Este último más acorde a lo observado en trabajos realizados en la región. En cultivos de secano, el rendimiento promedio en la zona es de 1,1 Mg ha⁻¹, con valores alcanzables de 2 Mg ha⁻¹. Por lo tanto, se considera que el aporte aproximado del agua freática a un cultivo de trigo podría estar asociado al 50 % de sus requerimientos hídricos.

Anexo 9. Dinámica del agua en el suelo: el caso de una precipitación extrema

En función del contenido hídrico del suelo luego del evento de precipitación (Tabla 17), se realizó la relación entre la lámina de agua total con el tiempo en los distintos estratos de suelo para evaluar el impacto de las disposiciones del rastrojo en la dinámica del agua (Figura 53).

Tabla 17. Contenido de agua total (mm) en 5 estratos de suelo en función de las disposiciones y las fechas de muestreo durante el barbecho previo a la siembra del trigo del Ciclo II (2019).

Disposición del rastrojo	Días después de la precipitación										
	2	4	9	11	13	16	18	20	23	30	38
0-10 cm											
Horizontal	21,0	19,4	18,9	17,5	15,0	12,2	11,4	10,5	9,7	8,4	7,9
Vertical	18,8	15,7	16,3	16,3	13,8	12,5	11,8	11,1	10,3	9,3	8,4
Pastoreo	19,1	15,1	15,6	13,6	12,6	11,6	11,2	10,2	9,5	8,8	7,8
ANOVA#	***	***	**	**	**	ns	ns	ns	ns	*	ns
DMS (5%)	0,62	1,04	1,63	1,24	0,82	-	-	-	-	0,5	-
10-20 cm											
Horizontal	24,1	22,6	21,9	20,6	19,7	18,7	17,9	17,2	16,0	15,0	14,7
Vertical	22,4	20,6	20,5	20,0	19,0	18,3	17,6	17,7	16,7	15,1	14,5
Pastoreo	22,4	20,6	20,2	19,2	18,4	18,0	17,7	16,5	15,8	15,5	13,9
ANOVA#	ns	*	**	*	0,08	ns	ns	*	ns	ns	ns
DMS (5%)	-	1,45	0,97	0,82	-	-	-	0,89	-	-	-
20-40 cm											
Horizontal	53,3	51,7	47,6	45,7	43,9	42,5	41,2	41,1	40,2	37,8	35,0
Vertical	49,7	48,6	45,9	45,1	44,2	42,4	42,2	42,0	40,5	38,1	35,4
Pastoreo	48,6	47,7	45,2	43,5	41,9	42,5	41,3	42,1	40,3	39,4	33,9
ANOVA#	ns	*	0,1	*	0,13	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DMS (5%)	-	3,19	-	1,62	-	-	-	-	-	-	-
40-60 cm											
Horizontal	61,1	59,9	57,0	56,3	55,7	54,3	53,3	51,5	48,7	47,1	40,5
Vertical	59,2	57,9	54,8	53,0	51,2	51,5	51,7	50,0	47,4	46,6	45,7
Pastoreo	60,2	58,8	55,4	54,8	54,3	53,7	53,3	51,0	47,6	49,0	45,4
ANOVA#	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DMS (5%)	-	-	-	-	3,14	-	-	-	-	-	-
0-60 cm											
Horizontal	159,6	153,6	145,4	140,1	134,2	127,6	123,9	120,3	114,5	108,2	98,0
Vertical	150,1	142,9	137,6	134,3	128,2	124,7	123,3	120,9	115,0	109,1	104,0
Pastoreo	150,4	142,1	136,3	131,1	127,1	125,8	123,5	119,8	113,2	112,8	101,0
ANOVA#	**	***	**	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DMS (5%)	5,56	3,28	5,14	4,45	5,16	-	-	-	-	-	-

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***).

La regresión de segundo grado ($p < 0,001$) explica más del 90 % de la variabilidad de la lámina de agua total hasta 40 días posteriores al evento de precipitación en los estratos de suelo superiores (0-10 y 10-20 cm, Figura 53).

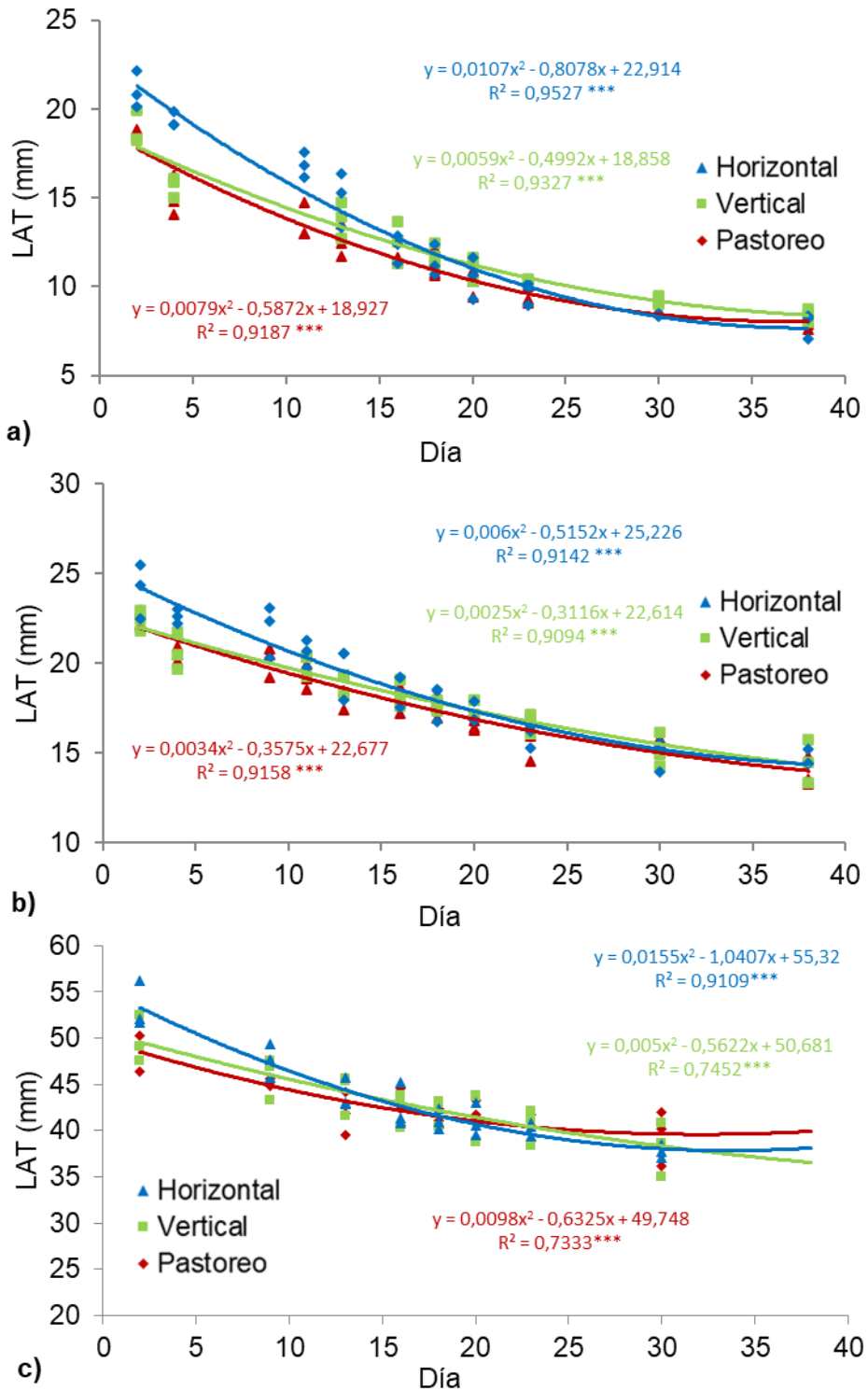


Figura 53. Lámina de agua total (LAT) de las disposiciones de rastrojo (horizontal, vertical y pastoreo), en función de los días después del evento de precipitación (DDP) para la profundidad de 0-10 (a), 10-20 (b) y 20-40 (c).

Significativos a nivel de probabilidad de: 0,05 (*); 0,01 (**); 0,001 (***).

Anexo 10. Precipitaciones en establecimientos de productores del secano de Villarino y Patagones

Se tomó en cuenta las precipitaciones durante el período de seguimiento en lotes de establecimientos de productores a partir del registro desde 1981 en NASA POWER. La precipitación anual se subdividió en período de barbecho y ciclo del cultivo. A su vez, el barbecho se dividió en inicial y final, de acuerdo con las temperaturas (verano y fin de verano-inicio de otoño). Además, el ciclo del cultivo se dividió por la espigazón del trigo (Tabla 18).

Tabla 18. Precipitaciones acumuladas durante los tres años de seguimiento en los sitios del secano de Villarino y Patagones, Buenos Aires.

Sitio	Período	Barbecho			Ciclo del cultivo			Total anual
		Inicial	Final	Total barbecho	S – E	E - MF	Total ciclo	
-----mm-----								
Villarino								
DS	2017	163	222	385	210	69	279	664
	2018	79	152	231	148	106	254	485
DV	2017	185	232	417	205	73	278	695
	2018	85	153	238	153	150	303	541
HS	2019	11	111	122	221	42	263	385
Patagones								
PDB	2017	58	122	180	142	68	210	390
	2018	48	116	164	211	94	305	469
	2019	27	84	111	180	42	222	333
HM	2017	89	159	248	164	68	232	480
	2018	61	129	190	265	127	392	582
Promedio histórico								
Villarino								
	DS	115	154	269	180	99	279	548
	DV	123	161	284	192	110	302	587
	HS	115	154	269	180	103	283	552
Patagones								
	PDB	75	121	196	129	47	177	373
	HM	88	131	219	142	64	206	425

DS: David Safi, DV: Darío Valdman, HS: Hugo Sabugo, PDB: Porfirio de Brito, HM: Hugo Mendioroz, Inicial: enero - febrero, Final: marzo - mayo, S: siembra (junio), E: espigazón o panojamiento (octubre), MF: madurez fisiológica (diciembre).

Anexo 11. Estadística descriptiva de las evaluaciones realizadas en lotes de productores de Villarino y Patagones

Tabla 19. Estadística descriptiva de la acumulación y estructura de la biomasa de los cultivos de gramíneas en lotes bajo labranza cero del semiárido austral pampeano, durante los años 2017, 2018 y 2019.

Cultivo	Parámetro	Unidad	N	Media	CV	Mín	Máx	Mediana
Gramíneas (trigo, avena y cebada)	Vástagos fértiles	nº m ⁻²	69	309	31,2	114	532	300
	Altura de vástago fértil	cm	69	61	13,0	43	80	62
	Biomasa total	Mg ha ⁻¹	69	6,5	42,3	2,1	13,7	6,0
	IC		69	0,40	14,8	0,22	0,54	0,41
	Grano	Mg ha ⁻¹	69	2,6	39,8	0,8	5	2,5
	Rastrojo		69	4,0	47,6	1,3	9,4	3,5

IC: índice de cosecha, *n*: número de muestras, CV: coeficiente de variación, Mín: mínimo, Máx: máximo.

Tabla 20. Estadística descriptiva de los indicadores de eficiencia de producción de biomasa de los cultivos de gramíneas en lotes bajo labranza cero del semiárido austral pampeano, durante los años 2017, 2018 y 2019.

Cultivo	Parámetro	Unidad	<i>n</i>	Media	CV	Mín	Máx	Mediana
Gramíneas	UC	mm	69	289	18,0	203	448	290
(trigo, avena y cebada (69))	EUA _{btot}		69	23	49,6	8	68	21
	EUA _{gr}	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	69	9	42,9	3	21	8
	EUA _{rast}		69	14	56,6	5	46	12

UC: uso consuntivo, EUA_{btot}, EUA_{gr} y EUA_{rast}: eficiencia de utilización del agua para la acumulación de biomasa seca total, de grano y de rastrojo, respectivamente, *n*: número de muestras, CV: coeficiente de variación, Mín: mínimo, Máx: máximo.

Tabla 21. Estadística descriptiva de las características del rastrojo al final del barbecho de los cultivos de gramíneas en lotes bajo labranza cero del semiárido austral pampeano, durante los años 2017, 2018 y 2019.

Cultivo	Parámetro	Unidad	<i>n</i>	Media	CV	Mín	Máx	Mediana
Gramíneas	IAT		69	0,19	60,8	0,05	0,56	0,17
(trigo, avena y cebada)	Rastrojo	Mg ha ⁻¹	84	2,7	39,4	0,4	6,4	2,8
	Cobertura	%	84	63	45,3	5	100	71

IAT: índice de área de tallo, *n*: número de muestras, CV: coeficiente de variación, Mín: mínimo, Máx: máximo.

Tabla 22. Estadística descriptiva de la eficiencia de barbecho (EB) los cultivos de gramíneas en lotes bajo labranza cero del semiárido austral pampeano, durante los años 2017, 2018 y 2019.

Cultivo	Parámetro (Profundidad)	Unidad	n	Media	CV	Mín	Máx	Mediana
Gramíneas (trigo, avena y cebada)	EB	%	69	27,0	71,4	-26,7	75,3	23,8

EB: eficiencia de barbecho, *n*: número de muestras, CV: coeficiente de variación, Mín: mínimo, Máx: máximo.