

Los índices de contenidos están disponibles en [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com).

Investigación sobre cultivos de campo

Página principal de la revista: www.elsevier.com/locate/fcr

La profundidad del nivel freático afecta la persistencia y la productividad de la alfalfa en la región central. Argentina

Gonzalo Berhongaraya,^a, María Basantac, José Martín Jaureguib^a CONICET, Argentina^b Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral, Argentina^c INTA, Argentina

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Palabras clave:

Medicago sativa

Alfalfa

Producción

Persistencia

ABSTRACTO

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una de las leguminosas perennes más sembradas en el mundo. La profundidad del nivel freático puede ser tanto una oportunidad como una amenaza para este cultivo. En este estudio, analizamos 20 años de datos experimentales de campo tomados en Rafaela (Argentina) para estudiar el impacto de la profundidad del nivel freático en la productividad y la persistencia (cobertura vegetal; %) de la alfalfa. La productividad aérea acumulada promedio de 4 años de diferentes genotipos de alfalfa fue de 51,8 Mg/MS ha⁻¹ con una persistencia final promedio del 54%. La profundidad del nivel freático explicó el 49% de la varianza de la productividad y el 47% de la de la persistencia, y la productividad y persistencia máximas se observaron cuando la profundidad del nivel freático fue inferior a 4 m. Nuestros resultados indicaron que hubo un impacto negativo de los niveles freáticos poco profundos en la producción de alfalfa en condiciones de secano. Estos resultados podrían utilizarse para fundamentar las decisiones de manejo y los modelos de simulación de cultivos.

1. Introducción

La profundidad del nivel freático puede ser tanto una oportunidad como una amenaza para los cultivos (Mercau et al., 2016). Cuando las raíces pueden acceder al nivel freático, los cultivos pueden aumentar su rendimiento. Sin embargo, algunos cultivos son susceptibles a niveles freáticos altos. A medida que el nivel freático se acerca a la zona radicular, el rendimiento del cultivo aumenta hasta alcanzar un cierto umbral; por encima de este umbral, el rendimiento del cultivo se reduce (Nosetto et al., 2009). Los niveles freáticos poco profundos pueden provocar que los suelos se saturen o se encharquen, reduciendo la persistencia y la productividad de los cultivos. Los niveles freáticos han aumentado en muchos lugares del mundo debido a la sustitución de cultivos perennes y bosques por cultivos anuales. En Australia, por ejemplo, la tala de vegetación nativa perenne y la introducción de cultivos anuales disminuyeron la profundidad del nivel freático y aumentaron la salinización (Rengasamy, 2006). En el cinturón maicero occidental de Estados Unidos, la conversión de pastizales nativos en cultivos de maíz y soja ha aumentado los niveles freáticos y ha hecho que la zona sea más vulnerable al encharcamiento (Wright y Wimberly, 2013). En Argentina, los estudios sobre el efecto de la profundidad del nivel freático en la producción agrícola han aumentado en los últimos 20 años debido al incremento del nivel freático y a las frecuentes inundaciones. Se han investigado tanto los efectos positivos como negativos de la profundidad del nivel freático en cultivos anuales en la región pampeana (Sadras y Calvino, 2001; Nosetto et al., 2009, 2015; Mercau et al., 2016).

Sin embargo, hay poca información disponible sobre pastos perennes.

(Dardanelli y Collino, 2002).

La región pampeana se considera una hiperllanura (Jobbagy et al., 2008), es decir, una región que tiende a presentar inundaciones prolongadas asociadas con aumentos del nivel freático. En los últimos 20 años, los pastos perennes de esta región han sido reemplazados por cultivos anuales, particularmente monocultivos de soja (Paruolo et al., 2005; Phélinas y Choumert, 2017). Este cambio en el uso de la tierra ha creado profundos cambios hidrológicos (Viglizzo et al., 2009; Marchesini et al., 2017). Mediciones experimentales y estudios de modelización han demostrado que el reemplazo de los sistemas ganaderos basados en pastos por la producción de granos ha disminuido las tasas de transpiración y aumentado el contenido de humedad del suelo. Esto ha causado la escasez de agua.

la mesa ha subido y ha aumentado el riesgo de inundaciones (Nosetto et al., 2012). Ampliar la superficie sembrada con pastos perennes podría revertir esta situación (Angus et al., 2001; Nosetto et al., 2015). Los pastos de alfalfa (*Medicago sativa* L.), en particular, podrían extraer más agua de las profundidades que otras especies de pastos perennes como el trébol rojo y la achicoria (Brown et al., 2005). Por lo tanto, se ha propuesto el uso de alfalfa como una forma eficiente de reducir la profundidad del nivel freático (Ward et al., 2003; Ferdowsian y Bee, 2006). Sin embargo, muchos suelos en la región pampeana son de textura pesada con movimiento lento del agua (Imhoff et al., 2016), en los que las enfermedades de las raíces de la alfalfa pueden proliferar (Kuan y Erwin, 1980) y afectar su persistencia. Esto podría comprometer la capacidad de las raíces de la alfalfa para extraer agua en estos suelos y requiere una investigación más profunda.

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una de las leguminosas perennes más sembradas.

Corresponding author at: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral, Kredder 2805, Esperanza (3080), Santa Fe, Argentina.

Dirección de correo electrónico: bgonzalo@agro.uba.ar (G. Berhongaraya).<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.018> Recibido

el 25 de septiembre de 2018; Recibido en forma revisada el 18 de febrero de 2019; Aceptado el 23 de febrero de 2019

0378-4290/ © 2019 Elsevier BV Todos los derechos reservados.

cultivos en el mundo (Monfreda et al., 2008), con un estimado de 30 millones hectáreas sembradas en todo el mundo (Yuegao y Cash, 2009). En Argentina Pampas, este es el principal forraje que se pastorea en las granjas lecheras (Bacigalup y Ustarroz, 2007). Los datos de 2017 indican que el área con alfalfa sembrada es de aproximadamente 3,2 millones de hectáreas (Daniel Basigalup, comunicación personal), lo que la convierte en el pasto perenne más sembrado del país, y el segundo mayor productor de alfalfa del mundo (Yuegao y Cash, 2009). Sin embargo, el área sembrada ha disminuido aproximadamente un 50% en los últimos dos años. décadas (Basigalup et al., 2007; Basigalup, 2014; Zenklusen et al., 2018). Algunas de las principales razones de este descenso pueden ser el bajo rendimiento y la persistencia de los pastos de alfalfa debido a limitaciones climáticas como inundaciones y el aumento del nivel freático. En una retroalimentación circular, la reducción en la proporción de pastos de alfalfa sembrados aumenta aún más el vulnerabilidad de la región pampeana a las inundaciones y al aumento del nivel freático, y En consecuencia, expone a las granjas lecheras y de carne a mayores riesgos. Por lo tanto, comprender los factores que afectan la persistencia y el rendimiento de la alfalfa es importante para desarrollar sistemas agrícolas sostenibles. En esta investigación, explorar datos de un experimento de alfalfa a largo plazo para analizar el impacto de la profundidad del nivel freático en el rendimiento y la persistencia de la alfalfa. Para nuestra conocimiento, este es el primer intento de cuantificar los efectos a largo plazo de Influencia de la profundidad del nivel freático en la persistencia y productividad de los cultivos de alfalfa.

2. Materiales y métodos

2.1. Fuente de datos

Los datos para este estudio provienen de una red nacional de evaluación de genotipos de alfalfa (Red de Evaluación de Cultivos de Alfalfa, INTA, 2015). Esta red consta de ensayos comparativos de genotipos de alfalfa. en el que la producción de materia seca (productividad primaria neta aérea, PPNA) y la persistencia (cobertura vegetal en la línea de siembra) bajo Los esquejes se miden. Se plantan nuevos experimentos cada dos años. y dura de tres a cuatro años. Los datos de los diferentes genotipos son agrupados en dos conjuntos: semidormante (SD; grupos de dormancia otoñal 6 y 7) y activa en invierno (WA; grupos de dormancia otoñal 8, 9 y 10). Anualmente, La información de toda la red se publica en un informe llamado "Avances en Alfalfa" (INTA, 2015). Los resultados que se presentan en este artículo corresponden a datos de la Estación Experimental ubicada en Rafaela. (-31°12', -61°30', 99 m sobre el nivel del mar), uno de los varios sitios de la red. El sitio fue seleccionado para este estudio porque (i) es uno de los pocos sitios con registros completos de la profundidad del nivel freático durante el período estudiado y (ii) es una de las regiones más importantes para la producción de alfalfa y, sin embargo, una zona propensa a excesos de agua que pueden afectar su producción y persistencia.

2.2. Descripción del lugar de estudio y configuración experimental

El área donde se ubicó el experimento es típica de la zona eólica. paisajes sedimentarios de las Pampas y fue originalmente ocupado por pastizales nativos (Soriano et al., 1991). Actualmente, la mayor parte de esta región es dominados por cultivos anuales, seguidos en importancia por pastos y Pastizales nativos (Berhongaray et al., 2013). El clima es húmedo. subtropical, Cfa en la clasificación de Köppen (McKnight y Hess, 2002), con una temperatura media anual de 19 °C y una precipitación media anual de 960 mm al año. El suelo es un argiudoll típico según el USDA. taxonomía, con una textura franco-limosa pesada y un contenido de arcilla muy alto. entre 40–80 cm de profundidad (+35%) (Mosconi et al., 1982). Un análisis detallado Descripción de las características del perfil del suelo, como materia orgánica y arcilla. y el contenido de arena, así como la capacidad de retención de agua del suelo, se presentan en Tabla 1.

Los datos de este estudio corresponden a 19 estudios independientes de cuatro años. experimentos realizados desde 1994 hasta 2016. Cada experimento consistió en: en ensayos de campo de genotipos de alfalfa sembrados cada dos años (ver Material complementario para obtener más detalles sobre la cronología. Anterior Los cultivos para los experimentos variaron, siendo mijo (Setaria italica) y la soja (Glycine max) es la más común. Los experimentos se realizaron bajo

Tabla 1

Descripción del perfil del suelo de Rafaela (SF, Argentina). Se obtuvieron los datos. de la base de datos digital de suelos argentinos (INTA, 2010). Retención de agua del suelo La capacidad se calculó siguiendo a Rawls (1983).

Horizonte del suelo	Profundidad (centímetros)	Orgánico asunto (%)	Suelo arcilloso y arenoso que retiene agua. capacidad (%) (%) (mm)
A	0 - 20	2,53	26 2,2 48
NO	20-35	1,55	27,5 2,8 33
Bt1	35-62	0,88	38 2,1 55
Bt2	62-92	0,64	40,5 1,7 58
Bt3	92-115	0,41	33 2,2 45
—	115-140	0,29	30,5 1 51
do	140-160	0,19	29,5 4,8 39

Se aplicó labranza convencional y se preparó el terreno con grada de discos. Se utilizaron herbicidas de preemergencia para prevenir la aparición de malezas. Cada ensayo se sembró con un espaciamiento entre hileras de 20 cm a una profundidad objetivo de 1 cm. Parcelas de 5 × 1 m. Las parcelas se sembraron a mano con los diferentes genotipos de alfalfa a una tasa de siembra equivalente a 20 kg de semilla desnuda ha⁻¹ Recubrimiento Se incluyeron inoculantes, fungicidas e insecticidas. Las parcelas se dispusieron en un diseño de bloques completamente aleatorizados con cuatro réplicas. Todos Los factores bióticos adversos (por ejemplo, insectos, malezas, enfermedades, etc.) fueron químicamente controlada durante los experimentos. La producción de materia seca (MS) se obtuvo cortando con una segadora rotativa y pesando todo el forraje producido en cada parcela (5 m²). Todos los cortes se realizaron al 10% de floración, o cuando los brotes de la corona alcanzaron los 5 cm. Fracción de MS en cada La fecha de corte se determinó midiendo una submuestra de 200 g de peso fresco que se secó en horno forzado a 70 °C hasta que quedó constante peso. La persistencia se estimó a partir de la cobertura vegetal mediante conteo, en un fila de 1 m, el número de espacios vacíos mayor de 15 cm, evitando el dos filas de borde de cada parcela. La persistencia se midió en el final. año de producción y expresado como cobertura (%). Debido al número de Los genotipos evaluados difirieron en cada experimento individual (que abarcan de 7 a 30 en cada conjunto, SD y WA), valores promedio para conjuntos de genotipos Se utilizaron para el análisis. La ANPP se reportó anualmente. como Mg DM ha⁻¹ y⁻¹ y Mg DM ha⁻¹ para el rendimiento acumulado después 4 años.

Los datos meteorológicos se obtuvieron de un sistema meteorológico convencional. estación ubicada a 750 m de las pruebas. La estación sigue el ciclo térmico (temperatura del aire), heladas agronómicas y meteorológicas, ciclo del agua (precipitación, evaporación, humedad del aire) y ciclo de la energía (solar) radiación, velocidad y dirección del viento) en tres observaciones diarias a las 9:00, 15:00 y 21:00 h. La profundidad del nivel freático se monitoreó diariamente con un hidrómetro. Los datos meteorológicos diarios y de profundidad del nivel freático se promediaron el anual y cada 4 años respectivamente para cada ensayo (ver Suplemento Material para la duración del ensayo). Se establecieron arbitrariamente dos umbrales de nivel de agua. definido como crítico —es decir, 0,5 m y 1,0 m— y el número de días con Los niveles de agua subterránea por encima de esos umbrales se consideraron un indicador indirecto de riesgo de exceso de agua.

2.3. Análisis estadístico

Se realizaron análisis de regresión y correlación para buscar Asociaciones significativas (p < 0,05) entre variables. El cambio en la relación entre los días de profundidades críticas del nivel freático y la media La profundidad del nivel freático (véase la sección de Resultados) se modeló utilizando un modelo lineal. modelo de meseta. La ANPP total y la persistencia después de 4 años fueron en comparación con el clima (es decir, la temperatura media y la precipitación) y el suelo Profundidad del nivel freático como variables explicativas utilizando modelos no lineales incluido en el software Infostat (Di Rienzo et al., 2011). Lineal, Se probaron la interacción cuadrática entre las variables explicativas en los diferentes modelos no lineales. Las estimaciones del modelo fueron estadísticamente comparado con datos medidos utilizando métodos de regresión lineal. El rendimiento de los modelos se evaluó calculando el R2 y la raíz cuadrada.

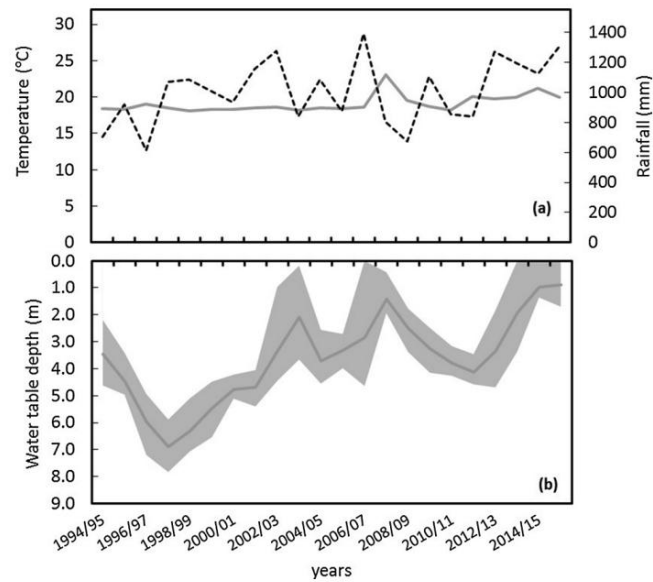


Figura 1. (a) Temperatura media (línea gris) y precipitación (línea discontinua) y (b) Profundidad del nivel freático (línea gris) y rango anual (área gris) entre 1994 y 2016. in Rafaela, Argentina.

error cuadrático medio (RMSE), y se conservó el mejor modelo. La intersección y se probaron las pendientes de los valores estimados frente a los valores medidos para desviación de una hipótesis nula de 0 y 1, respectivamente, mediante una prueba t.

3. Resultados

La temperatura media anual aumentó a una tasa de 0,1 °C por año. a lo largo de toda la duración del estudio (Fig. 1). Precipitación total osciló entre 614 mm en 1996/97 (de julio de 1996 a junio de 1997) y 1388 mm en 2006/07. La profundidad del nivel freático siguió los picos de precipitaciones. Sin embargo, las bajas precipitaciones no se vieron reflejadas en disminuciones en nivel freático. En general, la profundidad del nivel freático aumentó durante el estudio. período de 7,8 m en 1997 a 0 m en 2014/15. El número de días con Las profundidades del nivel freático por encima de los umbrales críticos estaban relacionadas linealmente. con la profundidad del nivel freático (Fig. 2). Por ejemplo, a una profundidad del nivel freático de 3 m (promedio de 4 años), el nivel freático estuvo por encima de 0,5 m durante 47 días. y por encima de 1,0 m de profundidad durante 128 días como se describe en la meseta lineal. modelo.

La producción primaria neta aérea acumulada promedio después de 4 años fue de 51,8 Mg MS ha⁻¹. con una persistencia final media del 54%. No hubo diferencia (p = 0,14) en ANPP entre genotipos semidormidos y genotipos activos en invierno (47,9 y 55,3 Mg DM ha⁻¹ , respectivamente). Persistencia

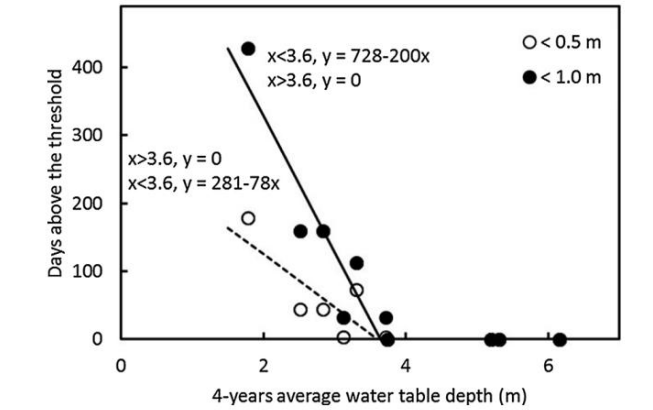


Figura 2. Días con profundidad del nivel freático superior a 0,5 y 1,0 m de profundidad durante el periodo de 4 días. años de vida útil de la alfalfa. Las líneas representan el ajuste lineal-meseta a los datos.

Tabla 2

Coefficientes de correlación de Pearson de la PPNA anual (Mg DM ha⁻¹ y⁻¹), 4 años ANPP total (Mg MS ha⁻¹) y persistencia (%) de pastos de alfalfa que crecen en Rafaela (SF, Argentina) con variables de suelo y clima. T media = temperatura media; T min = temperatura media mínima; T máx = temperatura media máxima. temperatura; S = horas diarias de sol brillante (h); Sr = S relativo (S/duración del día); Precipitación = precipitación media anual; Wt = profundidad media del nivel freático; Wt máx = profundidad máxima del nivel freático; WT min = profundidad mínima del nivel freático profundidad. ns = no significativo; *p < 0,05; **p < 0,001. ¹ Todas las variables fueron promediado durante el periodo de 4 años.

	ANPP anual		ANPP1 total		Persistencia1	
T significa	-0,314	**	-0,651	**	-0,737	**
T min	-0,279	*	ns		-0,563	*
T máx.	-0,312	**	-0,711	**	-0,602	**
S	-0,237	*	-0,584	**	ns	
Sr	ns		-0,560	*	ns	
Lluvia	ns		-0,510	*	-0,586	**
Peso	0,325	**	0,694	**	0,601	**
Peso máximo	0,313	**	0,730	**	0,565	*
Peso	0,316	**	0,624	**	0,625	**
mínimo Días < 0,5 m ns			-0,587	**	-0,808	**
Días < 1,0 m	0,330	**	-0,614	*	-0,786	**

Tampoco hubo diferencias (p = 0,96) entre los genotipos. Hubo una correlación (p = 0,1) entre productividad y persistencia, pero ambas Los factores estaban altamente correlacionados con las variables de agua y temperatura. (Tabla 2). La producción y la persistencia se correlacionaron negativamente con temperatura y precipitaciones, mientras que estaban correlacionadas positivamente con profundidad del nivel freático y variables asociadas (p < 0,01; Tabla 2 y Figura 3). La profundidad del nivel freático explicó el 49% de la varianza de la productividad y el 47% de la persistencia (Figura 3), y la productividad y persistencia máximas se observaron cuando la profundidad del nivel freático

estaba por debajo de los 4 metros de profundidad.

4. Debate

El nivel freático tuvo un impacto negativo en la persistencia y productividad de la alfalfa cuando estaba por encima de ~4 m de profundidad desde la superficie del suelo. Por encima de esto En un nivel crítico, existía un alto riesgo de que el nivel freático alcanzara la parte superior del suelo. capas (< 0,5 m de profundidad) durante los 4 años de vida de la alfalfa. Esto es en consonancia con el efecto negativo de los niveles freáticos poco profundos reportado previamente para suelos arenosos en Dakota del Norte (Benz et al., 1982). Los autores Se descubrió que el rendimiento de la alfalfa disminuía cuando el nivel freático estaba en 46 cm de profundidad en comparación con un valor óptimo de ~150 cm. Los efectos eran mucho más grandes en las plantaciones de 2 años en comparación con los cultivos de plántulas. Diferencias entre nuestra profundidad óptima estimada del nivel freático (~4 m) y las de Benz et al. (1982) (~1,5 m) pueden reflejar diferencias texturales entre suelos. Sus suelos arenosos tienen menos probabilidades de tener problemas de aireación que aquellos con contenido de arcilla utilizados en el presente estudio. De manera similar, Rai et al. (1971) informaron una disminución del rendimiento del 70% para una plántula de alfalfa. cultivo cuando el nivel freático subió de 45 cm a 15 cm en un suelo franco arenoso suelo. Los efectos fueron mucho más severos cuando subió el nivel freático. inmediatamente después del corte, lo que indicó un efecto más perjudicial cuando había poca biomasa y transpiración.

Estudios previos en la misma región encontraron un efecto positivo del agua. Tabla sobre la producción de alfalfa utilizando métodos indirectos derivados del agua. utilizar cálculos de eficiencia (Dardanelli y Collino, 2002). Sin embargo, Esta relación positiva se encontró en un solo periodo experimental. (1993–1997), que correspondieron a los años más secos de los 20 años Se evaluaron series temporales en nuestro estudio. Además, este periodo tuvo una duración de 4 años. profundidad media del nivel freático de 5,2 m, muy por debajo de los umbrales definidos como perjudicial en nuestro trabajo (4 m). Los valores de nivel freático menos profundos Según lo informado en nuestro experimento, podría causar que los suelos se saturen o anegado en las capas superiores del suelo. El umbral de 4 metros de profundidad definido en este trabajo podría parecer un nivel freático profundo. Sin embargo, el El ascenso del agua capilar desde el nivel freático está inversamente relacionado con la

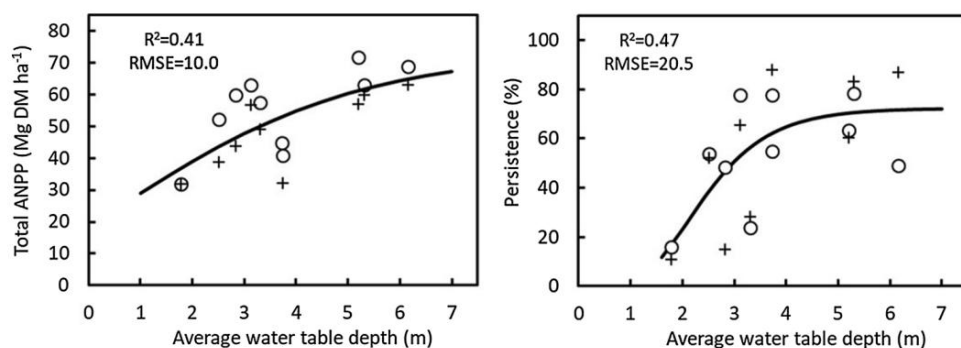


Fig. 3. Producción primaria neta aérea total (PPNA) de 4 años (Mg MS ha^{-1}) y persistencia (%) de experimentos de alfalfa según la profundidad promedio del nivel freático (m) de 4 años en Rafaela, Argentina. Los diferentes símbolos representan genotipos semidormantes (cruces) y activos en invierno (círculos abiertos). Las líneas representan el ajuste de los datos al modelo de Gompertz: $\alpha \cdot \exp(-\beta \cdot \exp(-\gamma \cdot \text{wt}))$.

el diámetro promedio de los poros capilares, y en los suelos de textura fina de nuestro estudio esta altura capilar puede alcanzar de 1,5 a 3 m (Marano et al., 2009). Nuestros resultados demuestran que incluso a profundidades de nivel freático de 3–4 m hay un alto riesgo de que el nivel freático alcance los niveles superiores del suelo (~50 cm) durante 50 a 100 días durante la vida útil de la alfalfa (4 años). Solo 2 días de inundación pueden reducir la producción de alfalfa en un 50% a una temperatura de 32 °C (Thompson y Fick, 1981), una temperatura común de primavera y verano en Rafaela. Dado que las temperaturas también aumentaron durante la duración de nuestro estudio, la menor persistencia podría ser causada potencialmente por una combinación de temperaturas más altas y niveles freáticos más altos. Planteamos la hipótesis de que el efecto negativo de la lluvia en la producción y la persistencia está relacionado con su efecto en el aumento del nivel freático.

La persistencia se vio más afectada que la producción, como revelaron los modelos. Neal et al. (2009) informaron que el riego frecuente de cultivos de alfalfa causó una disminución del 83% en la densidad de plantas y una disminución del 33% en el rendimiento tres años después de la siembra. Estos autores asociaron esta disminución en la densidad de plantas con observaciones de campo de pudrición de la raíz (*Phytophthora megasperma* D.) y pudrición de la corona (*Colletotrichum trifolii* B.). De manera similar, Brown et al. (2005) informaron una mayor proporción de malezas en cultivos de alfalfa irrigados en comparación con cultivos de secano debido a la pérdida de plantas. En suelos de textura pesada, es importante sembrar cultivares que hayan sido seleccionados genéticamente por su resistencia a *Phytophthora* y otros patógenos de la raíz (Rogers et al., 1978). Los resultados han demostrado que los cultivares resistentes de alfalfa pueden mostrar hasta un 40% de aumento en el rendimiento en comparación con los cultivares susceptibles (Wiersma et al., 1995). Sin embargo, la disminución de la persistencia y la productividad de los pastizales de alfalfa en dichos suelos también puede verse afectada por factores fisiológicos, lo que limitaría el impacto del uso de cultivares resistentes. Thompson y Fick (1981) indicaron que la inundación del suelo provocó una interrupción inmediata del crecimiento de raíces y brotes, y que los efectos negativos se agravaron con temperaturas más elevadas del suelo. Estas respuestas adversas se produjeron antes de la aparición de la pudrición radicular por *Phytophthora*.

Esto respaldaría el hecho de que los niveles freáticos poco profundos podrían reducir el rendimiento a pesar del uso de genotipos resistentes.

La producción de alfalfa aumentó del primer al segundo año. Se ha demostrado que la capacidad de la alfalfa para explorar y secar el suelo cambia desde la etapa de plántula hasta la etapa establecida. En un experimento realizado en la Pampa meridional bajo condiciones climáticas y de suelo similares a las de Rafaela, la biomasa radicular aumentó un 25% de la primera a la segunda temporada (Ojeda et al., 2018). Se observaron incrementos mayores de ~50% en condiciones más secas y frías en Canadá (Bolinder et al., 2002). Las comparaciones de plántulas y alfalfas establecidas en Nueva Zelanda demostraron que en estas últimas la alfalfa consumió un 50% más de agua disponible en el suelo (Sim et al., 2017). En un franco limoso Entic Haplustoll, se encontró que la profundidad de extracción de agua del suelo por la alfalfa era de hasta 2,5 m (Dardanelli et al., 1997). Estos resultados demostraron que la extracción de agua por la alfalfa fue mayor cuando el sistema radicular estaba establecido.

Nuestros resultados mostraron que la producción disminuyó después del segundo año. Además, los efectos del clima y del nivel freático se correlacionaron mejor con la ANPP total después de 4 años que con la ANPP anual (Tabla 2). Sospechamos que esto podría deberse al recorte de la raíz principal con el tiempo debido al nivel freático elevado y a los bajos niveles de oxígeno, seguido de infecciones y muerte de las raíces. Estos procesos podrían no ser inmediatamente evidentes después de un

único evento de inundación, pero podrían volverse importantes durante la vida útil del cultivo (4 años).

La profundidad del nivel freático ha ido en aumento en los últimos 30 años en toda la región pampeana. Las mediciones realizadas en la Estación Experimental de Investigación Marcos Juárez del INTA mostraron que, desde la década de 1970, la profundidad del nivel freático aumentó de aproximadamente 11 m a menos de un metro en 2017 (INTA, 2018).

La producción y la persistencia son características deseables en los pastos perennes. En esta investigación, presentamos resultados que nos permitieron comprender mejor el efecto de la profundidad del nivel freático en la persistencia y la producción de alfalfa. Esta es una herramienta valiosa para que técnicos y agricultores decidan cuándo y dónde sembrar alfalfa, así como el riesgo asociado a los acuíferos superficiales. Estos datos preliminares también podrían utilizarse para alimentar modelos de simulación de cultivos.

5. Conclusiones

Identificamos un impacto negativo significativo de los niveles freáticos poco profundos en la producción de alfalfa bajo condiciones de secano en la Pampa Central Argentina. Se ha propuesto el cultivo de alfalfa como una forma de mantener bajos los niveles freáticos y evitar el riesgo de inundaciones en hiperlanuras como la Pampa (Nosetto et al., 2015). Sin embargo, los niveles freáticos poco profundos pueden debilitar su potencial de extracción de agua. Estos resultados novedosos nos permitieron cuantificar un umbral de profundidad del nivel freático por encima del cual se podrían considerar especies perennes resistentes a la poca profundidad en lugar de la alfalfa. Nuestros resultados también proporcionan una herramienta de gestión de riesgos para sistemas de producción de secano. Dado que la proporción de cultivos anuales y pastos perennes puede afectar la hidrología y el clima regionales, las simulaciones de modelos de conversión de tierras de cultivo a pastizales y viceversa podrían incluir los efectos descritos.

Expresiones de gratitud

Esta investigación ha recibido financiamiento de la Universidad Nacional del Litoral (CAI+D Orientado 2016 Cod. 3-6) y CREA (Proyecto Rotaciones en Tambo). Nos gustaría agradecer al Prof. Derrick Moot y al Prof. Luis Romero por sus valiosos comentarios que contribuyeron a mejorar este manuscrito.

Referencias

- Angus, J., Gault, R., Peoples, M., Stapper, M., Van Herwaarden, A., 2001. Agua del suelo extracción mediante cultivos de secano, pastos anuales y alfalfa en el sureste de Australia. *Aust. J. Agric. Resour. Econ.* 52, 183–192.
- Bacigalup, D., Ustarroz, E., 2007. *Actas del 37º Simposio de Alfalfa y Forraje de California*, págs. 53–62.
- Bacigalup, D., 2014. Situación de la Alfalfa en Argentina. In: INTA (Ed.), *Jornada Nacional de Forrajes Conservados*. INTA, Manfredi (Argentina), pp. 95–100.
- Bacigalup, D., Rossanigo, H., Rodríguez, R.O., Spada, N.E., Collino, M.C., Dardanelli, D.J., De Luca, J.L., Racca, M.J., González, R.W., Ríos, N.S., Ardila, R.D., 2007. *El cultivo de la alfalfa en Argentina*. Ediciones INTA, Buenos Aires.
- Benz, L., Doering, E., Reichman, G., 1982. Nivel freático y efectos del riego en la alfalfa cultivada en suelos arenosos. *Can. Agric. Eng.* 24, 71–75.
- Berhongaray, G., Alvarez, R., De Paape, J., Caride, C., Cantet, R., 2013. Efectos del uso de la tierra sobre el carbono del suelo en la Pampa Argentina. *Geoderma* 192, 97–110.

G. Berhongaray, et al. Investigación sobre cultivos de campo 235 (2019) 54–58

Bolinder, M., Angers, D., Bélanger, G., Michaud, R., Laverdière, M., 2002. Biomasa radicular y relación tallo/raíz de cultivos forrajeros perennes en el este de Canadá. *Can. J. Plant Sci.* 82, 731–737.

Brown, H., Moot, D., Pollock, K., 2005. Producción de forraje, persistencia, características nutritivas y uso del agua de forrajes perennes cultivados durante 6 años en un suelo franco limoso de Wakanui. *NZJ Agric. Res.* 48, 423–439.

Dardanelli, J., Collino, DJ, 2002. Contribución del nivel freático al uso del agua por la alfalfa en diferentes ambientes de la Pampa argentina. *Agriscientia* 19, 11–18.

Dardanelli, JL, Bachmeier, OA, Sereno, R., Gil, R., 1997. Profundidad de enraizamiento y patrones de extracción de agua del suelo de diferentes cultivos en un suelo franco limoso Haplustoll. *Field Crop Res.* 54, 29–38.

Di Rienzo, JA, Casanoves, F., Balzarini, MG, González, L., Tablada, M., Robledo, CW, 2011. InfoStat. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Ferdowsian, R., Bee, G., 2006. El papel de la profundidad del agua subterránea en los beneficios hidrológicos de la alfalfa y el valor de recarga subsiguiente. *Actas de la 13.ª Conferencia de Agronomía, Sociedad Australiana de Agronomía, disponible en línea en: www.regional.org.au/au/asa* .

Imhoff, S., da Silva, AP, Ghiberto, PJ, Tormena, CA, Pilatti, MA, Libardi, PL, 2016. Indicadores de calidad física y comportamiento mecánico de suelos agrícolas de Argentina. *PLoS One* 11, e0153827.

INTA, 2010. *Infraestructura de Datos Espaciales de INTA*. <http://geointa.inta.gov.ar>.

INTA, 2015. *Compendio de la Red de evaluación de cultivos de Alfalfa*. <https://inta.gob.ar>.

INTA, 2018. *Registro de niveles freáticos en la EEA*. INTA, Marcos Juárez. <https://inta.gob.ar/>.

Jobbagy, E.G., Nosoetto, M.D., Santoni, C.S., Baldi, G., 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana [The hydroecological challenge of transitions between woody and herbaceous systems in the Chaco-Pampean plains]. *Ecol. Austral* 18, 305–322.

Kuan, T., Erwin, D., 1980. Efecto predisponente de la saturación hídrica del suelo sobre la pudrición de la raíz de la alfalfa causada por Phytophthora. *Phytopathology* 70, 981–986.

Marano, R.P., Miretti, M.C., Serafin, N., Rossi, M., Rodríguez, L., 2009. Dinámica hídrica y recarga de un acuífero libre en condiciones de lluvia extraordinaria en el centro de la provincia de Santa Fe. In: *Asociación Internacional de Hidrogeólogos, G.A (Ed.), Recarga de Acuíferos. Aspectos generales y particularidades en regiones áridas*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Argentino, Santa Rosa, Argentina, pp. 33–41.

Marchesini, VA, Giménez, R., Nosoetto, MD, Jobbágy, EG, 2017. Transformación ecohidrológica en el Chaco seco y el riesgo de salinización de tierras áridas: ¿Siguiendo los pasos de Australia? *Ecohydrology* 10, e1822.

McKnight, TL, Hess, D., 2002. Zonas y tipos climáticos: el sistema de Köppen. *Geografía física: una apreciación del paisaje*. Prentice Hall, Upper Saddle River, Nueva Jersey, EE. UU., págs. 205–211.

Mercau, J.L., Nosoetto, M.D., Bert, F., Giménez, R., Jobbágy, EG, 2016. Superficial Dinámica de las aguas subterráneas en la Pampa: efectos del clima, el paisaje y la elección de cultivos. *Gestión del agua en la agricultura* 163, 159–168.

Monfreda, C., Ramankutty, N., Foley, JA, 2008. Cultivando el planeta: 2. Geográfico Distribución de áreas de cultivo, rendimientos, tipos fisiológicos y producción primaria neta en el año 2000. *Glob. Biogeochem. Cycles* 22. <https://doi.org/10.1029/2007GB002947>.

Mosconi, F.P., Hein, N.E., Panigatti, J.L., 1982. Mapa Detallado de Suelos de la Estación Experimental Regional Agropecuaria Rafaela (Santa Fe) [Detailed soil map of Rafaela Experimental Station]. INTA- Publicación Miscelánea #13 35 pp.

Neal, JS, Fulkerson, WJ, Lawrie, R., Barchia, I., 2009. Diferencia en rendimiento y persistencia-Tensión entre forrajes perennes utilizados por la industria láctea bajo riego óptimo y deficitario. *Crop Pasture Sci.* 60, 1071–1087.

Nosoetto, M., Jobbágy, E., Jackson, R., Sznaider, G., 2009. Influencia recíproca de los cultivos y las aguas subterráneas superficiales en paisajes arenosos de la Pampa Interior. *Field Crop Res.* 113, 138–148.

Nosoetto, M., Jobbágy, E., Brizuela, A., Jackson, R., 2012. Las consecuencias hidrológicas del cambio de cobertura del suelo en el centro de Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 154, 2–11.

Nosoetto, MD, Paez, R., Ballesteros, S., Jobbágy, E., 2015. Niveles freáticos más elevados y riesgo de inundaciones en sistemas de producción de cereales frente a sistemas de producción ganadera en las llanuras subhúmedas de la Pampa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 206, 60–70.

Ojeda, JJ, Caviglia, OP, Agnudei, MG, 2018. Distribución vertical de la biomasa radicular y las reservas de carbono del suelo en sistemas de cultivo forrajero. *Plant Soil* 423, 175–191.

Paruelo, J.M., Guerschman, J.P., Verón, S.R., 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo [Agricultural expansion and land use changes]. *Ciencia Hoy* 15, 14–23.

Phélinas, P., Choumert, J., 2017. ¿Es sostenible el cultivo de soja transgénica en Argentina? *Desarrollo Mundial* 99, 452–462.

Rai, S., Miller, D., Hittle, C., 1971. Respuesta de variedades de alfalfa a diferentes profundidades del nivel freático en varias etapas de crecimiento 1. *Agron. J.* 63, 331–332.

Rawls, WJ, 1983. Estimación de la densidad aparente del suelo a partir del análisis del tamaño de las partículas y el contenido de materia orgánica. *Soil Sci.* 135, 123–125.

Rengasamy, P., 2006. Salinización mundial con énfasis en Australia. *J. Exp. Bot.* 57, 1017–1023.

Rogers, V., Irwin, J., Stovold, G., 1978. El desarrollo de alfalfa con resistencia a la pudrición de la raíz en suelos poco aireados. *Aust. J. Exp. Agric.* 18, 434–441.

Sadras, VO, Calvino, PA, 2001. Cuantificación de la respuesta del rendimiento de grano a la profundidad del suelo en soja, maíz, girasol y trigo. *Agron. J.* 93, 577–583.

Sim, RE, Brown, HE, Teixeira, EI, Moot, DJ, 2017. Patrones de extracción de agua del suelo de la alfalfa cultivada en suelos pedregosos. *Plant Soil* 414, 95–112.

Soriano, A. Rjc León, Oe Sala, Rs Lavado, Va Derigibus, 1991. Río de la Plata Grasslands. En: Copeland, RT (Ed.), *Ecosistemas del mundo. Pastizales naturales, introducción y hemisferio occidental*. Elsevier, Nueva York, págs. 367–407.

Thompson, TE, Fick, GW, 1981. Respuesta de crecimiento de la alfalfa a la duración de la inundación del suelo y a la temperatura. *Agron. J.* 73, 329–332.

Viglizzo, E., Jobbágy, E., Carreño, L., Frank, F., Aragón, R., Oro, LD, Salvador, V., 2009. La dinámica del cultivo y las inundaciones en tierras cultivables del centro de Argentina. *Hidrología. Ciencias del Sistema Terrestre* 13, 491–502.

Ward, P., Dolling, P., Dunin, F., 2003. El impacto de una fase de alfalfa en una rotación de cultivos sobre la recarga de aguas subterráneas en el suroeste de Australia. Unkovich, M., O’Leary, GJ (Eds.), *Actas de la 11.ª Conferencia Australiana de Agronomía disponible en: www.regional.org.au/au/asa/* .

Wiersma, DW, Grau, CR, Undersander, DJ, 1995. Rendimiento de cultivos de alfalfa con diferentes niveles de resistencia a las pudriciones de raíz por Phytophthora y Aphanomyces. *J. Prod. Agric.* 8, 259–264.

Wright, CK, Wimberly, MC, 2013. El reciente cambio en el uso de la tierra en el Cinturón del Maíz Occidental amenaza los pastizales y los humedales. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 4134–4139.

Yuegao, H., Cash, D., 2009. Situación mundial y tendencias de desarrollo de la alfalfa. En: Yuegao, H., Cash, D. (Eds.), *Guía de manejo de la alfalfa para Ningxia*. FAO, Roma, pp. 1–14.

Zenkhusen, M.C., Basanta, M., Sapino, V., 2018. In: AACS (Ed.), *Cambios de uso del suelo y aportes de carbono en el departamento Castellanos (Santa Fe)*. CACS 2018. AACS, Tucuman, pp. 1456–1461.