

Fluctuación de la napa freática y la productividad de alfalfa, en la localidad de Marcos Juárez, ecorregión pampeana centro, Argentina

Martín, B. y Coronel, A.

RESUMEN

La ecorregión pampeana centro de Argentina es afectada por la presencia de la napa e influye positiva o negativamente sobre las pasturas según la profundidad en que se encuentre. En consecuencia, analizar y comprender sus efectos sobre especies forrajeras, en especial alfalfa, es una información útil debido a su incidencia directa en la productividad forrajera. Se consideró el modelo AquaCrop, calibrado y validado en la especie, para estimar la biomasa aérea forrajera en base a las variables climáticas que operan en el crecimiento, el balance hídrico del suelo, y la profundidad de la napa freática. El objetivo de este trabajo es estimar producciones de biomasa forrajera en alfalfa y su respuesta a la fluctuación de la profundidad de la napa freática, en diferentes escenarios climáticos de la localidad de Marcos Juárez, provincia de Córdoba. Los resultados muestran que el modelo es capaz de predecir la biomasa, considerando los aportes de la napa freática, con un error cuadrático medio de 0,409 tn MS ha⁻¹ en cada corte. Hubo respuestas en el crecimiento en alfalfa relacionado a los aportes que realiza la napa freática en el balance hídrico, durante cada situación de corte.

Palabras clave: agua subterránea; *Medicago sativa*; biomasa forrajera

Martín, B. and Coronel, A., 2022. Water table fluctuation and productivity of alfalfa, in Marcos Juárez, central pampean ecoregion, Argentina. RADA XIII: 31-37

SUMMARY

The Pampas ecoregion of Argentina affected by the presence of the groundwater table and it positively or negatively influences of forages depending on its depth. Consequently, the analysis and understanding of its effects on forage species, especially alfalfa, is useful information due to its direct impact on forage productivity. The Aqua Crop model, calibrated and validated for this specie, considered to estimate the forage aerial biomass based on the climatic variables that operate in growth, the soil water balance, and the depth of the water table. The objective of this work was to estimate forage biomass production in alfalfa in response to water table fluctuations, for different climatic scenarios in Marcos Juárez, Córdoba. The results show that the model is capable of predicting biomass, when considering the water table

contributions, with an average error of 0,409 tn MS ha⁻¹ in each section. During each the period of cutting, there were responses in alfalfa growth related to the contributions of the water table in the water balance.

Key words: groundwater; *Medicago sativa*; forage biomass

Martín, B.: Cátedra de Forrajes. Facultad de Cs. Agrarias–UNR. Campo Experimental Villarino, CC N° 14. (S2125ZAA) Zavalla – Santa Fe. Argentina. Coronel, A.: Cátedra de Climatología. Facultad de Cs. Agrarias–UNR. Campo Experimental Villarino, CC N° 14. (S2125ZAA) Zavalla – Santa Fe. Argentina. Instituto de Investigaciones en Ciencias Agrarias de Rosario (IICAR) (CONICET–UNR). Campo Experimental Villarino, CC N° 14. (S2125ZAA) Zavalla – Santa Fe. Argentina. Correspondencia a: coronel8@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad hídrica es el factor ambiental más limitante de la productividad de los cultivos en nuestro país. Por tal motivo el aporte de humedad de la napa freática, adquiere gran relevancia por su potencial contribución en el crecimiento de las especies (Nosetto *et al.*, 2009). El nivel freático fluctúa de acuerdo a la variabilidad climática y al uso y manejo del suelo. La recarga de dicho acuífero libre se genera durante los ciclos de balance hídrico positivo y/o por la reducción del consumo de agua en algún período del año. Se destaca que el ascenso de napas freáticas provoca anegamientos en suelos productivos de la ecorregión pampeana húmeda, y genera problemas en el crecimiento de las especies, entre ellas la alfalfa (*Medicago sativa* L.). No obstante, también puede contribuir al consumo de agua por el sistema radical específico de esa especie (Nosetto *et al.*, 2009). Respecto a esta situación, las interacciones suelo, sistema radical y variables meteorológicas, son fundamentales en el crecimiento de alfalfa, importante componente forrajero en los sistemas ganaderos de Argentina (Basigalup y Rossanigo, 2007).

El uso de modelos para simular la biomasa y rendimiento cosechable de cultivos en respuesta al agua como factor limitante, constituye una valiosa herramienta para estimar el impacto de variaciones climáticas interanuales o estacionales, en diferentes tipos de suelos, y así prevenir potenciales consecuencias ambientales (Hernández *et al.*, 2009). El modelo AquaCrop, calibrado y validado en alfalfa (Martín, 2021), permite estimar la producción de biomasa forrajera considerando las variables meteorológicas y edáficas intervinientes. El modelo, en su última versión, incorpora la profundidad del nivel freático y los aportes que realiza por ascenso capilar (Steduto *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2017). La

influencia de esta variable permite comprender las respuestas de la producción de la biomasa forrajera a la dinámica freática. De modo que napas freáticas demasiado profundas son inaccesibles y no ofrecen agua al crecimiento de la biomasa, en tanto que napas freáticas cercanas a la superficie generan anegamientos que limitan su producción. El objetivo de este trabajo fue aplicar el modelo AquaCrop para estimar producciones de biomasa forrajera en alfalfa y en respuesta a la fluctuación de la profundidad de la napa freática, en diferentes escenarios climáticos de la localidad de Marcos Juárez, provincia de Córdoba.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio fue la localidad de Marcos Juárez (32,68°S; 62,12°O), de la provincia de Córdoba (Figura 1). Se caracteriza por ser una zona subhúmeda con un régimen de precipitaciones que varía entre 800 a 1100 mm. El suelo predominante es Argiudol típico. El balance hídrico regional tiende a ser positivo.

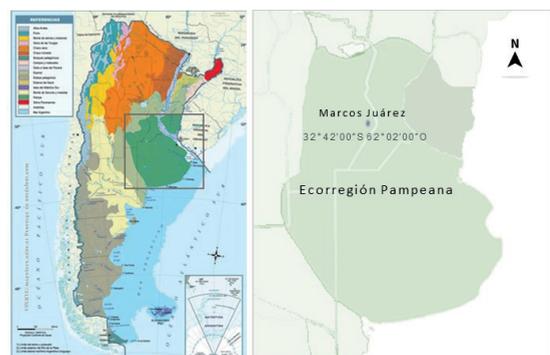


Figura 1. Ecorregión pampeana en Argentina y ubicación del área de estudio (localidad de Marcos Juárez, provincia de Córdoba).

El modelo AquaCrop, requiere de datos de entrada para cuatro módulos: el de clima (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, vientos, radiación o brillo solar y humedad); el de cultivo requiere datos de fenología, raíces, índice de cosecha, fecha de siembra, densidad de siembra y desarrollo de follaje; el de manejo necesita información sobre irrigación y parámetros de campo, al respecto se planteó un escenario sin riego ni malezas y sin limitantes de fertilidad. Por último, el de suelos que requiere información de variables hidrofísicas en varios horizontes (textura, estructura y profundidad de la napa freática). En este módulo se especificó la profundidad del nivel freático en los momentos del registro realizados en freatómetros ubicados en cercanía a las parcelas de corte de la Red de INTA.

La información meteorológica utilizada en el modelo fue proporcionada por SIGA- Sistema de Información y Gestión Agrometeorológico- de INTA (años 2000 al 2018). Los datos de la acumulación de biomasa aérea, en cada momento de corte de pasturas de alfalfa, se obtuvo de la Red de Evaluación de cultivares de alfalfa de INTA (INTA, período 2000/2017), en aquellos grupos sin latencia estival (GL 8 a 10), para el primer o segundo año de producción. Se trabajó con 60 cortes de alfalfa, divididos por su estación de crecimiento (30 en otoño-invierno (O-I) y 30 en primavera-verano (P-V)), y a su vez en distintas condiciones hídricas: normales, secas o húmedas (10 cortes para cada condición de cada estación de crecimiento). Para considerar la condición hídrica, se relacionó las precipitaciones que ocurrieron en cada período de corte con los registros promedios históricos diarios. Cuando el valor de la precipitación era superior o inferior en un 25% respecto de los históricos, para ese período de acumulación de la MS, se consideró condición húmeda o seca, respectivamente y a los casos restantes normales.

Los parámetros de entrada en el módulo cultivo fueron determinados por Martín (2021): cobertura máxima del follaje (85%), duración del período entre cortes en tiempo térmico acumulado (grados día acumulados), parámetros de densidad de plantas (250 y 150 plantas m², en los cortes del primer y segundo ciclo de producción, respectivamente), índice de cosecha (75%), temperaturas umbrales (temperatura base: 2,5°C en O-I y 5°C en P-V), profundidad máxima de raíces 3,5 m. En primera instancia se calculó la biomasa estimada (Bs) considerando la profundidad de la napa freática (NF) y se los comparó con la biomasa observada en los cortes realizados en las parcelas de ensayo de la RED (Bo) incorporando todos los datos sin discriminarlos por su estacionalidad ni

condición hídrica. Luego, se modelaron los cortes caracterizados por períodos de acumulación del crecimiento (P-V y O-I), obteniendo Bs cuando se incluye en el modelo la profundidad de la NF y cuando se desactiva su inclusión.

Para analizar el grado de ajuste entre Bs y Bo, se consideraron el coeficiente de determinación (R²) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE).

Por último, para cada condición hídrica, se analizó la Bs con y sin NF en relación con Bo y el aporte de la NF cuando es incluida; y en particular, la relación de la condición hídrica y la inclusión de la NF en situaciones de napas someras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores medios anuales de la profundidad de la NF correspondiente a la localidad, para el período 2000-2017, se grafican en la Figura 2. Se observa que la NF presentó picos de ascensos y descensos de variada intensidad. La determinación de la tendencia lineal temporal pone en evidencia un ascenso persistente y significativo de la misma. Cisneros *et al.* (1999) reportó que el ascenso generalizado de las NF, en la localidad en estudio, condiciona la selección de las especies de cultivo que se adapten a esas situaciones. Posiblemente alfalfa no estaría ajena a tener diversas respuestas en el crecimiento en esas condiciones hídricas.

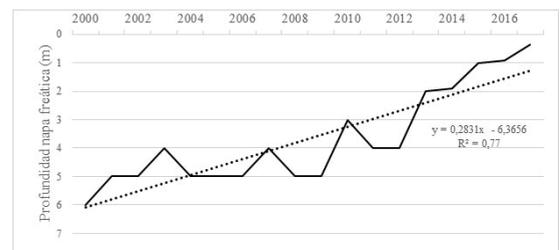


Figura 2. Evolución de la profundidad de la Napa Freática anual media en la localidad de Marcos Juárez, período 2000-2017 y su tendencia lineal (ecuación y R²).

En general, la diferencia entre valores estimados por el modelo para la predicción de la biomasa forrajera en cada corte, considerando la profundidad de la NF, tuvo un buen ajuste. El modelo AquaCrop explicó alrededor del 70% de la relación entre los valores de Bo y Bs (Figura 3), y un RMSE de 0,409 tn MS ha⁻¹. Estos valores fueron considerados como aceptables por otros autores en diversas validaciones del modelo, por ejemplo: en frijol (Olivera *et al.*, 2016); en soja (Morasi *et al.*, 2007); en papa (Montoya *et al.*, 2016); en cebada

(Araya *et al.*, 2010), en avena y raigrás (Terán Chaves, 2015), entre otros.

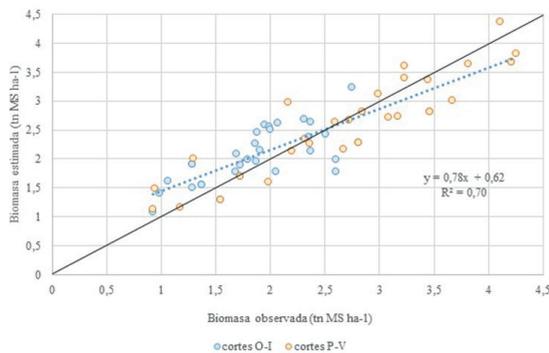


Figura 3. Relación entre valores de la biomasa observados en cada corte y la biomasa estimada a partir del Modelo AquaCrop (tn MS ha⁻¹), considerando la napa freática. Línea punteada la tendencia lineal y la línea entera la relación 1:1

Los valores medios de la Bs obtenidos considerando la NF, fueron menores en la estación otoño–invernal ($2,12 \pm 0,60$ tn MS ha⁻¹) que los estimados para P-V ($2,64 \pm 0,84$ tn MS ha⁻¹) (Tabla 1), en concordancia con las productividades medias observadas. Las diferencias de la producción se relacionan con sus respectivas tasas de crecimiento. En este aspecto, Brummer *et al.* (2000), encontraron períodos de alto crecimiento, principalmente a mediados de primavera–principios de verano y luego, descenso en el crecimiento a partir de mediados de verano, como respuesta a la disminución en la longitud del día. Sin embargo, en este estudio, se puede observar una mayor dispersión en los valores de la Bo de los cortes de P-V que en los de O-I, ya que en algunos cortes primavero-estivales se observan productividades del orden de las otoño-invernales (Figura 3). Teniendo en cuenta que en el período P-V no hay limitante en cuanto a la radiación, esta dispersión en las productividades podría estar relacionado con la condición hídrica de cada corte y con el aporte de la NF.

En O-I, los valores medios de Bs sin considerar la profundidad de la NF, fueron menores que

cuando se la incluye (Tabla 1), mientras que en P-V las estimaciones con o sin NF no presentan diferencias. Los coeficientes de determinación lineal sin NF no serían válidos para lograr buenas estimaciones de biomasa, especialmente en O-I. Esto muestra la importancia del aporte de la NF en el balance de agua en el suelo, para la estimación de la biomasa de alfalfa. En relación con los resultados de incluir la NF, se observó un RMSE medio de $0,41$ tn MS ha⁻¹, y un valor de $0,76$ tn MS ha⁻¹ cuando no se incluye la NF. Con el objetivo de abordar el tema desde una perspectiva distinta, en la Figura 4, se representan diagramas de dispersión para corroborar visualmente las relaciones observadas al sumar o no los aportes de la NF en el modelo. Se pueden identificar algunos

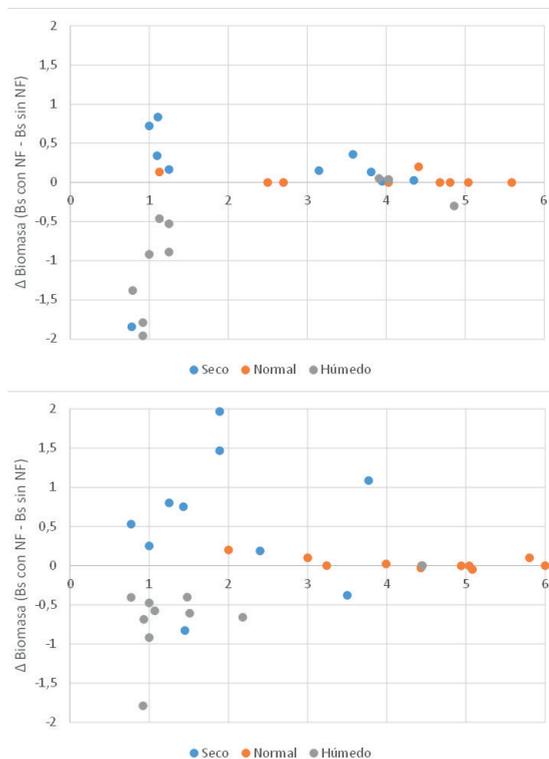


Figura 4. Diagrama de dispersión entre la diferencia de producción estimada con y sin napa freática (tn MS ha⁻¹) y la profundidad (NF, m). Superior: Otoño-Invierno; Inferior: Primavera-Verano.

Tabla 1. Relaciones estadísticas entre las biomásas observadas (Bo, tn MS ha⁻¹) y biomásas estimadas (Bs, tn MS ha⁻¹) considerando la napa freática (NF) y sin considerarla.

	Biomasa			Con NF		Sin NF	
	Bo	Bs con NF	Bs sin NF	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Período Otoño–Invierno	$1,92 \pm 0,64$	$2,12 \pm 0,60$	$2,30 \pm 0,71$	0,71	0,408	0,11	0,866
Período Primavera–Verano	$2,75 \pm 0,97$	$2,64 \pm 0,84$	$2,68 \pm 0,90$	0,83	0,407	0,56	0,658

patrones de comportamiento entre la variación de la biomasa estimada y la profundidad de NF, en los distintos períodos de crecimiento y condiciones hídricas.

En la Figura 4 se muestra que napas más cercanas a la superficie se relacionaron, en algunas oportunidades, con diferencias negativas entre estimaciones con y sin NF y en otras con diferencias positivas. En general, tanto en O-I como en P-V, la capacidad de transporte capilar de NF con profundidades mayores a los 2 m no provocan importantes cambios en la cantidad de materia seca acumulada en los cortes modelados. Los cortes con condiciones hídricas normales se observan en la zona de estabilización entre la Bs con NF y sin NF. En NF con profundidades menores a los 2 m, el comportamiento difiere según la condición hídrica de los cortes. Cuando las condiciones son húmedas tiende a disminuir la producción de biomasa cuando se incluye en el modelo la NF y en forma opuesta en condiciones secas. Esto indica que, para el cultivo de alfalfa, según el modelo, napas a menos de 2 m de la superficie podría estar condicionando la producción de biomasa forrajera, de acuerdo con la condición hídrica del corte. Resultados similares fueron encontrados por Jobbágy y Noretto (2009). Estos autores señalan que la banda óptima de utilización de la napa por cultivos de maíz y soja, en suelos sin impedimentos físicos, se considera que oscila entre 1,20 a 2,40 metros. Chiacchiera *et al.* (2016) expresa que la profundidad óptima de la NF para alfalfa en invernáculo es de 1 m, con una profundidad máxima de exploración radicular de 3 m. Dada la mayor variación entre Bs con y sin NF cuando la misma se encontraba a menos de 2 m de la superficie, se tomaron los cortes asociados a esta situación y se analizó el comportamiento del modelo en las condiciones húmedas y secas, comparando los resultados del mismo (Bs con y sin NF) con la Bo (Figura 5).

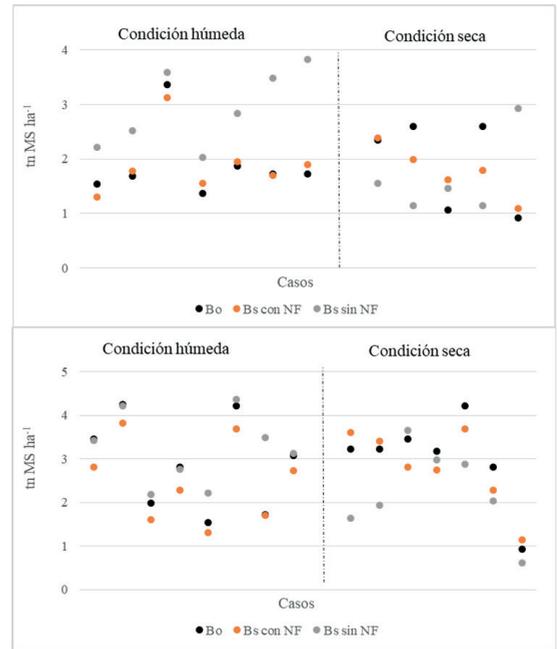


Figura 5. Diagrama de dispersión entre la diferencia de producción observada y estimada con y sin napa freática (tn MS ha⁻¹), en la profundidad de la NF de 0 a 2 m (NF, m), para las distintas condiciones climáticas. Superior: Otoño-Invierno; Inferior: Primavera-Verano.

En O-I, en condiciones húmedas, se observa un muy buen ajuste del modelo considerando la NF, y es destacable que la Bs sin NF es siempre superior. En condiciones secas, en líneas generales, considerar la NF genera un mejor ajuste de la Bo, y la Bs sin NF toma valores menores a la Bs con NF.

En P-V, de los 8 cortes en condiciones húmedas, sólo 3 de ellos ajusta mejor si el modelo considera la NF; mientras en condiciones secas introducir los niveles freáticos mejoran las estimaciones. Un aspecto particular se relaciona a la fluctuación del aporte por ascenso capilar que realiza la NF para cada situación hídrica y época de crecimiento

Tabla 2. Valores promedio y desvíos de: biomasa observada (Bo), biomasa estimada con y sin NF (según cálculos del modelo AquaCrop) y sus respectivos RMSE (tn MS ha⁻¹), la profundidad de napa freática (m) y sus aportes (mm), por estación de crecimiento y condición hídrica.

Período estacional	Condición climática	Biomasa observada (Bo)	Biomasa estimada (Bs) con NF	RMSE	Biomasa estimada (Bs) sin NF	RMSE	Profundidad NF (m)	Aporte NF (mm)
O-I	Seco	1,96±0,58	2,17±0,74	0,317	1,92±0,6	1,019	2,44±1,47	71,31±48,22
	Normal	1,9±0,56	2,27±0,54	0,425	2,29±0,5	0,455	3,82±1,37	14,44±29,46
	Húmedo	1,78±0,58	1,94±0,52	0,484	2,58±0,81	0,98	2,19±1,62	58,45±45,27
P-V	Seco	2,95±1,15	2,89±1,01	0,388	2,41±1,06	0,654	1,94±1,01	71±51,22
	Normal	2,49±0,73	2,51±0,5	0,415	2,47±0,53	0,383	4,36±1,15	2,97±2,79
	Húmedo	2,84±0,96	2,53±0,86	0,416	3,18±0,81	0,868	1,53±1,11	84,76±56,22

(Tabla 2). Se destacan los mm aportados por la NF en condiciones secas en O-I y en P-V. En condiciones normales el aporte de la NF es mínimo, mientras que en situaciones húmedas los aportes son significativos.

En Marcos Juárez, el ascenso de la NF constituyó, en general, una oportunidad para la producción de alfalfa. Para la condición seca, se observa, en general, que la NF actúa como una importante fuente de agua para la especie, en especial en O-I, y así mitigar los períodos de sequía. Cisneros *et al.* (1999), Dardanelli y Collino (2002) y Nosetto *et al.* (2009) demuestran que napas poco profundas representan una fuente adicional de agua en cultivos para la localidad, coincidente con lo encontrado para alfalfa (Figura 5). En términos medios en los períodos húmedos considerar el aporte de la NF arroja menores diferencias entre la Bo y la Bs con NF que sin incluirla (Tabla 2), especialmente en O-I. Sin embargo, es destacable que cuando la NF se encontraba a menos de 2 m de la superficie en el período O-I, Bs sin NF sobrestima considerablemente los valores de Bo, por lo que se infiere que la NF fue una limitante para el crecimiento de la alfalfa pudiendo ocasionar pérdidas por anoxia radicular (Figura 5). Al respecto, los trabajos realizados por Cisneros *et al.* (1999, 2011 y 2013) señalan que en esa región napas a menos de 1,5 m configura una situación de alto riesgo y baja productividad potencial del sitio.

En condiciones húmedas en P-V el modelo AquaCrop subestima la Bo al sumar los aportes de la NF, estas condiciones de gran aporte de agua ya sea por precipitaciones y/o por NF son leídas por el modelo como una limitante aumentando los porcentajes de estrés por cierre de estomas (Martín, 2021).

La estimación del modelo sin considerar la NF produjo RMSE que triplican, en condiciones seca, y duplican en situaciones húmedas, a los errores observados en Bs con NF (Tabla 2). Mientras que, en condiciones normales, se observa similitud en los ajustes. En términos generales, cuando la NF es considerada mejora los valores de la estimación. Resultados que señalan la importancia de poder controlar el nivel freático a través de prácticas que puedan minimizar el grado de saturación en el suelo o maximizar el consumo de agua según sucedan situaciones húmedas o secas en la especie.

El modelo permitió observar aportes elevados de agua por la presencia de la NF. Esa oferta se relacionaría con las propiedades hidráulicas de los suelos Argiudoles típicos de la localidad.

El agua almacenada en el suelo puede ser una fuente importante de abastecimiento, sumado a considerar los aportes de la NF, que en la zona se la describe como un mosaico de profundidades bastante complejo de unidades menores y se destaca su incidencia en los rendimientos de diferentes cultivos (Iriondo, 2010).

CONCLUSIONES

La incorporación en el modelo AquaCrop 6.1 de la profundidad del nivel freático y los aportes que realiza por ascenso capilar, permite comprender las respuestas de la producción de la biomasa de alfalfa a la dinámica freática en la localidad analizada.

La mejor estrategia que posee la especie para incrementar el uso del agua y la producción de forraje es la capacidad del sistema radical para utilizar el agua disponible en NF relativamente profundas. En consecuencia, la NF actuaría como una importante fuente de agua para alfalfa mitigando los períodos de sequía que podrían suscitarse.

En un escenario húmedo y napas freáticas a partir de hasta 2 m de profundidad, tienen un alto riesgo de anegamiento y como consecuencia, limita el crecimiento de la especie, especialmente en O-I. En las condiciones donde la napa se encuentra entre 0,5 y 2 m de profundidad, la ocurrencia de un escenario seco, mostró máximos incrementos en las producciones de biomasa del orden de una tonelada de materia seca en otoño-invierno, y de dos toneladas en primavera-verano, causado por la contribución que realizó la presencia de la NF.

BIBLIOGRAFÍA

- Araya, A.; S. Habtu, K.M. Hadgu, A. Kebede and T. Dejene, 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management* 97(11):1838–1846.
- Basigalup, D.H. y R. Rossanigo, 2007. Panorama actual de la alfalfa en Argentina. En Basigalup, D.H. (Ed.): *El cultivo de alfalfa en Argentina*. Buenos Aires. INTA, pp. 15–24.
- Brummer, E.C.; M. Shah and D. Luth, 2000. Reexamining the relationship between fall dormancy and winter hardiness in alfalfa. *Crop Sci.* 40:971–977.
- Chiacchiera, S.; N. Bertram, E. Taleisnik and E. Jobbágy, 2016. Effect of watertable depth and salinity on growth dynamics of Rhodes grass (*Chloris gayana*). *Crop and*

- Pasture Science 67(8):881–887.
- Cisneros, J.M.; J. Cantero and A. Cantero Gutiérrez, 1999. Vegetation, soil hydrophysical properties, and grazing relationships in Saline sodic soils of Central Argentina. *Canadian Journal of Soil Science* 79(3):399–409.
- Cisneros, J.M.; A. Degioanni, A. Cantero y H. Videla Mensague, 2011. Modelos de comportamiento de la napa freática en ambientes afectados por sales. En: Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC 2011. San Miguel de Tucumán, Argentina, 81 pp.
- Cisneros, J.M.; J.M. Scilingo, O. Giayetto, F. Morla y E.E. Jobbágy, 2013. Uso del modelo de simulación Aquacrop FAO para estimar el aporte subterráneo de agua al cultivo de soja. En Actas XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan. <https://www.researchgate.net/publication/284029051> (consultada: 12/05/2022).
- Dardanelli, J.L. and D.J. Collino, 2002. Water table contribution to alfalfa water use in different environments of the Argentine Pampas. *Agriscientia* 19:11–18.
- Hernández, N.; F. Soto y A. Caballero, 2009. Modelos de simulación de cultivos. *Cultivos Tropicales* 2009 30(1):73–82.
- Iriondo, M., 2010. Geología del Cuaternario en Argentina. *Moglia, Corrientes*, 437 pp. http://www.museoameghino.gob.ar/archivos/repositorios/138_descarga_95_version_digital_del_libro_geologia_del_cuaternario_en_argentina.pdf (consultada: 5/06/2020).
- Jobbágy, E.C. y M.D. Nosetto, 2009. Napas freáticas: pautas para comprender y manejar su impacto en la producción. En: XVII Congreso Aapresid. Rosario, 19 al 21 de agosto de 2009. http://gea.unsl.edu.ar/pdfs/Jobbágy_et_al_aapresid_2009.pdf (consultada: 9/07/2022)
- Martín, B., 2021. Estimación de la producción de forraje de *Medicago sativa* L. a partir de variables climáticas y edáficas y desarrollo de un índice de valoración forrajero, en la región pampeana argentina. Tesis Doctoral. Ingeniería Agronómica Univ. Nac. Rosario, Facultad de Ciencias Agrarias, UNR, 170 pp.
- Montoya, F.; D. Camargo, J.F. Ortega, J.I. Córcoles and A. Domínguez, 2016. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management* 164 Part 2:267–280.
- Morasi, D.N.; J.G. Arnold, M.W.V. Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith, 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885–900.
- Nosetto, M.D.; E.D. Jobbágy, R.B. Jackson and G.A. Sznajder, 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113(2):138–148.
- Olivera, N.T.; O.B. Manrique, Y.G. Masjuan and A.M. Guerrero Alega, 2016. Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 25(3):23–30.
- Raes, D.; P. Steduto, T.C. Hsiao and E. Fereres, 2017. AquaCrop version 6.0 reference manual. Rome: FAO, 2017. <https://www.fao.org/documents/card/es/c/BR267E/> (Consultada el 21/02/2020).
- Steduto, P.; T.C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres, 2009. AquaCrop–The FAO Crop model to simulate Yield response to Water: I. Concepts and Underlying principles. *Agronomy Journal* 101(3):426–437.
- Terán Chaves, C.A., 2015. Determinación de la huella hídrica y modelación de la producción de biomasa de cultivos forrajeros a partir del agua en la Sabana de Bogotá (Colombia). Tesis Doctoral. Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España, 297 pp. <http://hdl.handle.net/10251/54133> (consultada: 24/04/2021).