



Unidad de Posgrados y Educación Permanente



FACULTAD DE
AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Riego deficitario en maíz y soja: estrategias para el dimensionamiento de equipos de riego para mejorar la productividad del agua en condiciones de clima templado

Raquel Mayumi Hayashi Tsumura

Doctorado en Ciencias Agrarias
Ciencias del Suelo

Septiembre 2022

Riego deficitario en maíz y soja: estrategias
para el dimensionamiento de equipos de
riego para mejorar la productividad del agua
en condiciones de clima templado

Raquel Mayumi Hayashi Tsumura

Doctorado en Ciencias Agrarias
Ciencias del Suelo

Septiembre 2022

Tesis aprobada por el tribunal integrado por el Dr. Ing. Agr. Luis Giménez, la Dra. Margarita García Vila y el Ing. Agr. (PhD) Álvaro Roel, el 22 de septiembre de 2022.

Autora: Raquel Mayumi Hayashi Tsumura.

Director: Ing. Agr. (PhD) Santiago Dogliotti Moro

AGRADECIMIENTOS

A mi esposo, a mis hijos, a los que ya no están, pero siguen presentes en mi memoria; quienes me apoyaron en los buenos y malos momentos y no dejaron de alentarme para finalizar esta etapa de mi formación académica.

A mis compañeros y amigos de la Unidad de Hidrología, con quienes hace muchos años convivo el día a día y con los cuales nos conocemos las mañan de cada uno, pero, sobre todo, con quienes sé que siempre puedo contar.

A mi director de tesis, Santiago Dogliotti, con quien siempre pude contar con sus aportes y recomendaciones en la escritura de los artículos, a pesar de su agenda complicada.

Al personal docente y no docente del Centro Regional Sur, quienes en todo tiempo me ayudaron en la implementación de los ensayos de campo.

A Martin Aguerre y Gerardo Camio, por la ayuda que me brindaron durante el trabajo de campo.

A Mario García Petillo, un gran amigo y guía académico, que nos dejó físicamente cuando iniciaba mi doctorado, pero siempre estará presente en mi memoria.

A la ANII por el financiamiento del Proyecto

A la CAP por la Beca otorgada.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN	X
SUMMARY	XI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. CAMBIO CLIMÁTICO, AGUA Y AGRICULTURA.....	1
1.2. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO: SITUACIÓN DEL URUGUAY	4
1.3. SITUACIÓN DE LOS CULTIVOS DE VERANO EN URUGUAY.....	6
1.4. LIMITANTES PARA LA ADOPCIÓN DEL RIEGO EN URUGUAY	8
1.5. ALTERNATIVAS DE RIEGO EN URUGUAY	9
1.6. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE RIEGO	10
1.7. MANEJO RACIONAL DEL RIEGO.....	13
1.7.1. <u>Maximizar la producción por unidad de agua aplicada</u>	14
1.7.2. <u>Maximizar la producción por unidad de área</u>	14
1.7.3. <u>Maximizar ingresos económicos</u>	15
1.8. ESTRATEGIAS DE MANEJO DEL RIEGO QUE AFECTAN EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS	15
1.9. RIEGO EN MAÍZ Y SOJA: RELACIONES HÍDRICAS	16
1.9.1. <u>Demanda hídrica de maíz y soja</u>	16
1.10. MANEJO DEL RIEGO MEDIANTE BALANCE HÍDRICO	19
1.10.1. <u>Evapotranspiración del cultivo</u>	19
1.10.2. <u>Coeficientes de estrés hídrico</u>	21
1.10.3. <u>Profundidad de las raíces</u>	22

1.11. EFICIENCIA DE USO DEL AGUA.....	23
1.11.1. <u>Definiciones de eficiencia de uso del agua</u>	23
1.11.2. <u>Productividad del agua (PA)</u>	24
1.11.3. <u>Productividad del agua en maíz y soja</u>	25
1.12. USO DE MODELOS EN LA AGRICULTURA.....	26
1.12.1. <u>Definiciones, tipos de modelos y utilidades</u>	26
1.12.2. <u>AquaCrop: modelo de respuesta de los cultivos al agua</u>	27
1.13. INGRESOS GENERADOS POR LA INCORPORACIÓN DEL RIEGO	28
1.13.1. <u>Aspectos a tener en cuenta en el análisis ingresos</u>	28
1.14. HIPÓTESIS DE TRABAJO	30
1.15. OBJETIVOS	30
1.16. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	31
2. <u>WATER PRODUCTIVITY IN MAIZE, AT DIFFERENT LEVELS OF DEFICIT</u>	
<u>IRRIGATION IN HUMID CLIMATE</u>	32
2.1. Abstract.....	33
2.2. Resumen	33
2.3. Resumen	33
2.4. INTRODUCTION.....	34
2.5. MATERIAL AND METHODS	35
2.5.1. <u>Experimental site</u>	35
2.5.2. <u>Experimental design</u>	35
2.5.3. <u>Crop management</u>	35
2.5.4. <u>Water balance (WB)</u>	35
2.5.5. <u>Crop development</u>	36
2.5.6. <u>Yield</u>	36
2.5.7. Performance Indicators. Crop water use efficiency.....	37

2.5.8. <u>Statistical analysis</u>	37
2.5.9. <u>Transparency of data</u>	37
2.6. RESULTS.....	37
2.6.1. <u>Climatic characterization</u>	37
2.6.2. <u>Grain yield</u>	37
2.6.3. <u>Biomass production and harvest index</u>	38
2.6.4. <u>Water balance</u>	38
2.6.4.1. Adjusted evapotranspiration of the crop.....	38
2.6.4.2. Applied irrigation and effective precipitation.....	39
2.6.4.3. Soil moisture evolution	40
2.6.5. <u>Indicators of water use efficiency</u>	40
2.7. DISCUSSION	41
2.8. CONCLUSIONS	44
2.9. ACKNOWLEDGMENTS	44
2.10. AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT	45
2.11. REFERENCES.....	45
3. <u>DEFICIT IRRIGATION IN SOYBEANS, THE EFFECT ON GRAIN YIELD AND WATER PRODUCTIVITY IN TEMPERATE CLIMATES</u>	47
3.1. Abstract.....	48
3.2. Resúmen	48
3.3. Resúmo	48
3.4. INTRODUCTION.....	49
3.5. MATERIAL AND METHODS.....	50
3.5.1. <u>Experimental site</u>	50
3.5.2. <u>Experimental design</u>	50
3.5.3. <u>Crop management</u>	50

3.5.4. <u>Irrigation management</u>	51
3.5.5. <u>Measurements</u>	52
3.5.5.1 Soil moisture	52
3.5.5.2. Crop development.....	52
3.5.5.3. Yield.....	52
3.5.6. <u>Productivity indicators of water use by crops</u>	52
3.5.7. <u>Statistical analysis</u>	52
3.5.8. <u>Transparency of data</u>	53
3.6. RESULTS.....	53
3.6.1. <u>Climatic characterization</u>	53
3.6.2. <u>Grain Yield, production of aboveground biomass and harvest Index</u>	54
3.6.3. <u>Water balance</u>	55
3.6.4. <u>Relationships between yield, irrigation and ET. Water productivity indicators</u>	57
3.7. DISCUSSION	58
3.8. CONCLUSIONS.....	60
3.9. ACKNOWLEDGMENTS	60
3.10. AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT	60
3.11. REFERENCES.....	60
4. <u>AJUSTE DEL MODELO AQUACROP EN MAÍZ CON DIFERENTES NIVELES DE RIEGO EN CONDICIONES DE CLIMA TEMPLADO</u>	65
4.1. RESUMEN	65
4.2. SUMMARY.....	65
4.3. INTRODUCCIÓN	66
4.4. MATERIALES Y MÉTODOS	68
4.4.1. <u>Experimentos de campo</u>	68

4.4.2. <u>Diseño experimental</u>	69
4.4.3. <u>Manejo del cultivo</u>	69
4.4.4. <u>Colecta de datos y medidas realizadas</u>	70
4.4.4.1. Datos meteorológicos	70
4.4.4.2. Medidas en el cultivo	70
4.4.4.3. Evolución del contenido de humedad en el suelo	71
4.4.5. <u>Ajuste y validación del modelo AquaCrop</u>	71
4.4.5.1. Ajuste del modelo	71
4.4.5.2. Otras consideraciones	72
4.4.5.3. Procedimiento para el ajuste del modelo	72
4.4.5.4. Evaluación estadística del ajuste del modelo	73
4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	75
4.5.1. <u>Ajuste del modelo AquaCrop</u>	75
4.5.2. <u>Evaluación del ajuste del modelo: calibración y validación</u>	79
4.5.2.1. Rendimiento en grano y producción de biomasa aérea	79
4.5.2.2. Contenido de agua del suelo	83
4.6. CONCLUSIONES	88
4.7. BIBLIOGRAFÍA	88
5. <u>USO DEL MODELO AQUACROP EN MAÍZ PARA EVALUAR ESTRATEGIAS DE RIEGO EN CLIMA TEMPLADO</u>	92
5.1. RESUMEN	92
5.2. INTRODUCCIÓN	92
5.3. MATERIALES Y MÉTODOS	94
5.3.1. <u>Suelos</u>	94
5.3.2. <u>Estrategias de riego evaluadas</u>	96
5.3.3. <u>Estimación de la demanda energética</u>	97

5.3.4. <u>Análisis de márgenes de ingreso por efecto del riego</u>	98
5.3.4.1. Limitaciones del análisis de márgenes de ingreso	100
5.3.5. <u>Análisis de los datos</u>	101
5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	101
5.4.1. <u>Paysandú</u>	101
5.4.2. <u>Colonia</u>	105
5.4.3. <u>Análisis de ingresos</u>	110
5.5. CONCLUSIONES	115
5.7. BIBLIOGRAFÍA	116
6. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL</u>	119
6.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS Y DEMANDA HÍDRICA DE LOS CULTIVOS	119
6.2. RENDIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA	121
6.3. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO	123
6.4. MODELACIÓN DE LOS DATOS.....	124
6.4.1. <u>Calibración y validación del modelo AquaCrop para el cultivo de maíz</u> ...	124
6.4.2. <u>Evaluación de estrategias de riego</u>	125
6.5. ¿CÓMO SE ESTÁ MANEJANDO EL RIEGO EN EL SECTOR PRODUCTIVO DEL URUGUAY?	130
6.6. ANÁLISIS DE LOS MÁRGENES DE INGRESOS	132
7. <u>CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES</u>	133
8. <u>BIBLIOGRAFÍA GENERAL</u>	136
9. <u>ANEXOS</u>	142

RESUMEN

En regiones de clima templado y húmedo como Uruguay, el riego suplementario estabiliza y aumenta los rendimientos de los cultivos. El riego a demanda utiliza mayor cantidad de agua, afectando la sostenibilidad de los sistemas de producción por el uso ineficiente de los recursos. Para determinar estrategias de riego más sostenibles en lo ambiental y económico, se evaluaron a campo tres láminas máximas de reposición, (T2) 3 mm d⁻¹, (T3) 6 mm d⁻¹, (T4) 9 mm d⁻¹ y (T1) testigo sin riego, sobre la producción de maíz y soja. En ambos cultivos, se observaron diferencias en rendimiento a los diferentes niveles de riego deficitario. Cuando las precipitaciones (PP) fueron superiores al promedio, su mala distribución temporal generó déficit hídrico en momentos puntuales, afectando el rendimiento. El T1 y T2 no cubrieron la evapotranspiración del cultivo (ET_c) durante el período crítico y llenado de grano, causando menores rendimientos. El T3 y T4 dieron rendimientos mayores y en el promedio de tres años fueron diferentes significativamente. El T3 no siempre cubrió la ET_c, pero la reserva del suelo y las PP contribuyeron para cubrirlo, ahorrando agua de riego. El modelo AquaCrop se calibró para maíz y se evaluaron diferentes estrategias de riego. El modelo calibrado simuló bien rendimiento, biomasa y humedad del suelo en los tratamientos regados. En el T1, el modelo subestimó el rendimiento. El suelo del ensayo permitía una mayor exploración radical y, con 0,90 m profundidad, el modelo simuló bien el rendimiento del T1. El modelo predice el rendimiento con buen ajuste en diferentes situaciones de riego y PP si se ajustan los coeficientes de estrés y el cultivo es parametrizado en forma adecuada. Finalmente, se evaluaron con AquaCrop, el T1, tres láminas máximas de riego (3, 6 y 8 mm netos) y tres manejos de esas láminas de riego en maíz (agotar 10 mm, agotar 50 % del agua fácilmente disponible (AFD) y agotar 100 % del AFD). Se analizaron las variables productivas, las necesidades de riego, la demanda energética y un análisis de ingresos parciales considerando un cultivo de maíz regado por pivó central. Se concluye que 5 mm netos da rendimientos e ingresos similares a 8 mm netos, sin considerar costos de inversión. En cuanto al manejo, agotar el 100 % del AFD logra mayor productividad del agua, pero resulta riesgosa en años secos; sin embargo, es factible variar la estrategia en función de las perspectivas climáticas de cada año.

Palabras clave: riego deficitario, AquaCrop, sostenibilidad riego

Maize and soybean deficit irrigation: strategies for dimension irrigation equipment to improve water productivity in temperate climate conditions

SUMMARY

In regions with temperate and humid climate such as Uruguay, supplementary irrigation stabilizes and increases crop yields. Irrigation on demand generates higher water consumption, which affects production systems' sustainability due to inefficient use of resources. In order to determine environmentally and economically more sustainable irrigation strategies, three maximum irrigation depths were evaluated in field experiments, (T2) 3 mm d-1, (T3) 6 mm d-1, (T4) 9 mm d-1 and (T1) control without irrigation, on corn and soybean production. Performance differences were observed in both crops at different water deficit levels. When precipitation (PP) was higher than average, its poor temporary distribution generated water deficit at specific times, affecting yield. T1 and T2 did not cover the crop evapotranspiration (ET_c) during the critical period and grain filling, which lowered yields. T3 and T4 gave higher yields and in the three years average they were significantly different. T3 did not always cover the ET_c, but the soil reserve and PP contributed to cover it, saving irrigation water. The AquaCrop model was calibrated for maize and different irrigation strategies were evaluated. The calibrated model simulated well yield, biomass and soil moisture in the irrigated treatments. In T1, the model underestimated the yield. The soil allowed for further root exploration. At 0.90 m depth, the model simulated well the yield in T1. The model predicts the yield with a good adjustment at different irrigation and PP situations if the stress coefficients are adjusted and the crop is properly parameterized. Finally, T1, three maximum irrigation depths (3, 6 and 8 mm net) and three irrigation management (depleting 10 mm, depleting 50 % of readily available water (RAW) and depleting 100 % of RAW) were evaluated in maize with AquaCrop. The productive variables, irrigation requirement, energy demand and partial income analysis were analyzed, considering a maize crop irrigated by central pivot. It is concluded that 5 mm net gives returns and income similar to 8 mm net, without considering investment costs. Regarding management, depleting 100 % of the RAW has higher water productivity, but it is risky in dry years; however, it is feasible to vary the strategy depending on the climatic perspectives of each year.

Keywords: deficit irrigation, AquaCrop, irrigation sustainability

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CAMBIO CLIMÁTICO, AGUA Y AGRICULTURA

En casi todas las regiones del mundo, la demanda de agua es cada vez mayor debido a un aumento de la población, lo que resulta en un incremento en la demanda de productos agrícolas e industriales, además de competir por otros usos (recreación, producción de energía, etc.). El crecimiento económico de los países en desarrollo a menudo conduce a un aumento en la demanda de agua, primero por su uso directo para consumo y, en segundo lugar, porque se produce un cambio en la dieta junto con el desarrollo económico, un cambio desde una dieta principalmente a base de vegetales hacia otra en la que hay una mayor proporción de carne. La producción de un kilogramo de carne requiere mayor cantidad de agua que la de uno de verdura (WM, 2015).

Se espera que el cambio climático intensifique el estrés actualmente padecido por los recursos hídricos, debido al crecimiento de la población, al cambio económico y de los usos de la tierra y, en particular, a la urbanización (IPCC, 2014).

Las investigaciones parecen indicar que aumentarán apreciablemente las precipitaciones intensas en numerosas regiones, en algunas de las cuales disminuirán los valores medios de precipitación (IPCC, 2014).

Uruguay se encuentra en una zona donde los modelos climáticos predicen de aquí a mediados de siglo, con un grado de confianza alto, un aumento de los escurrimientos (más de 30 %), indicando que estos cambios están asociados a variaciones en las precipitaciones y en la temperatura del aire (Cabré et al., 2016, Naciones Unidas, 2010, IPCC, 2014).

Según la FAO (2021), Uruguay se encuentra en una zona donde el nivel de estrés hídrico a nivel de cuenca en todos los sectores es de muy bajo a nulo; sin embargo, indican que la agricultura regada explica del 50 al 75 % del uso del agua extraída, siendo la principal actividad económica en la extracción de agua dulce (figuras 1 y 2).

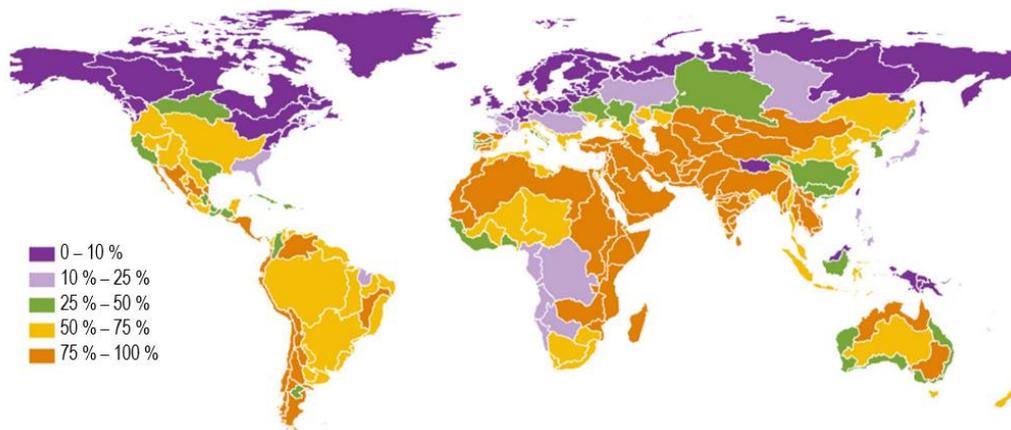


Figura 1: porcentaje del agua fresca extraída que es destinada a la agricultura, 2018 (FAO, 2021)

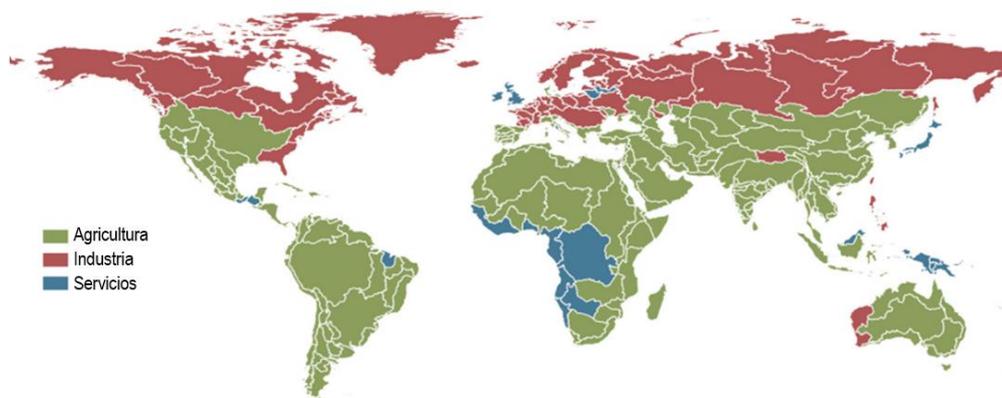


Figura 2: mapa global del sector económico dominante en la extracción de agua dulce por cuenca fluvial principal, 2018 (FAO, 2021)

La agricultura es el sector que utiliza mayor cantidad de agua a nivel mundial: el 72 % del agua extraída de corrientes superficiales o fuentes renovables se utiliza con fines agrícolas, el 16 % lo requieren las ciudades para los hogares y los servicios, y el 12 %, las industrias. En los países en desarrollo, el porcentaje destinado a la agricultura aumenta, ya que sus políticas de agua se centran en la expansión de las tierras de bajo riego, así como en la intensificación de la producción agrícola. La competencia por el agua está forzando al riego a operar bajo condiciones de escasez de ese recurso (FAO, 2021).

En Uruguay, la ocurrencia de eventos de déficit de precipitación acumulado máximo durante la primavera y el verano no muestra tendencias significativas generalizadas, aunque en la mayoría de las estaciones meteorológicas la tendencia es al déficit

decreciente. Esto no es incompatible, sin embargo, con la existencia de eventos de déficit históricamente muy altos (asociados a secas extremas) en años recientes. En el año 2015, el déficit hídrico impactó muy especialmente sobre el sector agropecuario, lo que conllevó importantes pérdidas económicas (MVOTMA-SNRCC, 2016).

Por otra parte, en Uruguay, la disponibilidad de agua de riego no presenta grandes limitaciones (FAO-AQUASTAT, 2022); sin embargo, el riego es utilizado en un bajo porcentaje de la superficie sembrada de cultivos de verano (3 %). Uno de los principales argumentos que impiden una mayor adopción del riego, particularmente en el maíz, son los altos costos energéticos (Bachino, 2012).

Deben promoverse prácticas de manejo del riego adecuadas para mejorar la productividad y eficiencia de los sistemas de producción agrícola mediante la reducción de los insumos, manteniendo rendimientos similares o mejorados. Dentro de este contexto, el riego limitado o deficitario se ha propuesto como una estrategia valiosa para las regiones áridas y semiáridas, donde el agua es uno de los factores más limitantes en la producción de cultivos. Además de mejorar las prácticas de gestión del agua para el riego total del cultivo, las prácticas de gestión del riego deficitario se han desarrollado y necesitan ser mejoradas e implementadas a nivel predial para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y para mejorar la productividad de la agricultura de riego (Djaman et al., 2013).

En cultivos de campo, un adecuado régimen de riego deficitario puede optimizar la productividad del agua cuando no es posible el riego cumpliendo con las necesidades hídricas totales a demanda. En muchos casos, el riego deficitario no solo mostró mejoras en la productividad del uso de agua, sino también en el ingreso neto de los productores (Ferreris y Soriano, 2007). Si bien el riego deficitario puede ser usado como medida táctica para reducir el agua de riego cuando esta es limitada por alguna sequía u otro factor, no está claro si se puede usar este tipo de manejo del riego durante períodos de tiempo prolongados.

Bernardo et al. (2005) y Hoffman et al. (2007) indican que la agricultura bajo riego deberá adoptar un paradigma de gestión que se base en maximizar los beneficios netos en lugar de maximizar los rendimientos. El manejo del riego para maximizar los beneficios será más complejo y desafiante que la práctica convencional de maximizar el rendimiento

de los cultivos por unidad de tierra. La mayor complejidad del análisis requerirá herramientas analíticas más sofisticadas.

Hoffman et al. (2007) indican que la agricultura bajo riego no es, de hecho, económica o ambientalmente sostenible a largo plazo utilizando las tecnologías y políticas existentes. A pesar de los problemas actuales y las percepciones negativas en muchos sectores de la sociedad, es seguro que el riego seguirá siendo un componente necesario e importante del bienestar y el crecimiento del mundo. El riego sustenta nuestra sociedad proporcionando al menos el 40 % de nuestro suministro total de alimentos y fibra.

El desafío en los últimos años ha sido desarrollar el riego como una actividad sostenible, tanto ambiental como económicamente. La sostenibilidad del riego depende de la capacidad de la sociedad para utilizar esta tecnología logrando beneficios importantes, pero con consecuencias sociales, ambientales y económicas menos problemáticas. La sociedad necesita mejorar la productividad agrícola, cambiar las estructuras institucionales, modificar las políticas de agua y reformar los sistemas de distribución, y en la producción, cambiar la gestión de suelos degradados, buscar alternativas de reutilización del agua, optimizar la gestión del agua de los cultivos y abordar el aumento de los precios de la energía (Hoffman et al., 2007).

1.2. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO: SITUACIÓN DEL URUGUAY

El desarrollo del riego es una de las políticas más destacadas de los últimos años para el sector agropecuario en Uruguay. Se entiende que el fomento y la extensión del riego permitirán aumentar la producción y la competitividad del sector, fortalecer la adaptación al cambio climático y contribuir al desarrollo productivo nacional. Esto se fundamenta en la vulnerabilidad de los sistemas productivos frente al déficit hídrico y en la restricción que esta impone al logro de mayor producción, calidad y estabilidad (MGAP-SNRCC, 2019).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son la columna vertebral del trabajo de las Naciones Unidas en Uruguay. El objetivo es cumplir con las metas delineadas en la agenda 2030 y pautadas en los ODS respectivos. Respecto a estos, el ODS 2 indica: «Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible». El estado de situación de Uruguay frente a este objetivo indica que respecto a la sostenibilidad de la producción agropecuaria hubo un incremento en el área destinada a cultivos de secano (se multiplicó por cuatro en los últimos diez años), la

producción de bovinos de carne alcanzó el máximo de tres millones de terneros y la producción arrocerá exhibe, en los últimos años, uno de los mayores rendimientos a nivel mundial. Además, existen mejoras en el marco normativo destinadas a garantizar la sostenibilidad ambiental; algunas de ellas son las que pretenden mejorar la adaptación al cambio climático y la productividad (por ejemplo, buscando reducir las emisiones contaminantes por unidad de producto), así como las políticas de cuidado de los suelos (planes de uso y manejo) y aquellas diferenciadas para la incorporación de productores familiares en las cadenas de valor (Presidencia de la República Oriental del Uruguay-OPP, 2021).

Con base en estos conceptos y lineamientos, el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) ejecutó entre el año 2012 al 2020 un proyecto, financiado por el Banco Mundial (préstamo 8099-UY), de Desarrollo y Adaptación al Cambio Climático (DACC-MGAP). El objetivo general del proyecto fue apoyar a los productores rurales para hacer un uso sostenible de los recursos naturales, generando una mayor adaptación a la variabilidad y al cambio climático, promoviendo una modernización de la gestión del MGAP en el área de información y servicios relacionados al clima y los recursos naturales. Las estrategias utilizadas fueron el enfoque integral del desarrollo predial con opciones de no retorno, la racionalización del acceso y la gestión del agua como base para el aumento de resiliencia, los apoyos diferenciados por tipo de productor según sus necesidades y capacidades, la construcción de capacidades y la modernización de servicios públicos en articulación con el sector privado y al servicio de este. Este proyecto estuvo dentro de los lineamientos planteados para el cumplimiento de los ODS 2.

Incluyó, dentro de sus objetivos, la mitigación y/o adaptación a los efectos del cambio climático (CC) mediante la ejecución de subproyectos prediales integrales así como el aumento y/o estabilidad de producción, ingresos y desarrollo sustentable de estos, y: «Mejorar la gestión de los Recursos Naturales en base a nueva cartografía de suelos, implementación de planes de uso y manejo de suelos, agua y campo natural» (DACC-MGAP, 2012).

El programa «Más Agua para el Desarrollo Rural» es otra herramienta, del año 2018, que brinda apoyo financiero no reembolsable a organizaciones rurales y a productores familiares y no familiares (pequeños/as y medianos/as) en la implementación de proyectos productivos focalizados en el suministro y aprovechamiento de agua en busca de

aumentar la producción y mejorar la calidad del agua y la capacidad de los/as productores para enfrentar contingencias climáticas (Presidencia de la República Oriental del Uruguay-OPP, 2021).

Para el sector productivo, además de este proyecto, se desarrollaron otras herramientas como los préstamos financieros y se creó en 2007 la Ley de Promoción de Inversiones (Ley N.° 16.906), que benefician a los productores que invierten en mejoras de la producción, incluyendo la incorporación de equipamiento para riego.

En definitiva, existen muchas herramientas que facilitan la adopción del riego en el Uruguay; sin embargo, la superficie regada sigue siendo muy baja.

1.3. SITUACIÓN DE LOS CULTIVOS DE VERANO EN URUGUAY

En Uruguay, los cultivos de verano más importantes son la soja y el maíz, con aproximadamente 908 mil y 143 mil ha sembradas y rendimientos promedios de 1.881 y 5.396 kg ha⁻¹, respectivamente (zafra 2020/2021) (DIEA-MGAP, 2021) —estos promedios incluyen cultivos en secano y con riego—. En la zafra 2020/21, la superficie regada fue de 19 mil y 13 mil ha, representando el 14 y el 1,4 % del área total sembrada en esta zafra de maíz y soja, respectivamente.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de la zona de agricultura extensiva en Uruguay, obtenido del Censo General Agropecuario del año 2011, realizado por la DIEA-MGAP y presentado en el trabajo de Regiones Agropecuarias del Uruguay (MGAP, 2015). Este muestra la concentración de la producción cerealera en el litoral oeste del país.

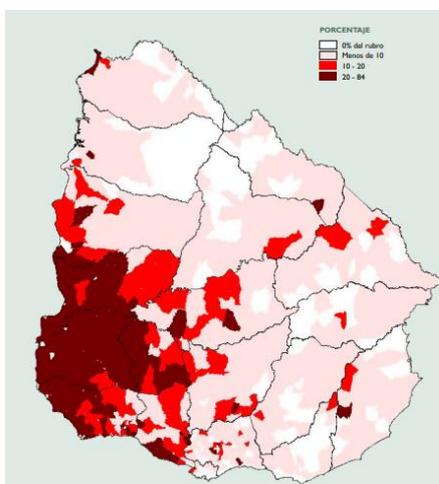


Figura 3: superficie destinada a la agricultura extensiva de cultivos cerealeros e industriales en el año 2011

En las condiciones agroecológicas de Uruguay, en los cultivos de verano existe una gran brecha entre los rendimientos promedio obtenidos en condiciones de secano respecto a los logrados con riego (Sawchick y Formoso, 2000, Cardellino y Baetghen, 2000) y, adicionalmente, se observa una variabilidad significativamente mayor entre años en los rendimientos de cultivos en secano, principalmente asociada a condiciones de disponibilidad hídrica en el suelo. Considerando las zafras 2015/16 al 2019/20, el efecto del riego produjo un incremento promedio del rendimiento en maíz del 50 % (94 % máximo, 22 % mínimo) (DIEA, OPYPA, 2020). En el caso de la soja, el incremento máximo se dio en la temporada 2017/18: 134 % más rendimiento que el secano.

La variabilidad de los rendimientos de estos cultivos está asociada a la variabilidad de las precipitaciones ocurridas durante las estación de crecimiento (DIEA, MGAP 2021) (figuras 4 y 5).

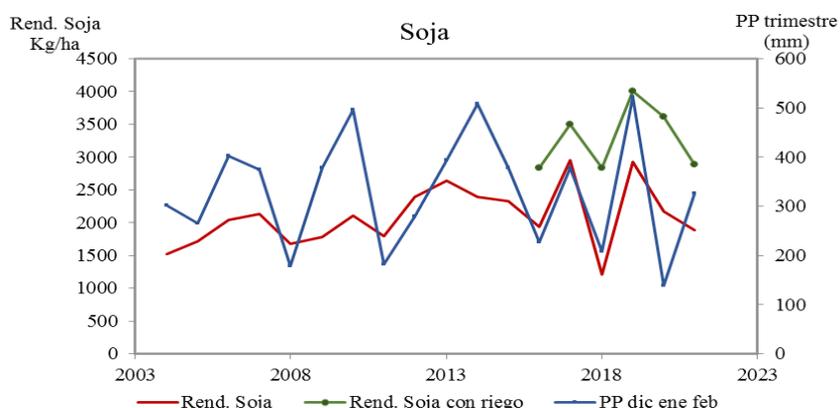


Figura 4: evolución del rendimiento promedio en soja y precipitaciones acumuladas en el trimestre de diciembre a febrero (DIEA, MGAP, 2021)

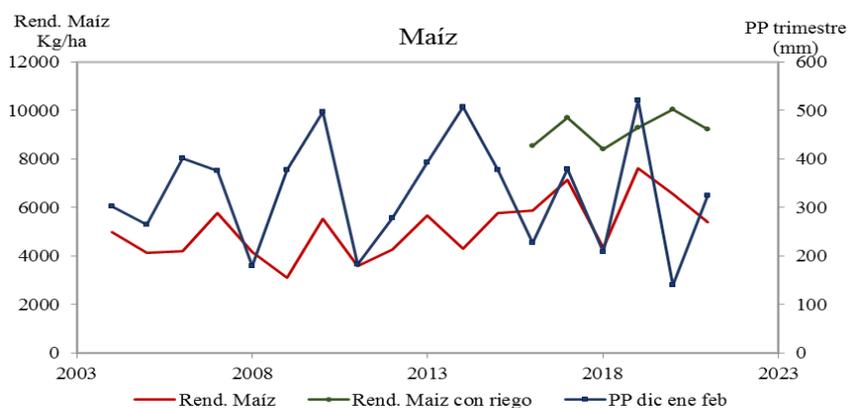


Figura 5: evolución del rendimiento promedio del maíz y precipitaciones acumuladas en el trimestre diciembre a febrero (DIEA, MGAP, 2021)

En Uruguay, el régimen de precipitaciones (PP) no permite un suministro de agua constante a los cultivos a lo largo de su ciclo de crecimiento (Corsi, 1994). Esto sumado a una baja capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD) de algunos suelos del Uruguay (Sawchik y Cereta, 2005), genera, habitualmente, condiciones de deficiencias hídricas durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos de soja y maíz que son limitantes para la obtención de rendimientos potenciales y estables (Giménez y García Petillo, 2011).

1.4. LIMITANTES PARA LA ADOPCIÓN DEL RIEGO EN URUGUAY

El régimen de precipitaciones, como se mencionó anteriormente, no permite el suministro continuo de agua a los cultivos durante su ciclo de crecimiento, ya sea de cultivos de verano o de invierno, aunque los volúmenes anuales de lluvias son suficientes para cubrir la demanda. Además, la topografía del país permite la construcción de presas de tierra que pueden almacenar suficiente agua para suplementar con riego lo que las precipitaciones no son capaces de cubrir de la demanda hídrica de los cultivos. Si bien pueden existir casos puntuales que limiten la construcción de embalses para riego, (por ejemplo, la cuenca del río Negro, limitada por la producción hidroeléctrica), en general, la capacidad de agua factible de ser embalsada está subutilizada. Teniendo en cuenta solo las aguas que escurren superficialmente, diversos autores han estimado que menos del 30 % son aprovechadas por el hombre en el Uruguay (incluyendo la generación eléctrica); el Grupo de Desarrollo del Riego estimó en 2009 que el volumen total que se aprovecha para riego representa menos del 5 % del escurrimiento que se produce en el territorio y se pierde en el océano Atlántico (OPYPA, 2012).

Sumado a lo anterior, la red hidrográfica es extensa, existiendo buena disponibilidad de recursos hídricos en calidad y cantidad (18.900 m³ per cápita). En Uruguay, en términos generales, el uso de los recursos hídricos satisface las necesidades de la población y el tema no es percibido como una restricción para mejorar el desarrollo productivo o la calidad de vida de sus habitantes, siendo prioritario el abastecimiento de agua potable. El uso del agua para agricultura, abastecimiento humano, generación de energía eléctrica, industrias y recreación, no ha generado gran número de conflictos. Sin embargo, se advierte que la demanda de agua es fuertemente creciente como resultado del desarrollo de la agricultura y la generación hidroeléctrica, lo cual, unido a una mayor demanda de

agua para abastecimiento de la población, puede ocasionar problemas por el uso y disposición de las aguas (NU-CEPAL, 2016).

Por tanto, otras son las causas que provocan la baja adopción del riego, a pesar de que es una de las medidas recomendadas para mitigar los efectos del cambio climático (IPCC, 2007, Presidencia de la República-OPP, 2021).

Según Cámara et al. (2019) en un estudio basado en encuestas a productores ganaderos regantes, una de las causas que limitan la adopción del riego es la alta inversión inicial. Estos mismos autores indican que las políticas públicas y los proyectos de riego del MGAP dirigidos a los productores para incorporar el riego en sus sistemas de producción, como el proyecto «Desarrollo y Adaptación al Cambio Climático» (DACC) y los Proyectos Asociativos Medianos fueron herramientas de promoción del riego poco conocidos y, por tanto, menos utilizados. Por otro lado, otras de las herramientas más conocidas y adoptadas fueron los incentivos por parte del Banco de la República Oriental del Uruguay (BROU), la Ley de Inversiones (Ley N.º 16906) y los descuentos del Impuesto al Valor Agregado (IVA) en materiales/obras de riego. De estas tres, la Ley de Inversiones, conjuntamente con los descuentos de IVA, fueron las herramientas más adoptadas por los productores encuestados.

En cuanto a los costos operativos del riego, uno de los principales es la energía necesaria para aplicarlo, que depende de la fuente energética utilizada (eléctrica o diésel). Uruguay posee diferentes tarifas de suministro eléctrico que permiten una relación costo-beneficio favorable al riego (Bachino, 2012).

En definitiva, existen diferentes formas de acceder a exoneraciones fiscales o descuentos económicos que permiten el acceso al riego (Bachino, 2012); sin embargo, la visión de los productores no es clara: además de indicar que la falta de conocimiento de la tecnología del riego es la principal limitante para su adopción, no perciben claramente los beneficios económicos del riego, si bien perciben los beneficios productivos, no lo pueden cuantificar económicamente (Cámara et al., 2019).

1.5. ALTERNATIVAS DE RIEGO EN URUGUAY

En Uruguay, la soja y el maíz, como se mencionó anteriormente, se realizan mayoritariamente en seco, pero las áreas regadas de estos cultivos se han incrementado significativamente en los últimos años (OPYPA, 2021). El sistema

predominante de riego y que explica la mayor parte de este crecimiento es el pívot central. Estas grandes máquinas móviles autopropulsadas realizan un riego de alta frecuencia, reponiendo diariamente la lámina de riego para la cual fueron diseñados. Las dosis de riego más frecuentes que pueden aplicar estos sistemas varían entre 5 mm y 30 mm por revolución (Pereira et al., 2010) dependiendo de la velocidad de avance y del tipo de emisor utilizado.

Según el análisis de encuestas de riego (INIA et al., 2017), el sistema de riego más utilizado es el de pívot central para soja, maíz y, eventualmente, pasturas. También se mencionan los métodos de riego por melga y cañón, pero en una baja proporción.

En lo referente al tamaño de los pivots centrales, del total de encuestados (151), el 45 % riega hasta 65 ha, el 24 %, entre 65 y 80 ha, el 23 %, entre 80 a 120 ha y el 12 %, más de 120 ha. Según Morales et al. (2022), no sería recomendable, en las condiciones de suelo y topografía del Uruguay, el uso de pivots de radios mayores a 512 m (aproximadamente, 80 ha), debido a que tienen mayores riesgos de generar problemas de escorrentía y erosión.

Definir el caudal de diseño de cualquier equipo de riego es clave para establecer la inversión inicial y los costos operativos del riego. Por tanto, debe definirse de la forma más precisa posible para evitar equipos sobredimensionados y caros o subdimensionados que no son capaces de cumplir con la demanda de riego del cultivo.

1.6. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE RIEGO

El diseño y la operación de los sistemas de riego se ven afectados tanto por el requerimiento máximo de agua de riego como por el requerimiento de riego por ciclo de cultivo. El requerimiento por ciclo de riego determina el tiempo de funcionamiento anual del sistema y los costos correspondientes de mano de obra, agua y energía. El requerimiento máximo de agua dicta la capacidad mínima de tuberías de suministro, bombas y canales para sostener el crecimiento potencial de los cultivos (Hoffman et al., 2007).

En regiones donde el riego es la principal o única fuente de agua para los cultivos, el riego a demanda es la opción que determina el dimensionamiento de las instalaciones de riego. Para ello se tiene en cuenta la evapotranspiración del cultivo (ETc) para el período

de punta que debe ser estimado de la forma más precisa posible. Uno de los aspectos que da precisión a este dato es el período considerado para su estimación.

Según Bernardo et al. (2005), para la programación de los sistemas de riego, la cantidad de riego necesaria puede ser determinada para períodos mensuales, trimestrales o para el ciclo total del cultivo. Sin embargo, para dimensionar el sistema, las necesidades de riego deben determinarse para el período de máxima demanda y, en este caso, el período de tiempo considerado en los análisis es un parámetro de gran importancia. Si se determina la máxima demanda teniendo en cuenta un período de tiempo muy corto (por ejemplo, datos diarios), se obtiene, normalmente, un dato muy elevado de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), lo que lleva a un sobredimensionamiento del proyecto de riego. Por otro lado, cuando se usa un período muy largo (mensual, trimestral), normalmente, el valor de máxima demanda de riego será bajo y, en consecuencia, terminaremos en un proyecto subdimensionado. Lo ideal es que el rango de tiempo considerado sea lo más próximo posible a la frecuencia de riego.

Según Tarjuelo 2005, a pesar de las ventajas que presenta el riego a demanda, el dimensionamiento de la instalación para que sea capaz de cubrir las necesidades de riego en el período punta con escasas probabilidades de fallo en el suministro puede encarecer los costos de instalación. Por esta razón, muchas veces se plantean variantes de riego que permitan un riego a demanda en los períodos fuera de los meses de punta y riego restringido en los períodos de punta. Según Rodrigo López et al. (1992), en riegos de alta frecuencia, el suelo pierde importancia como reserva de agua para las plantas; por tanto, la estimación de la ET_c adquiere mayor relevancia, siendo un factor esencial para el manejo del riego y el diseño de las instalaciones. Cabe mencionar que esta información surge de investigaciones en ambientes sin precipitaciones o donde estas son muy escasas durante el ciclo del cultivo.

García y Puppo (2015) sugieren, para el caso de Uruguay, el uso de datos decádicos de ET_o para la selección de las láminas a aplicar con pívot central, que son manejados como riegos de alta frecuencia, y donde el riego es operado manteniendo el contenido de agua en el suelo próximo a la capacidad de campo. Estos autores elaboraron un mapa de isolíneas (figura 6) que permite al diseñador, en función de su ubicación dentro del Uruguay, determinar el valor de ET_o de diseño para el mes de enero (mes de máxima demanda en la mayoría de los cultivos de verano).

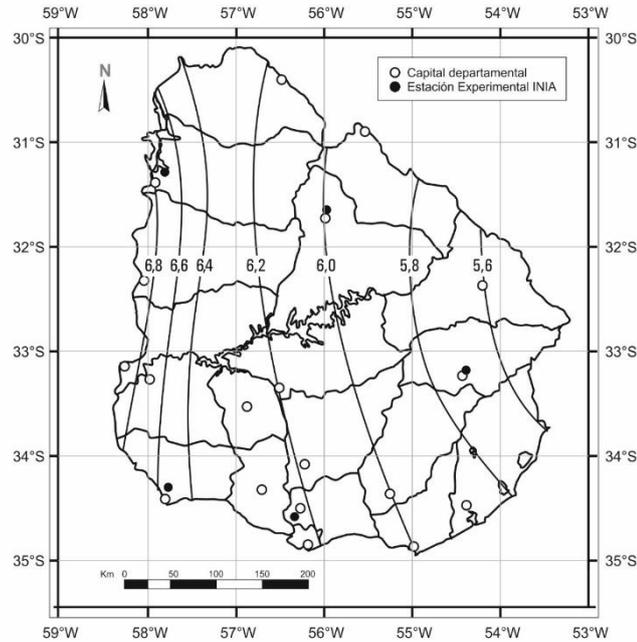


Figura 6: ETo para diseño de equipos de riego. Mapa de isótopas para enero, con valores promedios para períodos de 10 días, con 80 % de probabilidad de no excedencia. García-Petillo y Puppo (2015)

En clima templado, como el de Uruguay, con PP a lo largo del año, las decisiones sobre el diseño de los equipos de riego deberían tener en cuenta dichas PP, tratando de hacer un uso más eficiente del agua de riego, con un mayor aprovechamiento de las PP y de la capacidad de almacenamiento del suelo. Si bien los suelos del Uruguay tienen una capacidad limitada de almacenamiento de agua en la zona radical, esta reserva puede cubrir la demanda del cultivo por varios días y puede recargarse con las PP que ocurren durante el ciclo del cultivo.

Por esta razón, el riego complementario o suplementario utilizado en climas templados consiste en suplementar con riego lo que las PP no cubren de la demanda hídrica del cultivo. El manejo del riego complementario presenta inconvenientes al momento de definir las capacidades máximas que deben tener los equipos de riego. Este tipo de riego incrementa y estabiliza el rendimiento de los cultivos, principalmente en contextos de variabilidad climática, permitiendo, en definitiva, reducir el riesgo productivo y económico de los sistemas de producción de granos (Sawchik et al., 2010).

Definir la lámina de riego a reponer diariamente es uno de los parámetros necesarios para el diseño de cualquier sistema de riego, ya que, además de estar limitado por las características de los suelos (velocidad de infiltración), no solo determina el caudal que deberá entregar la bomba, sino también todo el diseño hidráulico del equipo de riego y su costo de funcionamiento (Bernardo et al., 2005).

Por lo tanto, una de las decisiones más relevantes en el diseño de estos equipos y que el productor debe tomar en el momento de realizar la inversión es definir la lámina máxima diaria que puede aplicar. La falta de información confiable a nivel nacional sobre estrategias de riego suplementario y evaluación de disponibilidades hídricas en distintas etapas de los cultivos constituye una limitante a la hora del diseño de estos equipos.

Estimar la capacidad de diseño en áreas húmedas y subhúmedas puede ser más complicado que en áreas áridas. El beneficio económico del riego en áreas subhúmedas y húmedas se define, principalmente, durante períodos prolongados de sequía (Hoffman et al., 2007).

Del análisis de encuestas sobre riego (INIA et al., 2017) mencionado anteriormente, el 68 % de los encuestados tiene equipos que aplican más de 6 mm y el 32 % restante, equipos de menos de 6 mm diarios. Según Morales et al. (2022), para las condiciones de Uruguay, se recomienda una dotación de $1,14 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ($4,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ ha}^{-1}$). Dicha recomendación se basa en la necesidad de que el equipo sea capaz de cumplir la demanda promedio del mes de mayor requerimiento hídrico, una ET_c máxima para el maíz de 7 mm día^{-1} , asumiendo una jornada de riego de 20 horas y una eficiencia de aplicación de 85 %.

1.7. MANEJO RACIONAL DEL RIEGO

El manejo racional de cualquier proyecto de riego debe considerar los aspectos sociales y ecológicos de la región y procurar maximizar la productividad y la eficiencia de uso del agua y minimizar los costos (capital, mano de obra...) manteniendo las condiciones de humedad del suelo favorable para un buen desarrollo del cultivo regado (Bernardo et al., 2005).

El planeamiento y la operación de un sistema de riego deben estar basados en los objetivos y en las condiciones en las cuales se ejecutará el proyecto. En regiones áridas, donde el agua es un factor limitante, el objetivo debe ser el logro de la máxima producción

por unidad de agua aplicada. En nuestras condiciones, de clima templado, el propósito puede ser la obtención de máxima producción por unidad de área cultivada o por unidad de costo de mano de obra o de energía utilizada.

1.7.1. Maximizar la producción por unidad de agua aplicada

Este objetivo se puede lograr, por ejemplo, adecuando el riego a los períodos críticos del cultivo frente al déficit hídrico o mediante riegos deficitarios en relación con la evapotranspiración real, estableciendo un programa de riego en el que la lámina media aplicada sea menor a la lámina media definida por la ETc. Este manejo es más eficiente en sistemas de riego donde el riego es de alta frecuencia y con una lámina de riego más pequeña (riego por goteo y pívot central).

Para las condiciones de Brasil, con precipitaciones en el ciclo del cultivo, se recomienda programar riegos deficitarios, ya que requieren sistemas de menor capacidad, tanto en el sistema de bombeo como del sistema de tuberías, por lo tanto, con menor costo de inversión y operativo. Se aplica una menor lámina de riego total durante el ciclo de cultivo, provocando una menor disminución en la producción, en términos de producción potencial, y permite un mejor aprovechamiento de las lluvias. En la etapa inicial del cultivo, cuando la ETc es menor que la evapotranspiración de referencia (ETo), se puede aplicar un poco más de agua mediante riego respecto a la ETc. Con esto se mantiene el perfil del suelo con un elevado contenido de humedad y, al llegar período de máxima demanda, el cultivo podrá utilizar el agua del horizonte superior, donde se aplica el riego limitado, y completará con el agua almacenada en los horizontes más profundos (Bernardo et al., 2005).

1.7.2. Maximizar la producción por unidad de área

En situaciones donde la superficie cultivable es limitante, pero no hay limitante en cuanto al agua disponible y los costos de riego son bajos, se debe maximizar la producción por unidad de área. En este caso no se debe permitir el déficit hídrico y el nivel de humedad debe ser siempre próximo a CC de forma de lograr los rendimientos potenciales del cultivo. Es necesario disponer de un abastecimiento de agua suficiente para atender la demanda diaria de ETc potencial y de un sistema de riego capaz de regar el área objetivo con alta frecuencia, de forma que la humedad del suelo sea mantenida en niveles elevados para mantener una tasa elevada de fotosíntesis (Bernardo et al., 2005).

1.7.3. Maximizar ingresos económicos

Según Bernardo et al (2005), no se debe regar por el simple hecho de hacer agricultura regada; el objetivo debe ser obtener mayor producción, tanto en cantidad como en calidad, con lo cual aumentarán los ingresos netos del productor, o incorporar suelos que sin riego no serían posibles de cultivar. Por esto es importante tener en cuenta los costos del riego y el costo por mm aplicado, por riego o por unidad de energía utilizada. Es necesario analizar los márgenes de ganancia que genera la incorporación del riego, que asegure ingresos mejorados al productor.

1.8. ESTRATEGIAS DE MANEJO DEL RIEGO QUE AFECTAN EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS

Planificar el uso del agua almacenada en el suelo para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos durante el período de mayor demanda puede ser una estrategia de riego exitosa, pero requiere que el sistema de riego se opere de manera que la reserva de agua disponible del suelo esté lleno (o casi lleno) antes de ingresar al período de punta. Las necesidades hídricas de esta etapa podrán satisfacerse mediante el sistema de riego y mediante el agotamiento planificado de la zona de la raíz. La magnitud en la cual se reduce el caudal de diseño para el sistema de riego depende de la cantidad de agua disponible que se puede almacenar en dicha zona y de la duración del período de punta. Esta estrategia tiene el riesgo de que, ante un período de máxima demanda hídrica anormalmente largo o fallas del sistema de riego, durante o justo antes de dicho período, puedan provocar un estrés no planificado en el cultivo debido a la falta de agua (Bernardo et al., 2005, Hoffman et al., 2007).

En regiones donde se pueden esperar lluvias durante el período punta, las prácticas agronómicas para aumentar la efectividad de la precipitación pueden reducir los caudales requeridos del sistema de riego. Los métodos de programación de riego que no recarguen completamente el suelo en la profundidad de la raíz del cultivo pueden aumentar la precipitación efectiva al reducir la percolación profunda y el escurrimiento superficial. Cuando el suministro de agua no compensa la tasa de consumo punta del cultivo, el almacenamiento de agua en el suelo puede resolver el problema siempre que la cantidad de agua aportada por el suelo y el riego sea suficiente para satisfacer el volumen total de agua requerido por el cultivo. Durante los períodos de menor consumo, el agua que

excede las necesidades de los cultivos se desvía al almacenamiento. Durante el período punta, el suministro normal de agua se incrementa a partir del agua almacenada (Hoffman et al., 2005).

La figura 7 muestra un ejemplo de un riego con pivó central, con su variación típica de agua disponible en el suelo durante el ciclo de un cultivo. Las curvas muestran que se puede programar el riego manteniendo la humedad en el horizonte superior ($Z = 30$ cm) y, al mismo tiempo, permitir el consumo continuo del agua desde los horizontes más profundos ($Z = 90$ cm). De esta forma se tendrán menores pérdidas por percolación y mayor aprovechamiento de las precipitaciones que eventualmente ocurren durante el ciclo del cultivo (Heermann et al., 1976).

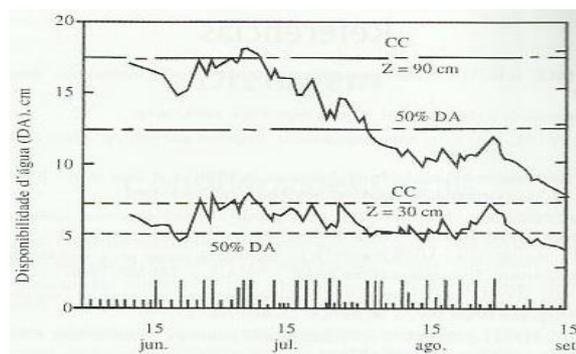


Figura 7: variación típica de la disponibilidad de agua durante el ciclo del cultivo con riego por pivó central en función de la profundidad (Heermann et al., 1976)

1.9. RIEGO EN MAÍZ Y SOJA: RELACIONES HÍDRICAS

1.9.1 Demanda hídrica de maíz y soja

Considerando valores promedio de E_{To} para el mes de enero de $5,6 \text{ mm d}^{-1}$ (INIA Las Brujas), un coeficiente de cultivo K_c de 1,20 para maíz y 1,15 para soja (Allen et al., 1998), la E_{Tc} estaría en valores de $6,7$ y $6,41 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente. En cambio, si se tiene en cuenta la E_{To} decádica con un 80 % de probabilidad de no excedencia (figura 6), entonces, el valor de la E_{To} será de $6,2 \text{ mm d}^{-1}$ y la E_{Tc} , de $7,44 \text{ mm d}^{-1}$. A su vez, estos valores deberán corregirse por la eficiencia del método de riego, la cual está en torno al 85 % (Morales et al., 2022), lo que determina que las necesidades brutas de riego estén en torno a los $8,75 \text{ mm d}^{-1}$. También hay que considerar que, en el caso de los valores mensuales, los promedios son de 30 días; por lo tanto, para el caso del valor promedio de

5,6 mm d⁻¹ correspondiente a enero, dada la distribución normal de los datos de ETo, aproximadamente en la mitad de los días del mes ese valor es superado.

Existen numerosos trabajos en los cuales se evaluó el efecto de diferentes niveles de déficit hídrico sobre la productividad del cultivo de maíz y soja. Estos trabajos están enfocados en el estudio fisiológico del déficit hídrico en determinadas etapas fenológicas de los cultivos, manejando los períodos críticos (Giménez, 2012, 2014). Capurro et al. (2017) evaluó el efecto de láminas deficitarias aplicadas en diferentes etapas del ciclo fenológico y durante todo el ciclo del cultivo en soja. Sin embargo, son pocos los trabajos en los cuales se investiga el efecto de un manejo del riego tal cual se plantea en este trabajo: una lámina de riego que al inicio del ciclo cumple con la demanda hídrica, pero, en la medida en que el cultivo crece y la ETo aumenta, se empiezan a generar diferentes niveles de déficit hídrico en el suelo en distintas etapas fenológicas afectando de forma diferencial el rendimiento del cultivo.

Uno de ellos es el realizado por Djaman et al. (2013), quienes investigaron el efecto de diferentes niveles de riego sobre el cultivo de maíz. Estos investigadores no encontraron diferencias significativas en el rendimiento del maíz entre tratamientos que cubrían el 100 % o el 75 % de la demanda de agua. Esto llevó a un ahorro del 25 % de agua de riego y menos energía utilizada para realizarlos. Al mismo tiempo, indican que los tratamientos que cubrían el 75 % y 60 % no mostraron diferencias significativas entre sí y son comparables al tratamiento totalmente regado, con lo que concluyen que es viable limitar el riego con el fin de aumentar la productividad del agua en la producción de maíz en las condiciones en las cuales desarrollaron el ensayo.

Giménez (2012) obtuvo rendimiento potencial en maíz de 13,2 y 15,3 t ha⁻¹ en dos años de evaluación en condiciones sin estrés hídrico. Cuando se generaban condiciones de estrés hídrico en el período crítico (floración), las pérdidas en el rendimiento estaban en torno al 50 % del potencial. En tanto, si la deficiencia ocurría en la etapa de llenado de grano, la disminución en el rendimiento era del 27 al 31 %. Finalmente, si el déficit se iniciaba en la etapa vegetativa y se continuaba durante el período crítico, los rendimientos disminuían un 56 %.

Giménez (2012) indica que los rendimientos de soja bajo condiciones hídricas no limitantes variaron entre 4,9 y 7,3 t ha⁻¹ de grano, mientras que la producción de biomasa estuvo entre 9,0 y 16,0 t ha⁻¹ de materia seca total. La variación observada en los

rendimientos se debió a variaciones en las condiciones climáticas que determinó que en un año con abundantes lluvias (año niño) se generaran problemas de excesos hídricos y condiciones de baja radiación solar debido al elevado número de días nublados y temperaturas medias inferiores a las normales. Todo esto llevó a la menor producción de biomasa, que produjo una disminución del número de granos m^{-2} y del rendimiento.

La soja es un cultivo altamente sensible a las deficiencias hídricas, característica que limita sus rendimientos potenciales. Esto se debe a los efectos directos que causa la falta de agua en el crecimiento y a los efectos indirectos en la fijación biológica de nitrógeno, que se ve afectada negativamente por condiciones de estrés hídrico (Sinclair y Serraj, 1995, Serraj et al., 1999). Andrade et al. (1996) reportan que el crecimiento de los cultivos y, en particular, la soja, se reduce cuando el contenido hídrico del suelo disminuye por debajo del 50 % del agua disponible, provocando caídas en el rendimiento a pesar de la alta plasticidad que presenta en los estadios vegetativos, la cual se reduce durante las etapas reproductivas. En soja, el período crítico ocurre durante las etapas finales de fructificación y de llenado de grano, estados fenológicos R4-R6 (Ferh y Caviness, 1977).

Capurro et al. (2017) determinó en soja que los riegos deficitarios con el 50 % de la ET desde siembra hasta R4 no repercutían en el rendimiento si en el período crítico se cubría el 100 % de la demanda del cultivo. Según el autor, esta podría ser una estrategia válida para manejar el riego en las condiciones climáticas del Uruguay, pudiendo ahorrar hasta un 22 % de agua en comparación con satisfacer la demanda completa durante todo el ciclo del cultivo.

Kirnak et al. (2010) evaluaron el efecto de diferentes láminas de riego sobre el rendimiento y calidad de semillas en soja en condiciones de clima árido, libre de precipitaciones, y sus resultados indican que láminas que cubren un 75 % de la ETc pueden ser recomendadas para lograr elevados rendimientos de semilla, con un alto nivel de proteínas en ellas, con una reducción en el gasto de agua de un 22 % respecto a tratamiento completamente regado.

Si bien en la etapa de plántula la demanda de agua es baja, el sistema radical es poco profundo y, por lo tanto, las plantas son totalmente dependientes de la humedad concentrada en los primeros centímetros de suelo. El estrés hídrico en etapas vegetativas afecta la expansión foliar reduciendo la cobertura del cultivo y la radiación incidente

interceptada y, por ende, afecta la demanda potencial de agua al tener menor superficie evaporativa (Dardanelli et al., 2010).

Durante el período R1-R5, la soja es más susceptible a deficiencias hídricas que en la etapa vegetativa, ya que intensidades medias pueden producir reducciones en el rendimiento en semilla del orden del 10 % y deficiencias severas en un 20 % o más. La reducción del rendimiento se debe al aborto de flores y vainas que disminuyen el número final de estas últimas, siendo en parte compensado por el peso de las semillas si en la etapa siguiente no ocurren deficiencias hídricas (Andriani, 2000).

Según Salvaghiotti et al. (2009), cualquier tipo de estrés que sufra el cultivo en el período R1-R5 afectará el número potencial de semillas. Además, si ese estrés ocurre durante el período entre R5 y madurez fisiológica (R7), lo que se verá afectado es el peso de las semillas. En cualquier caso, el rendimiento tendrá severas disminuciones.

Por su parte, Baigorri et al. (2000), citado por Canosa y Prieto (2013), indican que la alta producción de flores y el extenso período de floración le permitirá escapar a cortos períodos de estrés. La incidencia de estrés entre R1-R3 no produce importantes pérdidas de rendimiento, ya que la floración se prolonga hasta R5.

1.10. MANEJO DEL RIEGO MEDIANTE BALANCE HÍDRICO

1.10.1. Evapotranspiración del cultivo

Para el manejo del riego se utilizó la metodología de balance hídrico recomendada en el manual de FAO 56 (Allen et al., 1998). Las entradas del balance hídrico (BH) son el riego y la precipitación efectiva (PPef.), y las salidas, la ETc ajustada (ETc aj), el escurrimiento y la percolación profunda, teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento del suelo.

Esta metodología de paso diario permite realizar un adecuado manejo del riego, teniendo en cuenta el consumo de agua del cultivo, el agua presente en el suelo y los aportes mediante el riego o precipitación. Es una metodología que permite determinar los momentos más oportunos para realizar los riegos.

El consumo de la planta o evapotranspiración del cultivo (ETc), en condiciones de bienestar hídrico, se estima a partir del dato de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), estimada con metodología recomendada por el FAO 56 (Allen et al., 1998), utilizando la ecuación de Penman Monteith, y en un segundo paso se corrige por el

Kc del cultivo (ecuación 1). Cuando el aporte de agua (PP, riego, almacenamiento del suelo) no es suficiente para cubrir la demanda del cultivo, se inician procesos a nivel de planta que evitan su senescencia temprana, pero pasan a sufrir diferentes niveles de estrés hídrico, dependiendo de la duración e intensidad del estrés (Steduto et al., 2009). En estos casos, la ETc debe ser corregida, ya que un cultivo sometido a estrés hídrico consume menos agua debido al ajuste estomático que realiza. La ETc aj se calculó diariamente, teniendo en cuenta un coeficiente de estrés (Ks) que es dependiente del nivel de déficit de humedad del suelo y se estima según la ecuación 2. Los coeficientes de cultivo (Kc) son los recomendados por FAO (Allen et al., 1998), ya que no se dispone de información local de dichos coeficientes.

$$ETc_{aj} = ET_o * Kc * Ks \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

ETc aj: ETc ajustada (mm día⁻¹)

ETo: evapotranspiración del cultivo de referencia (Penman-Monteith modificado por FAO, Allen et al., 1998)

Ks: coeficiente de estrés (Allen et al., 1998)

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{(1 - p)ADT} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

D_r: agotamiento de humedad en la zona radical (mm)

ADT: agua disponible total en la zona radical del suelo (mm)

p: fracción del ADT que el cultivo puede extraer sin sufrir estrés hídrico (umbral)

El D_r es el déficit de humedad generado por la extracción del cultivo y equivale a la ETc aj acumulada día a día, no cubierta por el riego o las PP cuando ambos son escasos. El ADT es la cantidad de agua que el cultivo puede extraer y depende del tipo de suelo, de la profundidad de las raíces y será afectado por desarrollo la misma (tasa de crecimiento).

Los valores de p utilizados en este trabajo son los recomendados en el manual de FAO 56 (Allen et al., 1998). Estos corresponden para una ETc de 5 mm; cuando la ETc es

mayor a este valor se corrige, según la ecuación de ajuste, $p = p_{\text{tabla}} + 0,04 \times (5 - ET_c)$. Para maíz, el valor de p es 0,55 y en soja es de 0,50 y fueron corregidos cuando la ET_c superó los 5 mm día⁻¹. El ADT corregida por p determina el agua fácilmente disponible (AFD), cantidad de agua en el suelo que el cultivo puede extraer fácilmente sin sufrir estrés hídrico (cierre estomático).

1.10.2. Coeficientes de estrés hídrico

Los cultivos responden al estrés hídrico, el cual puede ocurrir en cualquier momento, mediante cuatro vías principales de control, a través de los coeficientes de estrés: reducción de la tasa de expansión foliar (generalmente, durante el crecimiento inicial), cierre estomático (a lo largo de todo el ciclo), aceleración de la senescencia del dosel (en general, durante el crecimiento tardío) y cambios en el índice de cosecha (después del inicio de la etapa reproductiva) (Steduto et al., 2009, Raes et al., 2012).

De los procesos mencionados anteriormente afectados por el estrés hídrico, estudios han demostrado que la expansión foliar es el más sensible y la conductancia estomática (apertura de estomas) es menos sensible. La senescencia foliar es ligeramente menos sensible que la conductancia estomática (Bradford y Hsiao, 1982).

Estas funciones de estrés son representadas como una curva que puede ser convexa, levemente convexa o lineal. En la medida en que la curva sea más convexa, mayor es la capacidad del cultivo para ajustarse y aclimatarse al estrés (Steduto et al., 2012). En dicha curva, el valor superior (umbral superior) corresponde al agotamiento de agua en el suelo en la zona de raíces (D_r), expresados como umbrales (p) a partir del cual inicia el proceso de estrés. En la medida en que el estrés continúe, el K_s disminuye hasta su valor inferior. Este valor inferior (umbral inferior) indica el nivel de agotamiento donde el valor de K_s es igual a cero y el efecto del estrés es máximo. Un mayor agotamiento por debajo del umbral inferior no tiene efectos adicionales (Steduto et al., 2012).

La figura 8 representa la curva del coeficiente de estrés (K_s) para la expansión del dosel (exp), la conductancia estomática (sto) y la senescencia del dosel (sen), del maíz como función del agotamiento en la zona radicular (p).

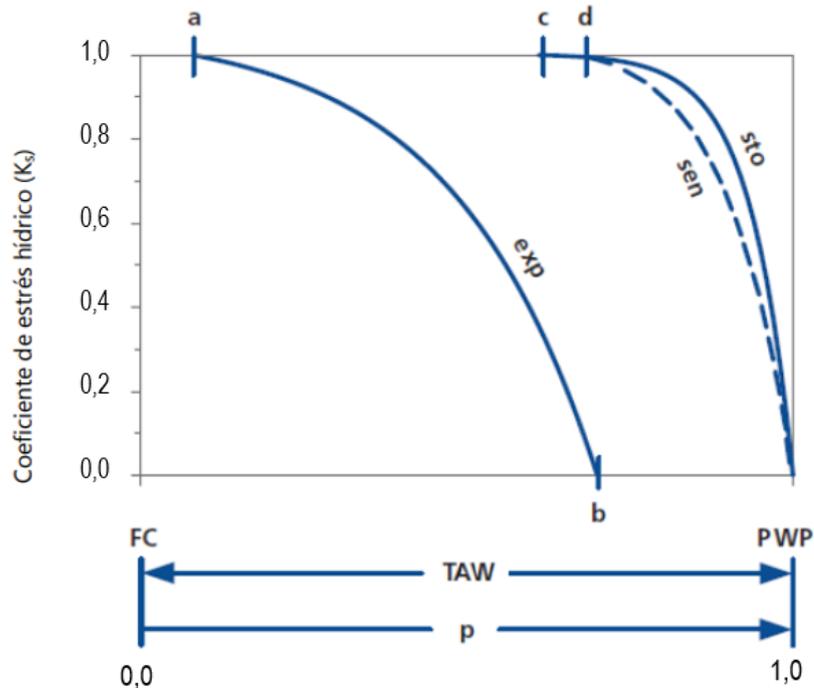


Figura 8: curva de coeficiente de estrés para el cultivo de maíz. Umbrales de expansión foliar, a: umbral superior para la expansión; b: umbral inferior. Los umbrales superiores para el cierre estomático y la senescencia del follaje están señalados con *c* y *d*, respectivamente. El umbral inferior tanto para los estomas como para la senescencia se fijan en el PWP en AquaCrop (Steduto et al., 2009). TAW: total available water (agua disponible total), PWP: permanent wilting point (punto de marchitez permanente).

1.10.3. Profundidad de las raíces

Como fue mencionado anteriormente, la profundidad de las raíces es un factor a tener en cuenta en el balance hídrico para el manejo del riego, ya que determina la capacidad de exploración del cultivo y, conjuntamente con el tipo de suelo, el volumen de agua que estará disponible. La profundidad de las raíces aumenta la zona radical y reduce el D_r si las capas más profundas del suelo tienen alto contenido de agua. Según Steduto et al. (2009), el crecimiento de las raíces es menos sensible al estrés hídrico que las hojas; por tanto, ante un estrés hídrico a nivel de estomas, el crecimiento radical puede continuar, explorando mayor profundidad.

Hsiao y Fereres (2012) indican que en buenos suelos, la tasa de profundización de las raíces del maíz puede alcanzar un promedio de 2,5 cm por día y la profundidad efectiva llegaría a 2,8 m o más cuando el cultivo alcanza su madurez. Además, la tasa de

profundización puede estar limitada por capas restrictivas en el suelo (factores físicos o químicos), poca aireación o temperatura fría del suelo. La tasa de profundización es importante cuando existe una cantidad considerable de agua almacenada en las capas más profundas del suelo, durante períodos de precipitación y riego escasos o nulos.

En el caso de la soja, la profundidad máxima de raíces es, aproximadamente, de 1,3 a 1,8 m, llegando hasta 2,40 m dependiendo del agua disponible, el tipo de suelo, la temperatura y la duración del ciclo de la variedad (Kanemasu, citado por Steduto et al., 2012). La mayoría de las raíces se encuentra en los 0,3 m superiores del suelo, pero los períodos prolongados de sequía provocan el crecimiento de las raíces en mayor grado hacia capas más profundas del suelo. Como en muchos cultivos, el estrés hídrico aumenta la relación entre raíces y tallos, y tiende a incrementar la longitud total de las raíces. Además, los genotipos de la soja varían en su crecimiento y desarrollo de los sistemas radiculares (Wani y Heng, 2012).

1.11. EFICIENCIA DE USO DEL AGUA

1.11.1. Definiciones de eficiencia de uso del agua

Para cuantificar la eficiencia del uso del agua, el término comúnmente utilizado es la eficiencia de uso del agua (EUA), que es una relación carbono/agua definida de diferentes formas en función del área de interés. Por ejemplo, en fisiología de plantas, el interés es el intercambio de agua por CO₂ y se define la EUA como la relación entre la ganancia de carbono y el agua transpirada en hoja o en planta individual. Cuando pasamos al nivel agronómico, la EUA hace referencia a la productividad del cultivo y se estima como la relación entre su rendimiento y su ETc o el suministro total de agua (Salman et al., 2021).

En otros ámbitos (ingeniería, economía...), la eficiencia caracteriza el desempeño de un proceso al determinar la relación entre la salida y la entrada del mismo. En la agricultura regada, la EUA se ha utilizado durante mucho tiempo para evaluar el rendimiento del riego (Israelsen, 1950) y se define como la relación entre el uso consuntivo (ET) y la entrada total de agua en determinada superficie (campo individual, sistema multipredial o a nivel de cuenca).

Recientemente, se ha propuesto el uso del término productividad del agua (PA) como la relación entre producción (grano, producto cosechable) y la cantidad de agua utilizada

(ET en m³) (Kijne, citado por Salman et al., 2021), debido a que el término EUA para expresar diferentes relaciones con el agua genera confusión.

Al igual que la EUA, la definición de PA depende de la escala en que se trabaja, como se explica en la siguiente sección.

1.11.2. Productividad del agua (PA)

En áreas donde el suministro de agua renovable es limitado, es importante utilizarlo de forma eficiente para lograr los máximos beneficios sociales. La PA proporciona una medida para evaluar la EUA, pero se puede definir de diferentes maneras. Para empezar, cuantificando el proceso por el cual las plantas intercambian carbono por agua, posteriormente siguiendo el ciclo desde la hoja y hasta llegar a la producción lograda por los agricultores, la PA es la relación entre el rendimiento y el agua consumida como ET o de la producción sobre el aporte total de agua (Salman et al., 2021). Si se agregan aspectos económicos o sociales, la PA es la relación entre el valor del cultivo y el agua consumida o puede centrarse en otro beneficio, como la mano de obra por unidad de agua consumida. Mejorar la PA requiere conocimientos de muchas disciplinas diferentes necesarias para examinar el destino de la PA, desde la producción agrícola a los consumidores (Salaman et al., 2021).

El trabajo de muchos investigadores (De Wit, Fischer y Connor, Duvick, citados por Salman et al., 2021) concluye en que mejorar la PA es necesario para el maximizar el uso de los recursos hídricos en la agricultura, pero no equivale a ahorrar agua. Si bien en los últimos cincuenta años hubo mejoras significativas en la PA de algunos cultivos, aún existen amplias oportunidades para un uso más eficiente del agua en los diferentes sistemas agrícolas.

El uso más eficiente del agua en la agricultura regada es un objetivo crítico fuertemente demandado por la sociedad porque percibe el riego como un proceso ineficiente y, en algunos casos, con impacto ambiental negativo (eutrofización de aguas superficiales por la proliferación de cianobacterias). Según Meerhoff (2018), el riego promueve la producción agrícola intensiva y, con ella, el deterioro de los suelos por erosión y la contaminación de las aguas dulces, principalmente por el arrastre de nutrientes del suelo, la mayoría de ellos provenientes de la fertilización de los cultivos, entre ellos, los fertilizantes fosfatados.

El manejo de estrategias de riego que disminuyan la percolación profunda y el escurrimiento generado por las PP o un mal manejo del riego es clave para evitar los problemas ambientales mencionados por Meerhoff (2018), y, al mismo tiempo, permiten una mayor PA, ya que se disminuyen las pérdidas de agua.

Dentro de los paquetes tecnológicos necesarios para identificar y explorar mejoras en la PA, los modelos para predecir la respuesta del rendimiento del cultivo al agua son indispensables para la evaluación de la PA (Salman et al., 2021).

1.11.3. Productividad del agua en maíz y soja

El maíz (cultivo tipo C4, adaptado a clima cálido y seco) tiene una eficiencia alta en el uso del agua (De Wit, Steduto, citado por Steduto et al., 2012), principalmente debido a la alta tasa de fotosíntesis. El maíz, bajo condiciones favorables, responde de manera positiva al incremento del CO₂ atmosférico, como lo indica al aumento del área foliar (Hsiao y Jackson, citado por Steduto et al., 2012) y de la biomasa, al menos hasta 520 ppm de CO₂. Por tanto, los ajustes de AquaCrop normalizan la productividad del agua (WP*) según la concentración de CO₂ atmosférico, año tras año. Por ejemplo, la WP* del maíz se ajustó de 32,4 g m⁻² en 1990 a 33,7 g m⁻² en el año 2000.

En soja, estudios realizados en diferentes partes del mundo encontraron que la productividad hídrica de la biomasa (WPB/ET), es decir, la pendiente de la relación lineal entre biomasa y ET acumulada, varía de 1,2 a 1,6 kg m⁻³. En investigaciones en Estados Unidos y Canadá se observaron valores de WPB/ET más altos, mientras que en India se encontraron valores más bajos (posibles diferencias nutricionales). En los cultivos oleaginosos, como el girasol y la soja, la WPB/ET disminuye después de la antesis porque la proteína y el aceite en la semilla requieren más energía y asimilados fotosintéticos para formarse que las paredes celulares o el almidón.

La soja presenta una baja eficiencia fotosintética y, además, un alto contenido energético del grano, por lo cual la EUA es baja con respecto a otros cultivos de verano (Andrade y Sadras, 2000). Canosa y Prieto (2013) estimaron una EUA para el cultivo de soja de 1,13 kg m⁻³ de agua evapotranspirado, en condiciones sin limitantes hídricas en el norte de Uruguay.

Rodriguez et al. (2011) estimaron la EUA mediante una regresión en la cual muestra una EUA de 19,6 kg ha⁻¹mm⁻¹ (1,96 kg m⁻³) en maíz y de 6,4 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (0,64 kg m⁻³)

para soja. En el caso del maíz, la EUA en producción de grano aumentó con el riego. En soja, la EUA no fue afectada por los tratamientos de riego (figura 9).

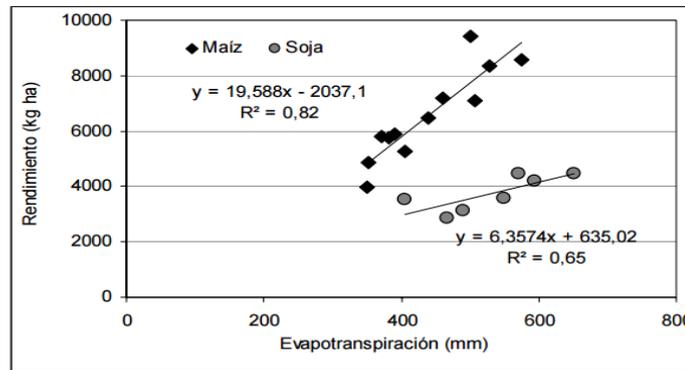


Figura 9: regresión para estimar Eficiencia del uso del agua en maíz y soja en la producción de granos (Rodríguez et al., 2011)

1.12. USO DE MODELOS EN LA AGRICULTURA

1.12.1. Definiciones, tipos de modelos y utilidades

Los modelos son definidos como una simplificación o abstracción de un sistema real (Loomis et al., 1979). En el caso de los modelos de los sistemas biológicos, como los cultivos, la realidad está compuesta por un determinado número de componentes y procesos que interactúan en un amplio rango de niveles de organización.

El uso de herramientas informáticas en la agricultura que predicen el rendimiento, crecimiento y desarrollo de los cultivos es de gran utilidad en la toma de decisiones respecto al manejo sobre estos. De esta forma, un modelo calibrado y validado para un determinado cultivo permitirá predecir su comportamiento al variar determinadas prácticas de manejo como pueden ser el nivel de nutrientes, la disponibilidad de agua o las fechas de siembra, entre otros. También permite optimizar el manejo agronómico de los cultivos (Steduto et al., 2009).

La respuesta de los cultivos al déficit hídrico es compleja y requiere funciones empíricas complejas para estimar los rendimientos con base en el nivel de déficit hídrico. Doorenbos y Kassam (1979) desarrollaron uno de los métodos más usados para estimar el rendimiento utilizando parámetros empíricos, calibrados en experimentos de campo y niveles diferentes de estrés hídrico de los cultivos. Otros modelos relacionan características genéticas y manejo agronómico y ambiental que permiten predecir el

crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos: son los llamados modelos de simulación o modelos dinámicos (Monteith, 1996).

Existen varios modelos de este tipo; uno de los más utilizados es el Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), que estima los efectos de las prácticas de manejo y las condiciones ambientales en los cultivos (Jones et al., 2003). Otro modelo que ha sido calibrado y utilizado en Uruguay es el Cropping Systems Simulation Model (CropSyst) (Stöckle et al., 2003). Estos modelos demandan para su calibración y operación un número grande de parámetros, algunos específicos para los cultivares, que complican su aplicación.

Por otra parte, el modelo AquaCrop, liberado por la FAO (Raes et al., 2009), es un modelo dinámico que simula el rendimiento alcanzable de los cultivos herbáceos como una función del consumo de agua y que puede usarse para analizar escenarios agrícolas en ciclos y localidades diferentes (Heng et al., 2009, Hsiao et al., 2009, Steduto et al., 2009). Este modelo hace foco en el agua ya que esta es la clave para la producción agrícola que deberá cumplir con la demanda de alimentos de la población mundial en constante crecimiento y porque el agua es un recurso escaso con diversos usos, generando condiciones de competencia por el empleo de este recurso finito (Steduto et al., 2009).

1.12.2. AquaCrop: modelo de respuesta de los cultivos al agua

Este modelo desarrollado por la FAO es simple y con buena exactitud, utiliza un número reducido de parámetros en comparación con otros modelos biofísicos comerciales (Raes et al., 2009) y se ha calibrado con buen ajuste y resultados experimentales en varias regiones agrícolas del mundo (Salman et al., 2021). AquaCrop realiza simulaciones de la respuesta del rendimiento al agua bajo diversas condiciones ambientales y de manejo, incluyendo escenarios derivados del cambio climático; sin embargo, al igual que la mayoría de los modelos de cultivo, no contempla los efectos de plagas ni enfermedades.

Es un modelo que combina, robustez, precisión y simplicidad, porque es ampliamente aplicable y con suficiente precisión, basado en procesos ecofisiológicos y de balance de agua en el suelo, utilizando conceptos generales. Requiere un número relativamente pequeño de parámetros y variables de entrada que son de fácil determinación. Los datos

de entrada son datos de clima, características del suelo y manejo del riego y del cultivo (fenología y prácticas de manejo) (Steduto et al., 2009).

El modelo estima el rendimiento y la biomasa del cultivo mediante la ejecución de 4 etapas. En la primera etapa o fase, estima el desarrollo de la cobertura vegetal (velocidad de crecimiento, cobertura máxima y senescencia) teniendo en cuenta datos climáticos y factores que pueden generar estreses que reducen dicha cobertura vegetal (estrés hídrico, aireación, térmico, etc.). En la segunda etapa, a partir de la cobertura estimada, calcula la transpiración. En la tercera etapa, la transpiración acumulada durante todo el ciclo es convertida a biomasa, teniendo en cuenta la productividad del agua normalizada (WP^*), parámetro característico de cada cultivo. Finalmente, en la cuarta fase, la biomasa es utilizada para estimar el rendimiento final del cultivo, teniendo en cuenta el índice de cosecha (IC), otro parámetro específico para cada cultivo.

Las salidas del modelo son el rendimiento y la biomasa producida. Además, provee información sobre el balance hídrico, la productividad del agua, el índice de cosecha y demás, que permiten analizar o explicar el rendimiento logrado, o detectar fallas en el manejo del riego que hacen que el rendimiento obtenido sea menor al esperado. Esto posibilita la mejora de las estrategias de manejo del agua o del cultivo de forma de ser más eficiente en el uso de los recursos. En cuanto a la productividad del agua para biomasa (WP) mencionada anteriormente, hace referencia a la PA (WP , siglas del inglés) que, al ser corregida por la ET_o , es normalizada (WP^*). Sus unidades son $kg\ m^{-2}$. Esta WP^* es un parámetro conservativo, característico de cada cultivo y casi constante cuando los nutrientes no son limitantes, independientemente del estrés hídrico (Steduto et al., 2012).

No se hará una descripción detallada del funcionamiento del modelo, ya que esta se encuentra disponible en la publicación de la FAO 66, "Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua" (Steduto et al., 2012).

1.13. INGRESOS GENERADOS POR LA INCORPORACIÓN DEL RIEGO

1.13.1. Aspectos a tener en cuenta en el análisis ingresos

La incorporación de una tecnología en la producción agrícola genera incertidumbres en muchos aspectos, uno de ellos es el económico. Si bien se conocen los beneficios del riego sobre el incremento del rendimiento de los cultivos y su estabilidad, los análisis

económicos son más complejos por la cantidad de variables que involucran y, por tanto, es complejo determinar los márgenes netos de ingreso que deja esta actividad (Bachino 2012).

En Uruguay, existen algunos análisis sobre el tema (Piedrabuena, 2014, Cardelino, 2000, Salgado y Yiansens, 2017), algunos en cultivos (maíz, sorgo, soja) y otros en pastura.

Para determinar los costos totales de un sistema de riego, como el pívot central, se debe incluir: la fuente de agua (represa, tajar, toma directa), la infraestructura relacionada con las obras de toma, el equipo de bombeo, la electrificación, los automatismos, el acondicionamiento del campo (construcción de puentes para el pívot), la conducción hasta el centro del pívot, el pívot de riego, el mantenimiento de todo el equipo y los costos variables generados por el uso del pívot (básicamente, el costo energético).

Bachino (2012) presenta un análisis de los costos de riego para dos sistemas de riego por aspersión (pívot central e irripod), pero ese análisis se basa en muchos supuestos que involucran las variables mencionadas anteriormente.

En este trabajo, se realizará un análisis de los costos directamente relacionados con la aplicación del riego y que están directamente asociados al consumo de energía. Por tanto, el análisis de márgenes es parcial, ya que no incluye amortización de equipos o fuente de agua ni mantenimiento de estos.

En el capítulo quinto se explica en detalle en análisis de costos energéticos para diferentes estrategias de riego. Se incluye el análisis de los márgenes de ingreso parciales teniendo en cuenta el precio del maíz actual (mayo 2022) y el promedio de los últimos 6 años. Se tomó como referencia el precio internacional fijado en la Bolsa de cereales de Chicago (figura 10). Habrá que tener en cuenta que los precios que recibe el productor pueden ser un poco más bajos (gastos de fletes).



Figura 10: evolución de precio internacional del maíz en USD/ tt, según la Bolsa de cereales de Chicago

1.14. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Si bien a nivel nacional e internacional hay varios trabajos de investigación sobre el efecto de diferentes estrategias de riegos deficitarios en maíz y soja, estos se basan en definir momentos críticos o en regar cubriendo determinado porcentaje de la ETc. Sin embargo, pocos son los trabajos en los que se evalúa el efecto de láminas diarias de reposición limitadas, en condiciones de clima templado, donde el aporte de las precipitaciones deben ser tenidas en cuenta. La situación evaluada en este trabajo simula equipos de riego limitados en cuanto a su capacidad máxima diaria de cumplir con la demanda del cultivo.

Las hipótesis planteadas en este trabajo son:

- 1) Los cultivos de maíz y soja regados con equipos que aplican láminas diarias menores a 6 mm obtendrán rendimientos significativamente menores a aquellos que reciben, en promedio, 9 mm diarios desde el inicio del período crítico.
- 2) En maíz y soja, el rendimiento se ve afectado por niveles crecientes de déficit hídrico en floración y llenado de grano. Sin embargo el déficit hídrico moderado durante el período crítico no afecta significativamente el rendimiento de ambos cultivos.
- 3) La lámina de riego que permite obtener altos rendimientos y estables a lo largo de los años, será la que haga un mejor aprovechamiento de las precipitaciones (reduciendo el gasto en riego) y dará márgenes de ingresos mayores, por tener menores costos operativos del riego.
- 4) El uso de un modelo de simulación de los cultivos, permitirá identificar diseños de sistemas y manejos de riego que sean económica y ambientalmente más sostenibles.

1.15. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es contribuir a mejorar el diseño y manejo de los equipos de riego utilizados en maíz y soja de forma de mejorar la eficiencia del uso del agua y la productividad de estos cultivos en Uruguay. Calibrar y validar un modelo de simulación de cultivo en respuesta al agua, que permita diseñar y manejar los equipos de riego para diversas situaciones.

Objetivos específicos:

1. Generar información sobre el efecto del uso de diferentes láminas de riego sobre el rendimiento de estos cultivos.

2. Determinar la respuesta del rendimiento y la eficiencia de uso del agua del cultivo de maíz a diferentes láminas máximas y dosis de riego.
3. Determinar la respuesta del rendimiento y la eficiencia de uso del agua del cultivo de soja a diferentes láminas máximas y dosis de riego.
4. Parametrizar y validar un modelo de simulación del rendimiento de cultivos en función del agua consumida.
5. Evaluar estrategias de riego que permitan realizar una recomendación de manejo de riego para las condiciones de suelo y clima del Uruguay.

1.16. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis consta de dos artículos publicados y dos capítulos relacionados con el uso del modelo AquaCrop, donde se abordaron los objetivos planteados. En el primer artículo, «Water productivity in maize, at different levels of deficit irrigation in humid climate», publicado en *Agrociencia Uruguay* (2021), vol. 25(1) e390, se describe la respuesta del cultivo de maíz a los diferentes niveles de riego en tres años de evaluación. El segundo artículo, «Deficit irrigation in soybeans, the effect on grain yield and water productivity in temperate climates», publicado en *Agrociencia Uruguay* (2021), vol. 25(2), e500, se presenta la respuesta del cultivo de soja a los diferentes niveles de riego en dos años de evaluación. En el cuarto capítulo, titulado «Ajuste del modelo AquaCrop en maíz con diferentes niveles de riego en condiciones de clima templado», se realiza la calibración del modelo con los datos del trabajo de campo para el cultivo de maíz. En el quinto capítulo, titulado «Uso del modelo AquaCrop en maíz para evaluar estrategias de riego en clima templado», el modelo calibrado es utilizado para evaluar diferentes estrategias de riego en dos localidades diferentes, Colonia y Paysandú, con la finalidad de discutir opciones de manejo del riego en dos zonas de importancia para el cultivo de maíz en Uruguay. En este capítulo se realizan simulaciones para una serie climática de 41 años (desde 1980 a 2021) utilizando la base de datos climática de las estaciones experimentales de INIA Salto Grande e INIA La Estanzuela. Con base en los resultados se realizan inferencias que permitan determinar una estrategia con una alta productividad del agua de riego, mejor aprovechamiento de las precipitaciones y mejores márgenes de ingreso.

2. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN MAÍZ, CON DIFERENTES NIVELES DE RIEGO DEFICITARIO, EN CLIMA HÚMEDO



Agrocien- cia Uruguay 2021 | Volume 25 | Number 1 | Article 390

DOI: 10.31285/AGRO.25.390
ISSN 2730-5066

Water productivity in maize, at different levels of deficit irrigation in humid climate

Editor

José A. Terra 
Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Treinta y Tres, Uruguay.

Correspondence

Raquel Hayashi,
rhayashi@fagro.edu.uy

Received 20 Aug 2020
Accepted 20 Dec 2020
Published 07 Apr 2021

Citation

Hayashi R, Dogliotti S. Water productivity in maize, at different levels of deficit irrigation in humid climate. *Agrocien- cia Uruguay* [Internet]. 2021 [cited dd mmm yyyy];25(1):390. Available from: [http://agrocien- ciauruguay.uy/ojs/in- dex.php/agrocien- cia/arte- cle/view/390](http://agrocien- ciauruguay.uy/ojs/index.php/agrocien- cia/arte- cle/view/390)

Productividad del agua en maíz, con diferentes niveles de riego deficitario en clima húmedo

Produtividade da água no milho, com diferentes níveis de irrigação deficitária, em clima úmido

Hayashi, R. ¹; Dogliotti, S. ²

¹*Universidad de la Republica, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay*

²*Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Montevideo, Uruguay*



Abstract

In regions with temperate and humid climate such as Uruguay, irrigation stabilizes and increases the yields of summer crops by supplementing rainfall. Irrigation on demand generates higher water consumption, it affects production system sustainability due to inefficient use of resources and it is environmentally negative (excessive fresh water use and energy for its extraction). It is necessary to evaluate deficit irrigation alternatives that increase the productivity of irrigation water. Therefore, three maximum irrigation depths were evaluated: (T2) 3 mm day⁻¹, (T3) 6 mm day⁻¹, (T4) 9 mm day⁻¹, and (T1) control without irrigation (only receives rainfall), on corn production, in order to define more efficient irrigation strategies. Results indicate responses to different levels of deficit irrigation. When rainfall was higher than average, its poor distribution during the crop cycle generated water deficit at specific times, affecting yield. T1 and T2 did not cover ETC during the Critical Period and grain filling, which caused lower yields. The yields in T3 and T4 were higher and on the three-year average they were significantly different. T3 did not always cover ETC, but the soil reserve and rainfall contributed to cover it, saving almost 20% of irrigation water compared to T4. However, the water productivity indicators (WUE, IWUE) show that T4 is the best irrigation strategy, although it uses less rainfall and soil water reserve.

Keywords: temperate climate, water use efficiency, deficit irrigation, zea mays

Resumen

En regiones de clima templado y húmedo como Uruguay el riego estabiliza y aumenta los rendimientos de los cultivos estivales, suplementando las precipitaciones. El riego a demanda tiene mayor consumo de agua, afectando la sostenibilidad del sistema de producción por el uso ineficiente de los recursos, y es ambientalmente negativo (uso excesivo de agua dulce y energía para su extracción). Es necesario evaluar alternativas de riego deficitario que aumenten la productividad del agua riego. Para ello se evaluaron tres láminas máximas de reposición: (T2) 3 mm día⁻¹, (T3) 6 mm día⁻¹, (T4) 9 mm día⁻¹, y (T1) testigo sin riego, (solo agua de lluvia), sobre la producción de maíz, para definir estrategias de riego más eficientes. Los resultados indican que existe respuesta a diferentes niveles de riego deficitario. Cuando las precipitaciones fueron superiores al promedio, su mala distribución durante el ciclo del cultivo generó déficit hídrico en momentos puntuales, afectando el rendimiento. El T1 y T2 no cubrieron la ETC durante el Periodo Crítico y llenado de grano, causando menores rendimientos. El T3 y T4 dieron rendimientos mayores y en el promedio de tres años fueron diferentes significativamente. El T3 no siempre cubrió la ETC, pero la reserva del suelo y las precipitaciones contribuyeron para cubrirlo, ahorrando casi 20 % de agua de riego respecto a T4. Sin embargo, los indicadores de productividad del agua (EUA, EUAR) muestran que T4 es mejor estrategia de riego, aunque realice menor aprovechamiento de las precipitaciones y del agua del suelo.

Palabras clave: clima templado, eficiencia uso del agua, riego deficitario, zea mays

Resumo

Em regiões climáticas temperadas e úmidas, como o Uruguai, a irrigação estabiliza e aumenta a produtividade nas culturas de verão, suplementando as chuvas. A irrigação sob demanda gera maior consumo de água, afeta a sustentabilidade dos sistemas de produção devido ao uso ineficiente dos recursos e é ambientalmente negativa (uso excessivo de água doce e energia para sua extração). É necessário avaliar alternativas de irrigação deficitária que aumentem a produtividade da água utilizada na irrigação. Para isso, três lâminas de irrigação máximas foram avaliadas: (T2) 3 mm dia⁻¹, (T3) 6 mm dia⁻¹, (T4) 9 mm dia⁻¹ e (T1) controle sem irrigação, (apenas água da chuva), na produção de milho, para definir estratégias de irrigação mais eficientes. Os resultados indicam que há uma resposta a diferentes níveis de déficit de irrigação. Quando as chuvas eram superiores à média, sua má distribuição durante o ciclo da cultura gerava déficit hídrico em momentos específicos,



afetando a produtividade. T1 e T2 não cobriram a ET_c durante o período crítico e enchimento de grãos, causando menores rendimentos. T3 e T4 deram rendimentos mais elevados e na média de três anos foram significativamente diferentes. Nem sempre o T3 cobriu a ET_c , mas a reserva de solo e a chuva contribuíram para cobri-la, economizando quase 20% da água de irrigação em relação ao T4. No entanto, os indicadores de produtividade da água (EUA, EUAR) mostram que o T4 é a melhor estratégia de irrigação, embora faça menos uso da chuva e da água do solo.

Palavras-chave: clima temperado, eficiência uso de água, irrigação deficitária, *zea mays*

1. Introduction

Different studies estimate a 70% increase in the demand for food in the next 30 years⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾. One of the strategies to meet this demand is to increase productivity and yield stability in current agricultural areas, avoiding their expansion⁽⁴⁾. Increasing the irrigated area and water use efficiency could increase and stabilize yields in many parts of the world⁽⁵⁾.

The complete crop irrigation achieves yields close to the potential, in the absence of limiting factors. However, this practice is questioned due to the volume of water required, the negative effects on the environment⁽⁶⁾ and the high irrigation costs. Deficit irrigation arises, worldwide, from the need to save water in the face of current and future scenarios of scarcity and competition for this resource⁽⁷⁾, apart from reducing investment and operation costs of irrigation equipment⁽⁸⁾⁽⁹⁾. Deficit irrigation improves the sustainability of the production system by increasing the water use efficiency, profiting from rainfall and reducing the water extracted for irrigation, without significantly affecting crop yields and increasing the producer's income⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.

The design of an irrigation equipment starts when defining the daily irrigation depth to replace, determining the pumping flow rate, the hydraulic design and its operation costs⁽⁶⁾. It is the main decision of the equipment design that the producer must consider when investing. Irrigation with Central Pivot is one of the most extended in the region and the initial investment and operation costs depend on the maximum depth they apply. Low maximum depths significantly reduce the investment and the operation costs, but they increase the risk of not covering the hydric demand of the crop, especially in the critical period, causing significant yield losses.

In Uruguay, maize (*Zea mays L.*) is one of the main summer crops due to the export and internal market volumes⁽¹²⁾. It presents high potential for biomass production and grain yield, although it is limited by environmental requirements, mainly water availability⁽¹⁾. Uruguay's agroecological conditions, temperate and humid climate, with erratic rainfall throughout the year and soils with low water storage capacity, determine a great breach between rainfed yields compared to those achieved with irrigation⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾, with great variability between years. Irrigation must supplement rainfall to regulate yields and reduce the interannual variability, avoiding this deficit.

In this study, three maximum irrigation depths were evaluated on the productive behavior of corn for grain and on the productivity of the applied water. This way of applying irrigation means that at the beginning of the crop cycle all treatments provide the same amount of water, covering the evapotranspiration of the crop (ET_c). As the crop grows and the demand increases, treatments with lower maximum depth cannot meet the total crop demand any longer. The water deficiencies accumulated in the soil make the treatments differ in the maximum uptake stage of the crop.

This study evaluated the response of maize to rainfed and different irrigation regimes. The specific objectives were to quantify maize yield in response to irrigation and actual evapotranspiration, quantify the effect of limited irrigation on grain yield, biomass production, harvest index, and determine the level of irrigation that results in maximum water productivity for maize in humid climate conditions in southern Uruguay.



2. Material and methods

2.1 Experimental site

The experiments were installed in the experimental field of the Agronomy School, South Regional Center, Canelones, Uruguay (34°37' S and 56°13' W), in 2014-15, 2015-16 and 2016-17 seasons.

According to the Koppen and Geiger classification, the climate is temperate/mesothermic, with no dry season and hot summer (Cfa). Average annual rainfall is 1200 mm with high interannual variability and annual irregularity, determining water deficit events mainly in the summer, in several years. The average summer temperature varies between 18 and 23 °C, while the average radiation varies between 400 and 580 cal cm⁻² day⁻¹, with an average humidity of 72%.

Typic Eutric Brunosol Lac. soil is predominant from the Tala Rodríguez Soil Unit, corresponding to Typic Argiudol according to the USDA taxonomic classification. Table 1 presents information of its hydric properties.

Table 1. Soil water and physical characteristics

Depth. cm	FC vol%	PWP vol%	BD gr cm ⁻³	AW mm/horiz
0-20	38.9	22.5	1.25	32.8
20-40	43.6	25.1	1.43	37.0
40-60	38.6	21.4	1.43	34.4
60-85	38.4	21.4	1.40	42.5

FC: Field Capacity; PWP: Permanent Wilting Point; BD: Bulk Density; AW: Available Water; vol%: volumetric percentage

The soil infiltration rate was 8.8 mm h⁻¹, measured with the double ring method with humidity corresponding to the 50% of AW depletion (threshold).

2.2 Experimental design

A complete block design with randomized plots was used for the experiment, with 4 treatments and 4 replications. Plots measured 12x6 m, with 12 rows separated by 0.50 m, with no space between plots,

to avoid edge effects that could alter the microclimatic conditions within the experiment (oasis effect). The total experimental area was of 1152 m².

The treatments were: T1: rainfed, only rainfall; T2: maximum depth 3 mm day⁻¹; T3: maximum depth 6 mm day⁻¹, and T4: maximum depth 9 mm day⁻¹; hereinafter, rainfed, 3 mm, 6 mm and 9 mm.

Each treatment indicates the maximum daily irrigation replacement capacity. If the hydric demand of the crop is greater than these depths, irrigation will begin to be deficient, generating different levels of deficit irrigation in different phenological stages of the crop.

2.3 Crop management

A high potential maize hybrid was selected based on the national cultivar evaluation carried out by the National Seed Institute (INASE by its Spanish acronym). The sowing dates were November 6, 2014, October 30, 2015 and November 9, 2016. Direct sowing was carried out, with rows 0.50 m apart and approximately 0.15 m between plants, the target population was 100 thousand plants ha⁻¹. Herbicide was applied before and after sowing to avoid weed appearance. To avoid nutritional restrictions, the sowing was fertilized with 78 kg ha⁻¹ of N and 200 kg ha⁻¹ of P₂O₅, using Diammonium Phosphate (18-46-0) as fertilizer, and V6 was refertilized with 150 kg ha⁻¹ of N using Urea as source.

Drip irrigation was used, with independent management of each treatment (irrigation time) and with pressure limiters to achieve great uniformity. A drip irrigation pipe per row was used, with drippers of 4 l h⁻¹ separated by 1.0 m, in a triangular pattern for better water distribution. The application rate was of 8 mm h⁻¹, according to the soil infiltration rate. The uniformity coefficient (UC) of the equipment⁽¹⁵⁾ was measured and it was higher than 90% in all seasons. Irrigations were carried out two or three times per week, applying the water corresponding to the total needs of the previous days, until the maximum allowed in each treatment.

2.4 Water balance (WB)

The WB began with the soil at field capacity (FC), condition obtained by considering precipitations (PP) previous to sowing or with irrigations by portable



sprinklers. In addition, this guaranteed the emergence of the crop.

The FAO 56⁽¹⁶⁾ methodology was followed, considering the irrigation and the effective precipitation (PPef.) as inputs, and the adjusted ETC (ETC adj.) as output and considering the storage capacity of available water of the soil. Climatic data were taken from the meteorological station of the INIA Las Brujas Experimental Station, located 12 km from the trial. The PP were measured locally with a rain gauge in the trial, placed in compliance with standardization norms.

The ETC adj. was calculated daily (equation 1), being the crop coefficients (Kc) those recommended by FAO 56⁽¹⁶⁾ since local information is not available.

$$\text{ETC adj} = \text{ETO} * \text{Ks} * \text{Kc} \quad \text{Eq. 1}$$

Where ETC adj. is ETC adjusted (mm day⁻¹), ETO is the evapotranspiration of the reference crop⁽¹⁶⁾ and Ks is the stress coefficient⁽¹⁶⁾

$$K_s = \frac{\text{TAW} - D_r}{(1-p)\text{TAW}} \quad \text{Eq. 2}$$

Where TAW is the Total Available Water in the root zone (mm), D_r is the humidity depletion in the root zone (mm) and "p" is the fraction of the TAW that the crop can extract without suffering water stress (threshold).

The D_r is the water deficit generated by the extraction of the crop, equivalent to the accumulated ETC adj, not covered by irrigation or PP, when both are scarce. TAW is the water that the crop can extract based on the soil, root depth and growth. For the soil of the experimental site and the crop, a depth of 0.60 m was defined.

The p values of FAO 56⁽¹⁶⁾ were adjusted by ETC, according to the equation, $p = p_{\text{table}} + 0.04 \times (5 - \text{ETC})$. For corn, p is 0.55, and it was adjusted when ETC exceeded 5 mm day⁻¹. The TAW adjusted by p determines the Readily Available Water in the root zone (RAW), water in the soil that the crop can easily extract without undergoing water stress.

PPef. was estimated by considering the D_r when the PP occurs, and the necessary mm to cover the D_r were effective. The water content between FC and saturation in the first 20 cm of the soil was of 28 mm. When the PP exceeded the water deficit by 28 mm, the top horizon was considered saturated, and 48 to 72 h of natural drainage were allowed so as to soil moisture return to FC. To corroborate the soil moisture, a field control with a drill was carried out. PP lower than 20% of the ETO were discarded⁽¹⁶⁾.

Irrigation needs were estimated by adjusting the value of ETC adj. by the UC of the equipment and the Application Efficiency (AE) of the irrigation method, obtaining the total irrigation needs. An AE of 100% was considered due to the fact that reduced depths were managed with an application intensity according to the soil infiltration rate, without losses due to surface runoff or deep percolation, with the applied water retained in the root depth.

Soil moisture was measured two to three times a week during the crop cycle, with neutron probe (CPN 503-DR Hydrprobe), the first two seasons, and capacitance probe (FDR, Delta T Devices, PR2) in the last season. Access tubes for the probes were installed up to one meter deep and were calibrated for each experimental soil horizon.

2.5 Crop development

Crop phenology was carried out based on plant observation, using the scale of Ritchie and Hanway⁽¹⁷⁾.

One of the key stages in the definition of the corn yield is the Critical Period (CP), between 15 days before the beginning of female flowering (R1) and 15 days after it.

In the second and third season of the experiment the evolution of the biomass and the crop growth rate (CGR) were evaluated. Approximately every 30 days, a linear meter of plants was cut from the central part of each plot and dried in a stove at 60 °C until constant weight.

2.6 Yield

The grain yield was evaluated by manually harvesting three subsamples of 2 m² each, in the five central rows of each plot. Grain yield, total dry matter



and weight of 1000 grains were measured. The harvest index (HI) was estimated as: dry grain weight/total dry matter.

2.7 Performance indicators. Crop water use efficiency

The performance or productivity of a crop is difficult to determine with a single parameter, a combination of indices can inform about more suitable management strategies⁽¹⁸⁾. Consumed water use efficiency (CWUE) and irrigation water use efficiency (IWUE) are two variables commonly used to evaluate management strategies and are calculated as:

$$CWUE(kg\ m^{-3}) = \frac{Yield\ (kg\ ha^{-1})}{ETc\ adj\ (m^{-3}\ ha^{-1})} \quad Eq. 3$$

This equation does not consider the role of irrigation. There are other expressions that can discriminate the role of irrigation in the WUE⁽¹⁹⁾. Those expressions are the following:

$$WUE = (Yield_i - Yield_0) / (ETc_i - ETc_0) \quad Eq. 4$$

$$IWUE = (Yield_i - Yield_0) / I \quad Eq. 5$$

Where:

CWUE: Use efficiency of consumed water the crop related to ETC adj. (Kg m⁻³)

Yield_i: Yield irrigation (Kg ha⁻¹)

Yield₀: Yield rainfed (Kg ha⁻¹)

ETC_i: ETC_{adj} irrigation (m³)

ETC₀: ETC rainfed (m³)

IWUE: Irrigation Water Use efficiency (Kg m⁻³)

I: Irrigation (mm)

To evaluate the effect of deficit irrigation on yield, a deficit irrigation stress index (DISI) was calculated⁽²⁰⁾.

$$DISI = (Yield_i - Yield_0) / Yield_r \quad Eq. 6$$

2.8 Statistical analysis

Data were analyzed using the statistical package Infostat⁽²¹⁾. Means were separated using Fisher's test ($p \leq 0.05$ between means) to detect differences between treatments for grain yield, biomass and harvest index.

2.9 Transparency of data

Available data: The entire data set that supports the results of this study was published in the article itself.

3. Results

3.1 Climatic characterization

The atmospheric demand in all the cycle was superior to the average in the two first seasons. The biggest difference was in February, coinciding with the grain filling stage. The third season was below the average throughout the cycle and the ETo of each month were the lowest in the last 38 years (Figure 1a). The PP accumulated in the cycle were 327, 295 and 483 mm in the 2014-15, 2015-16 and 2016-17 seasons, respectively, with a strong concentration in December and January, in the last season (Figure 1b).

3.2 Grain yield

A significant effect of the treatments was observed in the yield (Table 2). Treatments 6 and 9 mm did not show significant differences between them in two of the three years, same as the treatments 3 and 6 mm in the three years of evaluation. However, there was a difference between the most irrigated treatments (6 and 9 mm) and the rainfed in the three years evaluated, and between 3 and 9 mm in two of the years. The joint analysis of the three years of evaluation showed significant differences between all the treatments. If we compare the yield of 6 and 9 mm, the difference was 7%, while this difference was almost 20% when comparing 3 and 9 mm.

The 2015-16 season, with fewer PP in the CP and different stress levels in the treatments, determined by the water content in the soil, presented no significant differences between the yields, as expected.



Figure 1. a) Average E_{To} (mm month⁻¹), b) Average PP (mm month⁻¹) of the trial years and for a series of 38 years. The superior bar indicates stages of the corn phenology

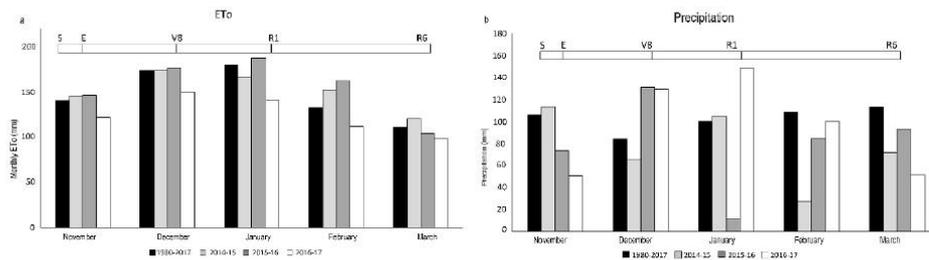


Table 2. Grain yield and average for the three years of evaluation. Grain moisture corrected to 14%

	2014-15 Kg ha ⁻¹	2015-16 Kg ha ⁻¹	2016-17 Kg ha ⁻¹	Average Kg ha ⁻¹
Rainfed	12786 c	9323 b	13364 c	11824 d
3 mm	13616 bc	12917 a	14818 bc	13784 c
6 mm	15379 b	14247 a	16103 ab	15243 b
9 mm	17466 a	14665 a	17108 a	16413 a
Mean	14812	12788	15348	14316
Coeff. Var (%)	14	19.7	14.2	17.3

Numbers with the same letters do not differ significantly from each other ($p > 0.05$)

3.3 Biomass production and harvest index

During the 2015-16 and 2016-17 seasons, biomass production was evaluated. The high variability of data did not allow to differentiate the treatments; however, it is worth highlighting the high yields obtained, around 30 t ha⁻¹ in the irrigated treatments and 18 t ha⁻¹ in the rainfed.

In the last season, PP determined a high biomass production between 26 and 31 t ha⁻¹, in all the treatments, including the rainfed.

A HI of 0.50 in the rainfed treatment did not vary between years. Moreover, the year with more PP (2016-17) presented higher index values in the irrigated treatments, 0.52 for the 3- and 6-mm treatments and 0.56 for the 9-mm treatment.

3.4 Water balance

3.4.1 Adjusted evapotranspiration of the crop

The average K_s from emergence to the beginning of the CP was close to 1 in all treatments and all seasons, indicating that water availability was not limiting in this stage. During the CP and grain filling the K_s was lower than 1 in the rainfed in all seasons, and only in the 2014-15 and 2015-16 seasons in the 3 mm treatment. For the 6- and 9-mm treatments the average K_s was close to 1 in all phenological stages, in the three crop seasons (Table 3).

All the treatments received in the vegetative stage almost the totality of the water needs, and the differences started as of the CP with a low to moderate level ($0.5 \leq K_s \leq 0.75$) in the rainfed and 3 mm.



Later, in grain filling, stress was severe ($K_s < 0.5$) in rainfed and moderate in 3 mm. The 6 mm and 9 mm treatments were not affected.

The total water consumption of the crop, from irrigation, PP_{ef} , and variation in the soil water content, agreed with the ETC_{adj} , estimated through the FAO

56⁽¹⁶⁾ method, in the three seasons and the four treatments, indicating that the WB with the method applied in this study was adequate for the irrigation management, both in conditions of full irrigation and deficit irrigation (Table 4).

Table 3. Average K_s at different phenological stages. E-CP: Emergence to Critical Period, CP: Critical Period, and Grain Filling (GF): from CP to Physiological Maturity

	2014-15			2015-16			2016-17		
	E-CP	CP	GF	E-CP	CP	GF	E-CP	CP	GF
Rainfed	0.95	0.63	0.45	1.00	0.64	0.43	1.00	0.89	0.82
3 mm	0.96	0.73	0.71	1.00	0.80	0.68	1.00	1.00	0.96
6 mm	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	0.96	1.00	1.00	1.00
9 mm	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table 4. Adjusted ETC (mm) and Total Water consumed (mm) in growing cycle

	ETC adj (mm)			Total Water (mm per cycle)		
	2014-15	2015-16	2016-17	2014-15	2015-16	2016-17
Rainfed	364	378	452	363	372	468
3 mm	432	464	495	482	457	491
6 mm	565	570	504	561	569	504
9 mm	566	589	504	570	586	504

3.4.2 Applied irrigation and effective precipitation

Irrigation for the maximum yields (6 and 9 mm) varied between 173 mm and 422 mm depending on the PP and the ETC of the year, corresponding to 36 and 72% of the ETC , respectively (Table 5).

The PP_{ef} was higher in rainfed and 3 mm, with a usage between 62 and 83% of the PP_t . In 6 and 9

mm, the effectiveness of rainfall was lower, between 43 and 72%. These were less effective in the year with more PP , of 66% on average and the difference between treatments was smaller.



Table 5. Applied irrigation (mm), PPef. (mm) and percentage with respect to total PP

	2014-15		2015-16		2016-17	
	ETc: 566 PPt: 327		ETc: 589 PPt: 295		ETc: 504 PPt: 483	
	Irrigation	PPef. mm (%)	Irrigation	PPef. mm (%)	Irrigation	PPef. mm (%)
T1		254 (78)		245 (83)	30*	363 (75)
T2	173	253 (77)	191	183 (62)	122	316 (65)
T3	313	235 (72)	337	171 (58)	173	298 (62)
T4	385	172 (53)	422	127 (43)	181	290 (60)

ETc: ETc without water stress, PPt: Total precipitation in the crop cycle, PPef.: Effective precipitation

*Irrigation to ensure the crop's implantation

3.4.3 Soil moisture evolution

In rainfed and 3 mm, the total water in the root depth decreased below the threshold during the CP, indicating that the maximum daily dose of 3 mm was insufficient to keep the crop in hydric comfort, even in the 2016-17 season with PP above the average.

The evolution of the total water in 6 and 9 mm were similar to each other in the first and last season. Nevertheless, in the second season, there were few PP in January (11 mm total) and the water content in the soil, in 6 mm, dropped to the threshold and remained unchanged for approximately 20 days, coinciding with the CP and the grain filling. However, 9 mm was in hydric comfort throughout the cycle (Figure 2).

In 2014-15 and 2015-16, the rainfed and 3 mm, maintained the soil water content below the threshold during the grain filling stage, until R4-R5. In this moment the PP recharged the soil up to the threshold level in 3 mm, but were not sufficient for the rainfed (Figure 2).

3.5 Indicators of water use efficiency

The WUE that indicates the productivity of the marginal water with respect to the rainfed was greater in 9 mm, in the years with average PP or more. However, all the indicators were greater in 3 mm in the year with fewer PP, possibly associated to a greater effectiveness of that year's PP (Table 6).

The CWUE in 2014-15 was greater in the rainfed, indicating the importance of the PP contribution, that was 78% effective in this treatment. In 2016-17, the PP effectiveness was also high, nevertheless, its distribution was not adequate and water deficit situations occurred during the CP in the rainfed and 3 mm, affecting CWUE.

IWUE indicates the yield increase over the rainfed by irrigation volume applied. It shows that the 3 mm was more efficient in the use of irrigation in the driest year, whereas in the other years the 9 mm treatment was more efficient.

The DISI increased with the stress level, being higher every year in rainfed, followed by 3 mm and 6 mm.



Figure 2. Evolution of the total water contents, for a root depth of 0.60 m for the three evaluated seasons. Total PP, irrigation threshold and FC (total mm). The superior bar indicates phenological stages of the crop

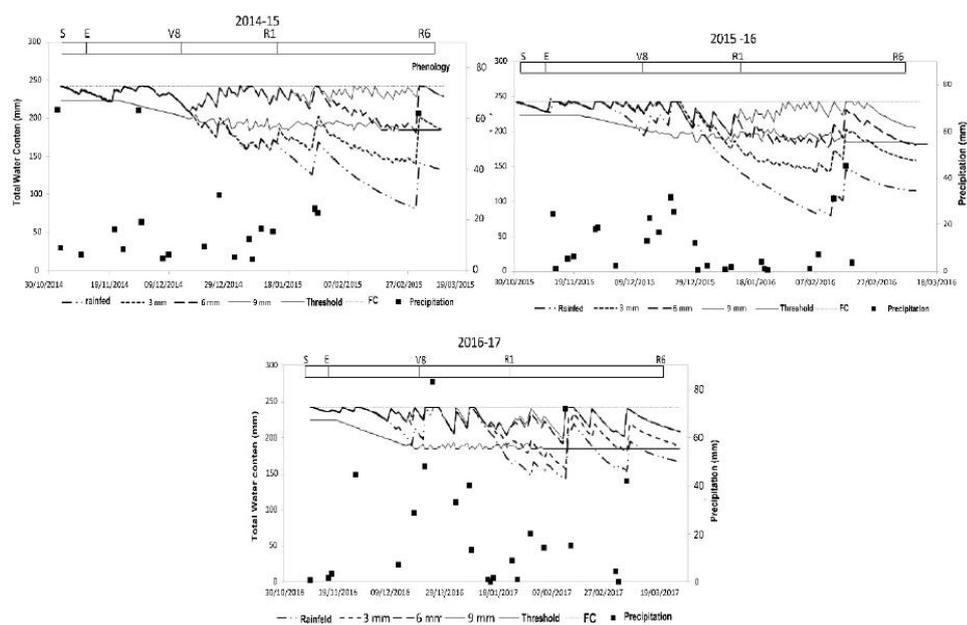


Table 6. Performance indicators of irrigation: consumed water use efficiency (CWUE), water use efficiency (WUE), irrigation water use efficiency (IWUE), and deficit irrigation stress index (DISI). Yield was adjusted to a grain moisture of 14%

	CWUE: (Kg m ⁻³)			WUE (Kg m ⁻³)			IWUE: (Kg m ⁻³)			DISI (t ⁻¹)			Mean
	2014-15	2015-16	2016-17	2014-15	2015-16	2016-17	2014-15	2015-16	2016-17	2014-15	2015-16	2016-17	
T1	3.51	2.47	2.96							26.8	36.4	21.9	28.4
T2	3.11	2.78	3.00	1.12	4.20	3.40	0.48	1.88	1.19	22	12	13.4	15.8
T3	2.72	2.50	3.19	1.29	2.57	5.23	0.83	1.46	1.58	12	2.85	5.9	6.92
T4	3.09	2.49	3.39	2.31	2.54	7.15	1.22	1.26	2.07				

4. Discussion

The average ETo in January was of 5.4, 6.1 and 4.6 mm day⁻¹ for 2015, 2016 and 2017, respectively, and it was of 5.8 mm day⁻¹ with a maximum of

7.0 mm day⁻¹ for the historical series from 1980 to 2017. Considering the average ETo, the ETc for the equipment design will be 6.96 mm day⁻¹. If considering a global efficiency of the irrigation method



around 85% for irrigation with central pivot⁽²²⁾, the value amounts to 8.19 mm day⁻¹.

The contribution of PP determined an average yield of almost 12 t ha⁻¹ in rainfed, significantly higher than the local commercial yields, that reached the historical record in the 2018-19 harvest of 7.6 t ha⁻¹⁽¹²⁾. Maximum yields in 6 and 9 mm agree with those mentioned by several researchers⁽¹⁸⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾, who report yields of 19 t ha⁻¹. At regional level, in competitions of rainfed maize yields, maximums of 17.5 t ha⁻¹⁽²⁶⁾ were obtained; in addition, Rivetti A.⁽²⁷⁾ indicates rainfed yields between 10 and 13.4 t ha⁻¹ with average rainfall of 550 mm. The trial yields are consistent with those obtained in regional research, in similar climatic conditions.

The treatments effect was associated to the moment and intensity of the water deficit. The rainfed and 3 mm depended on PP, both in terms of quantity and moment of occurrence. The rainfed treatment significantly differed from the 9 mm in every evaluation year, even in the season with PP of 483 mm during the crop cycle. In this year, the rainfed yielded significantly lower than 9 mm due to PP of great volume and badly distributed in the growth season, generating water stress conditions in the CP and grain filling.

Considering the scenarios elaborated by the Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC), the main consequences of climatic change in Uruguay will be a greater frequency and intensity of extreme events⁽²⁸⁾. Some projections indicate that PP will increase in the months of summer-autumn and decrease in winter-spring in the region where Uruguay is located, with an increase in the interannual variability⁽²⁹⁾. This indicates that the rainfall volumes would be sufficient to cover the water needs of the crops, but its bad distribution will generate occasional deficits in the crop phenological cycle, similarly to the third season of this experiment. These climatic scenarios add complexity to the irrigation management and the decision-making at the time of designing the equipment. The interannual rainfall variability will continue generating yield instability⁽³⁾ and irrigation is the only tool to stabilize them. Therefore the use of supplementary irrigation is recommendable in crop conditions in humid climates to

avoid the significant impact of water stress on yield decrease and to stabilize interannual yields⁽²⁴⁾⁽³⁰⁾.

The average of the three seasons showed significant differences regarding the level of deficit irrigation as the applied water increased. Nevertheless, 6- and 9-mm treatments profited less from the PP (Table 6) and RAW, since there were still 20 to 40 mm in the root zone at the end of the crop cycle. In production systems that make a more efficient use of the resources, increasing the water productivity implies profiting more from the PP and the ground water. According to Etter⁽³¹⁾, sustainable agriculture is capable of producing by using the minimum inputs, but at the same time guaranteeing long-term stable production levels, having positive socio-economic and biophysical results.

The 6-mm treatment did not have significant differences with 9 mm in the second dry summer season and in the third wet summer season, however, it used the total RAW and made better use of the PP, with 20% less irrigation water. Although 3 mm did not differ from 6 mm, in two of three seasons it was statistically different from 9 mm. It stands out that there were no differences between the irrigated treatments in the dry year. The evolution of the total soil water content indicated different stress levels, nevertheless, this was not reflected in the yields, as expected.

In temperate climates⁽²⁴⁾, it is necessary to irrigate with 100% of the demand to obtain elevated corn yields, nevertheless a 25% deficit would be a good irrigation strategy to increase the water use efficiency when full irrigation is not possible. In the second season of this study, there was a 20% water saving while 6 and 9 mm did not differ in yield. In this same season with 3 mm the saving was of 55%, however, the yield of this treatment was significantly lower than the 9 mm, in two of three seasons.

The 3 mm treatment used the RAW of the soil to compensate for the limited irrigation and cover the water needs in early stages, in years with PP close to average. However, this was depleted at the end of the vegetative stage and the 3 mm per day were not enough, the soil moisture level decreased below the threshold ($K_s < 1$) during the CP and grain filling. This determined lower yields in 3 mm compared to 9 mm



(20% less). The bibliography cites a higher percentage of yield reduction, according to Comas and others⁽⁷⁾, plants that received all or almost all the water during the vegetative period followed by moderate stress in the CP and severe in grain filling have significant yield reduction, higher than the ETC saved. Trout⁽²⁵⁾ reported that corn crops that received between 40 and 55% of their water requirement reduced their yield by around 30%.

The production of aerial biomass was coincident with the obtained by Kresovic and others⁽²⁴⁾, who obtained yields of 31 t ha⁻¹ with complete irrigation and 20 t ha⁻¹ in rainfed, working in similar climatic conditions.

The harvest index agrees with the obtained by Yazar and others⁽³²⁾, that reported values between 0.51 and 0.57 in different irrigation regimes, but did not affect them significantly. Djaman and others⁽³⁰⁾ report, in trials in subhumid to semi-arid climates, HI between 0.49 in rainfed to 0.57 in deficit treatment (60% of full irrigation), with a trial average of 0.54, without significant differences between treatments. In addition, they indicate that more than 60% of the total transpiration from irrigation treatments contributes to the production of plant biomass. Along the same line, Trout and others⁽²⁵⁾ indicate that the HI decreases both due to high deficits or maximum ETC. In addition, maximum ETC conditions could result in excessive plant growth and reduce HI. The relationship between HI and ETC depends on the moment of water stress, which decreases the yield and HI in the CP. The reduction of ETC in noncritical periods could increase HI by reducing the plant biomass without equivalently reducing the yield⁽²⁵⁾⁽³⁰⁾.

Regarding the irrigation performance indicators, the WUE estimated from the incremental yield by the irrigation aggregate is greater to the range reported by Doorembos and others⁽³³⁾, which was between 0.80 and 1.6 kg m⁻³. Nevertheless, González and others⁽³⁴⁾ reported values between 0.86 and 2.9 kg m⁻³ in Cuba. These last researchers also indicate that the use efficiency of irrigation water, estimated as the crop yield in relation to the irrigation water applied, would not be a good indicator of the efficient use of water, since the PP make an important contribution to the needs of the crop and in some cases, they cover more than 50% of the ETC in wet

years. They recommend to consider the use efficiency of the total consumed water (CWUE) as indicator, that include the effective precipitations.

In this trial, the CWUE was higher in the most irrigated treatments in the third season (3.39 kg m⁻³), while in the second season (dry year) the CWUE was higher for 3 mm followed by 6 and 9 mm (2.78, 2.50 and 2.49 kg m⁻³ respectively). Regarding the first year, the CWUE was greater in the rainfed (3.51 kg m⁻³), followed by 3mm and 9mm (3.11 and 3.09 kg m⁻³). Bibliography cited similar results, from 2.14 to 3.99 kg m⁻³⁽³⁵⁾, from 2.37 to 3.90 kg m⁻³ under irrigation conditions and from 2.42 to 3.35 kg m⁻³ in rainfed, in humid climate⁽²⁴⁾. These last authors indicate greater CWUE in full irrigation than in deficit irrigations when the year was drier and conversely in more humid years, similar to this trial's behavior. Other authors indicate lower CWUE values, between 1.6 to 2.2 kg m⁻³ for irrigated crops and 1.2 to 1.4 kg m⁻³ in rainfed crops in a regional study in Nebraska⁽³⁶⁾, values of 1.16 to 2.34 kg m⁻³ being higher in the irrigated treatments⁽¹⁸⁾.

The CWUE does not consider the role of irrigation⁽¹⁹⁾, however WUE and IWUE discriminate the effect of irrigation when considering the yields obtained over the rainfed yield, divided by the difference of net ET of the irrigated crop. The IWUE results, which ranged from 0.48 to 2.07 kg m⁻³, were inferior to those of Kresovic and others⁽²⁴⁾ (1.89 to 3.61 kg m⁻³) and within the range indicated by Rudnick and others⁽¹⁸⁾, between 0.94 and 4.58 kg m⁻³, in treatments with 60% of the ETC of the well irrigated. Although in the wet year IWUE increased with the increase of applied water, in the dry year the behavior was inverse. This indicates that in the dry year there was a smaller percentage increase of the yield with respect to the increase of the irrigation level. Thus, the applied mm of irrigation were less productive as the amount of applied irrigation increased, in that year.

The deficit irrigation stress index (DISI) increased with the stress level, the average of the three years indicates greater DISI in rainfed than in 3 mm and 6 mm (28.4, 15.8 and 6.92 t⁻¹, respectively), similar to the ones shown by Kresović and others⁽²⁴⁾, with a 32.3 t⁻¹ average in rainfed conditions, 16.8 and 10.06 t⁻¹ in treatments with 50 and 75% of complete irrigation, respectively. The rainfed had a higher



value of this index in the dry year, and lower in the wet year. Nevertheless, 3 and 6 mm had higher indices in the first year, with precipitations close to the average, and lower DISI in the dry year and not in the wet year. Kresović and others⁽²⁴⁾ present the same situation, without detailing the cause of these results, which at first glance are difficult to explain, since a higher index is expected when the deficit is greater, a situation that occurs in rainfed, but not in 3 and 6 mm. The fact that in the dry year there were no significant differences between the irrigated treatments results in lower DISI values. Furthermore, in the wettest year the differences in yield were significant and that meant greater differences between the treatments and greater DISI values. What is the reason for the lack of response to the irrigated treatments in the dry year, in which a greater differentiation between treatments was expected, but did not occur? Possibly, a greater root exploration of the crop in 3 and 6 mm, added to the precipitations that occurred before the CP which were higher than the historical average (130 and 84 mm respectively), allowing the recharge of the soil beyond of the estimated root depth. These two facts could have allowed the normal development of the crop in its critical stage, or with mild stress levels, where 3 and 6 mm extracted water to greater depth, while the 9 mm used irrigation and RAW water with no need to deepen.

The 9 mm treatment achieved higher WUE and IWUE in two out of three seasons, indicating this is a water-use-efficient alternative. Nevertheless, it did not profit from precipitations as much, which must be considered when managing irrigation in wet climates.

Based on the obtained results, although the average of the evaluated years indicates a better performance of the 9 mm treatment, an economic analysis that allows to define the most profitable option is necessary. The best option for the crop is 9 mm day⁻¹, nevertheless, the investment and operation costs of an irrigation equipment of these characteristics are higher than those of an equipment that applies 6 mm day⁻¹. On the other hand, the 6 mm day⁻¹ treatment is more efficient in profiting from the PP and the water reserve of the soil, as previously mentioned. The 3 mm day⁻¹ treatment would not be recommendable because it puts the crop under water

stress from the beginning of the flowering to the grain filling. Although this was not reflected significantly in this trial's yields, numerous research studies show yields decrease when this situation occurs⁽⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽²⁴⁾⁽³⁰⁾.

Given the climatic variability between years, these results should be modeled by using climatic databases that allow to support the decision when defining the design volume of the irrigation equipment. Also, future climatic databases based on climatic change models can be generated and would be very useful for the designer.

An economic analysis that considers the interannual precipitations variability in terms of amount and moment of occurrence, should be carried out in order to identify the most economically convenient treatment.

5. Conclusions

Results suggest that there is response to different levels of deficit irrigation under Uruguay's climatic conditions. When the average rainfall is higher than the historical average, the poor temporal distribution generates a water deficit at specific times, affecting the yield. The rainfed and 3-mm treatments did not cover the ETC during the CP and grain filling in the three evaluated seasons and determined significant differences in the average yield of the three years. The 6- and 9-mm treatments were adequate, with greater yields, and in the average of the three years they were significantly different. In years with more rainfall than average, 9 mm presented higher WUE and IWUE, indicating that by each mm added, the yield increase was higher compared to the other treatments. However, 6 mm was more efficient in the use of soil water and PP, saving on average 20% of irrigation water. This saving implies fewer pumping hours of a smaller equipment, in terms of power, than the used in the 9-mm treatment.

Acknowledgments

The study was funded by the FSA_1_2013_1_12590 project of ANII (National Agency for Research and Innovation).



Author contribution statement

RH: experiment design, writing, analysis of results, statistical processing, interpretation of results; SD: contribution in writing and in the interpretation of results.

References

1. Lobell DB, Cassman KG, Field CB. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Ann Rev Environ Resour.* 2009;34:179-204.
2. Tilman D, Balzer C, Hill J, Befort BL. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2011;108(50):20260-4.
3. World food and agriculture: Statistical Yearbook 2013. Rome: FAO; 2013. 307p.
4. Keating A, Herrero P, Carberry JS, Gardner J, Cole MB. Food wedges: framing the global food demand and supply challenge towards 2050. *Glob Food Secur.* 2014;3(3-4):125-32.
5. Geerts S, Raes D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agric Water Manag.* 2009;96:1275-84.
6. Fereres E, Soriano MA. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J Exp Bot.* 2007;58(2):147-59.
7. Comas LH, Trout TJ, DeJonge KC, Zhang H, Gleason SM. Water productivity under strategic growth stage-based deficit irrigation in maize. *Agric Water Manag.* 2019;212:433-40.
8. Moreno MA, Medina D, Ortega JF, Tarjuelo JM. Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells. *Agric Water Manag.* 2012;107:12-21.
9. Scardigno A. New solutions to reduce water and energy consumption in crop production: a water energy food nexus perspective. *Curr Opin Environ Sci Health.* 2020;13:11-5.
10. Farre I, Faci JM. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in Mediterranean environment. *Agric Water Manag.* 2009;83:383-94.
11. Gheysari M, Sadeghi SH, Loeschner HW, Amiri S, Zareian MJ, Majidi MM, Asgarinia P, Payero JO. Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize. *Agric Water Manag.* 2017;182:126-38.
12. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, DIEA (UY). Anuario estadístico agropecuario 2019. Montevideo: MGAP; 2019. 256p.
13. Sawchick J, Formoso F. Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. In: *Tecnología de producción de cultivos y pasturas.* Montevideo: INIA; 2000. p. 13-25
14. Cardellino G, Baethgen WE. Análisis de viabilidad de sistemas de riego para maíz: estudio de casos y evaluación de estrategias. In: *Tecnología de producción de cultivos y pasturas.* Montevideo: INIA; 2000. p. 47-55.
15. Merriam JL, Keller J. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Logan (UT): Utah State University; 1978. 275p.
16. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO; 1998. 322p. (FAO Irrigation and Drainage; Paper N° 56).
17. Ritchie SW, Hanway JJ. How a corn plant develops. Iowa: Iowa State University of Science and Technology; 1982. 21p. (Special Report; N° 48).
18. Rudnick DR, Irmak S, West C, Chávez JL, Kisekka I, Marek TH, Schneekloth JP, Mitchell McCallister D, Sharma V, Djaman K, Aguilar J, Schipanski ME, Rogers DH, Schlegel A. Deficit Irrigation Management of Maize in the High Plains Aquifer Region: A Review. *J Am Water Resour Assoc.* 2019;55(1):38-55.
19. Howell TA. Enhancing Water Use Efficiency in Irrigated Agriculture. *Agron J.* 2001;93:281-9.
20. Pandey RK, Maranville JW, Adamou A. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: grain yield and yield components. *Agric Water Manag.* 2000;46(1):1-13.
21. Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG,



- Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. InfoStat [Internet]. Version 2011. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias; 2011 [cited 2020 Dec 22]. Available from: <https://bit.ly/3dDvlyu>.
22. Pereira LS, de Juan JA, Picornell MA, Tarjuelo JM. El Riego y sus Tecnologías. Albacete (ES): Centro Regional de Estudios del Agua; 2010. 296p.
23. Cassman KG, Dobermann AR, Walters DT, Yang H. Meeting Cereal Demand While Protecting Natural Resources and Improving Environmental Quality. *Annu Rev Env Resour*. 2003;28:315-58.
24. Kresović B, Tapanarova A, Tomić Z, Životić L, Vujović D, Sredojević Z, Gajić B. Grain yield and water use efficiency of maize as influenced by different irrigation regimes through sprinkler irrigation under temperate climate. *Agric Water Manag*. 2016;169:34-43.
25. Trout TJ, DeJonge KC. Water productivity of maize in the US high plains. *Irrig Sci*. 2017;35:251-66.
26. Salvagiotti F. Rendimientos potenciales en maíz: brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas. In: Para mejorar la producción. Oliveros: INTA; 2009. p. 61-6. (Para mejorar la producción; 41).
27. Rivetti A. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina: I. Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *Rev Fac Cienc Agrar*. 2006;28(2):25-36.
28. Naciones Unidas, CEPAL. La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: síntesis 2010. Santiago de Chile: UN; 2010. 113p.
29. Cabré MF, Soloman S, Núñez M. Regional climate change scenarios over southern South America for future climate (2080-2099) using the MM5 Mode: mean, interannual variability and uncertainties. *Atmósfera*. 2016;29(1):35-60.
30. Djaman K, Irmak S, Rathje WR, Martin DL, Eisenhauer DE. Maize evapotranspiration, yield production functions, biomass, grain yield, harvest index, and yield response factors under full and limited irrigation. *Trans ASABE*. 2013;56(2):273-93.
31. Etter A. Consideraciones acerca de la agricultura sostenible. *Ambient desarro*. 1993;2(3-4):39-59.
32. Yazar A, Howell TA, Dusek DA, Copeland KS. Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated corn. *Irrig Sci*. 1999;18(4):171-80.
33. Doorembos J, Kassam AH. Yield response to water. Rome: FAO; 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage; Paper 33).
34. González F, Herrera J, López T, Cid G. Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba. *Rev Cie Téc Agr [Internet]*. 2014 [cited 2020 Dec 22];23(4):21-7. Available from: <http://bit.ly/3mIfOWk>.
35. Kang S, Hu X, Pan Y, Shi P. Soil water distribution, uniformity and water use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. *Irrig Sci*. 2000;19:181-90.
36. Irmak S, Sharma V. Large-scale and long-term trends and magnitudes in irrigated and rainfed maize and soybean water productivity: grain yield and evapotranspiration frequency, crop water use efficiency, and production functions. *Trans ASABE*. 2015;58(1):103-20.

3. RIEGO DEFICITARIO EN SOJA, EFECTO SOBRE EL RENDIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN CLIMA TEMPLADO



Agrociencia Uruguay 2021 | Volume 25 | Number 2 | Article 500

DOI: 10.31285/AGRO.25.500

ISSN 2730-5066

**Deficit irrigation in soybeans, the
effect on grain yield and water
productivity in temperate climates**

Editor

Álvaro Otero 
*Instituto Nacional de Investigación
Agropecuaria (INIA), Fisiología de
la planta - Nutrición, Salto,
Uruguay.*

**Riego deficitario en soja, efecto
sobre el rendimiento y la
productividad del agua en clima
templado**

Correspondence

Received 06 Jan 2021
Accepted 02 Aug 2021
Published 01 Oct 2021

Citation

Hayashi R, Dogliotti S. Deficit irrigation in soybeans, the effect on grain yield and water productivity in temperate climates. *Agrociencia Uruguay* [Internet]. 2021 [cited dd mmm yyyy];25(2):e500. Available from: <http://agrocienciauruguay.uy/ojs/index.php/agrociencia/article/view/500>.

**Irrigação deficitária em soja, efeito
sobre a produção de grãos e
produtividade da água em clima
temperado**

Hayashi, R. ¹; Dogliotti, S. ²

¹*Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay*

²*Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Montevideo, Uruguay*



Abstract

In regions with a temperate and humid climate, deficit irrigation improves the profitability and sustainability of production systems, when properly implemented. It is necessary to generate knowledge on the response of crops to deficit irrigation. Aiming to improve the design and management of irrigation equipment used in soybean cultivation in Uruguay, an experiment was proposed where three maximum depths of irrigation replacement (3 mm, 6 mm and 9 mm day⁻¹) and non-irrigated control were evaluated. A randomized complete block design was used, with four treatments and four replications. Drip irrigation was applied, which allowed a good adjustment of the different irrigation depths used and reduced the experimental area. Non-irrigated and 3 mm suffered water stress from V10 to grain filling, producing lower yields. The 6 mm treatment yielded the same as the 9 mm in Year 1, but lower in Year 2. This study indicates that irrigation is necessary when rainfall is less than the average for the region or its distribution is inadequate. The 9 mm treatment showed the highest water productivity (WUE: 0.86 Kg m⁻³) and irrigation (IWUE: 0.54 Kg m⁻³), with less use of rainfall, compared to 6mm.

Keywords: glycine max (L.) Merr; temperate environment, water use efficiency

Resumen

En regiones de clima templado y húmedo los riegos deficitarios mejoran la rentabilidad y la sostenibilidad de los sistemas productivos, cuando son correctamente implementados. Con el objetivo de mejorar el diseño y el manejo de los equipos de riego utilizados en el cultivo de soja en Uruguay, se planteó un ensayo donde se evaluaron tres láminas máximas de reposición (3 mm, 6 mm y 9 mm día⁻¹) y un secano. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. El riego fue aplicado por riego por goteo, que permite un buen ajuste de las diferentes láminas utilizadas y reduce el área experimental. El secano y 3 mm, desde V10 hasta llenado de grano, sufrieron estrés hídrico, con menores rendimientos. El tratamiento de 6 mm rindió igual que 9 mm en el Año 1, pero en el Año 2 fue menor. Este estudio indica que el riego es necesario cuando las precipitaciones son menores al promedio de la zona o la distribución de las mismas es inadecuada. El tratamiento de 9 mm mostró mayor productividad del agua consumida (EUAC: 0.86 Kg m⁻³) y del agua de riego (EUAR: 0,54 Kg m⁻³), con menor aprovechamiento de las precipitaciones, respecto a 6 mm.

Palabras clave: glycine max (L) Merr; clima templado; productividad del agua

Resumo

Em regiões de clima temperado e úmido, a produção agrícola depende da distribuição e da quantidade de chuvas durante o ciclo da cultura. A irrigação deficitária melhora a rentabilidade e sustentabilidade dos sistemas de produção, quando devidamente implementada. É necessário gerar conhecimento sobre a resposta das lavouras ao déficit de irrigação. Com o objetivo de melhorar o projeto e o manejo dos equipamentos de irrigação utilizados no cultivo de soja no Uruguai, foi proposto um ensaio onde foram avaliadas três lâminas máximas de reposição de irrigação (3 mm, 6 mm e 9 mm no dia-1) e um control sem irrigação. Foi utilizado um projeto de bloco completo randomizado com quatro tratamentos e quatro repetições. A irrigação foi aplicada por irrigação por gotejamento, o que permite um bom ajuste das diferentes lâminas utilizadas e reduz a área experimental. O control e a lâmina de 3 mm, da fase V10 até o enchimento de grãos sofreu estresse hídrico dando menores rendimentos. A baixa pluviosidade e a Água Disponível do solo foram insuficientes, bem como a lâmina de irrigação de 3 mm. O tratamento de 6 mm rendeu o mesmo que 9 mm no Ano 1, mas no Ano 2 foi menor. Este estudo indica que a irrigação é necessária quando a precipitação é inferior à média da área ou a sua distribuição é inadequada. O tratamento de 9 mm apresentou maior produtividade da água consumida (EUAC: 0,86 Kg m⁻³) e da água de irrigação (EUAR: 0,54 Kg m⁻³), com menor uso de chuva, em comparação com 6 mm.

Palavras-chave: glycine max (L) Merr; clima temperado; eficiência do uso da água



1. Introduction

Climate change is modifying the rainfall distribution in some regions, with an increase in extreme events⁽¹⁾, being less effective in meeting the crop water demand. Agriculture is highly dependent on climatic conditions, mainly on rainfall, causing great variability in the yields and producers' income. Supplemental irrigation increases and stabilizes production, mainly in years with low rainfall⁽²⁾. However, producers do not invest in irrigation in conditions of humid temperate climate due to production costs and fluctuating prices of soybean and other crops⁽³⁾. In addition, the energetic cost to extract, distribute and apply irrigation water requires evaluating different strategies for optimization⁽⁴⁾. According to Izquier⁽⁵⁾, any strategy that minimizes electricity costs will be accepted, either with tools that optimize the design of water distribution and pumping stations, or by helping the management of the irrigation system.

Limited or deficit irrigation is a more profitable and more environmentally sustainable strategy that improves water productivity, and stabilizes and increases the yield of various crops⁽⁶⁾, with less water use⁽⁷⁾⁽⁸⁾. However, the effectiveness of deficit irrigation to improve production and reduce irrigation costs depends on the availability of information on the response of crop yields to water stress.

Some deficit irrigation strategies are based on meeting the demand during the most sensitive periods of the crop and irrigating in a deficit way in less sensitive stages, Controlled Deficit Irrigation (CDI)⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾; others provide a percentage of ETc throughout the crop cycle, Sustained Deficit Irrigation (SDI)⁽¹⁾⁽³⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾, or combinations of both strategies⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾. These studies report on the response of soybean crops to deficit irrigations; however, they do not indicate the irrigation depth for the design of the irrigation equipment, for each strategy.

Irrigation equipment that fully covers the water requirement of the crop requires higher investment and operating costs. Equipment designed based on average water requirements lower than that of the crop, with lower capacity and irrigation depth applied has the risk of not meeting the demand and could affect the crop yield⁽¹⁶⁾. In arid climate condi-

tions, this probably occurs, however in humid climates with rainfall in the growing season, it will depend on the rainfall characteristics and their timely occurrence. Furthermore, when irrigation is applied at rates below the ETc, the crop uses the soil water reserve to compensate for the deficit.

It is possible to meet the crop demand with equipment that applies irrigation depths below the ETc, if the soil stores enough water and rainfall timely recharges the soil, in this way transpiration will not be affected⁽⁸⁾. For this, soils must have good water storage capacity, which may not happen in Uruguay's conditions⁽¹⁷⁾. Therefore, it is necessary to evaluate the effect of different irrigation depths on the response of the soybean crop that allow defining the dimensioning or design of the irrigation equipment.

Soybean is the main summer crop in Uruguay and it is mostly rainfed; however, the yield gap compared to those with supplementary irrigation is very wide. Irrigation can duplicate the yields in years with water deficit and in years with abundant rainfall in the growing season, it may increase the yield 30% above the rainfed crops⁽¹⁸⁾. The average soybean yields of the last 15 years in Uruguay are around 2.0 t ha⁻¹ in commercial rainfed crops. With irrigation, the data of the last 5 years indicate an average of 3.4 t ha⁻¹ with a yield increase between 18 to 137% compared to rainfed⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾. In the United States, one of the main soybeans producing countries, the average yields vary between 2.9 and 3.9 t ha⁻¹ in non-irrigated and irrigated commercial crops, respectively, while at the experimental level the maximum yields are between 6.0 and 7.0 t ha⁻¹⁽²³⁾.

The rainfall regime in this region does not allow a constant supply of water⁽²⁴⁾, generating conditions of water deficit during the crop growth, limiting potential and stable yields⁽²⁵⁾.

This study aims to evaluate the use of different maximum daily irrigation depths on soybean production in southern Uruguay. The different irrigation depths applied will determine a differential use of rainfall, and lower irrigation water requirements, affecting irrigation operating costs. Each irrigation depth simulates the effect of irrigation equipment designed to apply said depths. Applying irrigation in this way allows covering the water requirements of the early



stages, which are lower, with irrigation or rainfall. As the crop grows, along with its water consumption, the smaller irrigation depths will stop meeting the demand and the crop will make use of the limited reserve of the soil. As of that moment, different levels of water depletion will occur even below the threshold. Upon reaching the critical period and depending on rainfall, the different treatments will have different moisture content in the soil, generating different levels of water stress in the plant.

This study focuses on improving the design and management of irrigation equipment used in soybean, improving the efficiency of water use in soybean production in Uruguay.

2. Material and methods

2.1 Experimental site

Soybean cultivation was established in the experimental field of the Agronomy School, South Regional Center, Canelones, Uruguay (34°37'S and 56°13'W), in the 2014/15 and 2015/16 seasons (Year 1 and Year 2, respectively). The experiment was carried out in a Typic Argiudoll⁽²⁶⁾ or Typic Eutric Brunisol Lac. soil, from the Tala Rodríguez Soil Unit⁽²⁷⁾. Table 1 presents information on its hydric properties.

Table 1. Physical and hydric characteristics of the test soil

Depth (cm)	FC vol%	PWP vol%	BD gr cm ⁻³	AW mm horiz ⁻¹
0-20	38.9	22.5	1.25	32.7
20-40	43.6	25.1	1.43	37.0
40-60	38.6	21.4	1.43	34.4
60-80	38.4	21.4	1.40	33.9
Total water (mm)	319	181		138.0

FC: Field Capacity; PWP: Permanent Wilting Point; BD: Bulk Density; AW: Available Water; vol%: volumetric percent

The infiltration rate measured with the double ring infiltrometer was 8.8 mm h⁻¹.

A root depth of 0.80 m was defined because the soil does not physically impede soybean crops to explore. Dardanelli and others⁽²⁸⁾ indicate that the maximum absorption is at 180 cm in deep soils without physical impediments. The soils in the experiment have a maximum explorable depth of 80 to 90 cm.

This area is classified as having a moderate temperate climate⁽²⁹⁾ with no dry season and hot summer. The average annual rainfall is 1200 mm with high interannual variability and annual irregularity. The average summer temperature varies between 18 and 23 °C, while the average radiation varies between 400 and 580 cal cm⁻² day⁻¹, with an average humidity of 72%. The meteorological variables of interest during the soybean growing season will be presented in the climatic characterization of the experiment.

2.2 Experimental design

The treatments were: Rainfed: only rainfall; 3 mm: maximum depth 3 mm day⁻¹; 6 mm: maximum depth 6 mm day⁻¹, and 9 mm: maximum depth 9 mm day⁻¹. Each irrigation depth indicates the maximum daily replacement capacity with irrigation.

A randomized complete block design with four replications was used for the experiment. The plots were 12×6 m in size, without empty spaces, to avoid edge effects that generate different microclimatic conditions within the experiment (oasis effect). The total experimental area was of 1152 m².

2.3 Crop management

The soybean cultivars used were 6262 IPRO (medium cycle), Don Mario in Year 1 and 5258 Nidera Semillas (short cycle) in Year 2. The no-till sowing dates were December 11, 2014, and November 23, 2015.

Before sowing, seeds were inoculated with strains of *Bradyrhizobium elkanii* plus Bioprotector ADD-IT BLUE (commercial product, Biopack LIKUIQ, from Lage y Cia. SA) at the dose recommended by the manufacturer.

The sowing density was 380 thousand plants ha⁻¹, 0.38 m between rows and approximately 15 plants per linear meter. Each plot had 16 rows of 12 m in length.



To avoid nutritional restrictions, the sowing was fertilized with 120 kg ha⁻¹ of P-PO₄, using triple calcium superphosphate (0-46-46-0) as fertilizer. Herbicide was applied pre and post-sowing to eliminate competition for space and nutrients.

2.4 Irrigation management

Drip irrigation was used to precisely apply the different irrigation depths. The equipment allowed to independently manage the irrigation times of each treatment. The lateral drip holders were placed every 0.50 m, with 4 l h⁻¹ drippers every 1.0 m arranged in a staggered pattern to improve water distribution. The application rate was 8 mm h⁻¹, below the infiltration rate of the soil. The uniformity coefficient (UC) of the equipment⁽³⁰⁾ was higher than 90%.

Irrigation was applied every two or three days, replacing the accumulated depths from the previous days, corresponding to each treatment. For example, if the sum of the irrigation needs of the crop was 13 mm in the two days before irrigation, 3 mm received 6 mm, 6 mm received 12 mm, and 9 mm received 13 mm.

To define the moment and the amount of water to apply, a daily water balance was made, according to FAO 56⁽³¹⁾. The water balance began with the soil at Field Capacity, regarding the pre-sowing precipitation (PP) or complementing with sprinkler irrigation. Climatic data were taken from the meteorological station of the INIA Las Brujas Experimental Station, located 12 km from the experiment. The PP was measured locally with a rain gauge in the experimental site, placed in compliance with standardization norms.

The adjusted evapotranspiration (ET_{c adj}) was calculated daily (Eq. 1). The cultivation coefficients (K_c) used are those recommended by FAO⁽³¹⁾ since local information is not available.

$$ET_{c \text{ adj}} = ET_o * K_s * K_c \quad \text{Eq. 1}$$

Where:

ET_{c adj}: Adjusted ET_c (mm day⁻¹)

ET_o: Reference crop evapotranspiration (Penman-Monteith modified by FAO⁽³¹⁾)

K_s: stress coefficient, maximum value 1⁽³¹⁾

$$K_s = \frac{TAW - Dr}{(1-p)TAW} \quad \text{Eq. 2}$$

Where:

Dr: Moisture depletion in root zone (mm)

TAW: Total available water in root zone (mm)

p: Fraction of the TAW that the crop extracts without suffering water stress (irrigation threshold)

When irrigation or PP do not cover the demand of the crop, a moisture deficit (Dr) accumulates in the soil. If the deficit exceeds the threshold (K_s < 1), the crop adjusts its water consumption due to stomatal adjustment processes. The consumption reduction is given by the relationship between the cumulative deficit and the readily available water (RAW = (1-p) * TAW; Eq. 2). If K_s = 1, there is no adjustment and the ET_{c adj} will be equal to the ET_c; if the K_s < 1, the ET_{c adj} will be lower than the ET_c⁽³¹⁾.

Tabulated "p" values of the FAO manual 56⁽³¹⁾ were used and corrected by ET_c, according to the adjustment equation, $p = p_{\text{table}} + 0.04 \times (5 - ET_c)$. For soybean, "p" is 0.50, and it was adjusted when ET_c exceeded 5 mm day⁻¹. The value of "p" estimates the RAW, which is the minimum amount of water in the soil for the crop to be in hydric comfort.

To estimate the PPeff., the mm necessary to cover Dr at the time of the PP were considered effective. The water content between saturation and FC in the first 20 cm of the soil is 28 mm, for this soil. If the PP exceeded the soil moisture deficit by 28 mm, the surface horizon was considered to be saturated. If this happened, 48 to 72 hours were allowed for the natural drainage to return the soil moisture to FC. To corroborate the soil humidity, a drill field control was carried out. PP lower than 20% of the ET_o was discarded⁽³¹⁾.

Irrigation requirements were estimated by correcting the ET_{c adj} by the equipment UC and by the application efficiency (Ae). Irrigation management with reduced depth and application intensity lower than the infiltration rate of the soil did not generate surface runoff or detectable deep percolation, retaining



the applied water in the root depth, therefore, the A_e was considered to be close to 100%.

2.5 Measurements

2.5.1 Soil moisture

Soil moisture was measured two to three times a week. For this, in the central testing area, 1-meter-deep aluminum access tubes were placed in two of the four replications, for a CPN neutron probe (model 503-DR Hydrprobe, Campbell Pacific Nuclear Corp., CA, USA) to measure in four depths: 0 to 20 cm, 20 to 40 cm, 40 to 60 cm, and 60 to 80 cm. The probe was calibrated for each soil horizon against the humidity measurements obtained with the gravimetric method, following the methodology of Haverkamp and others⁽³²⁾, and Puppo and others⁽³³⁾. The sampling included moisture contents that cover the range of moisture that can be measured in the test, achieving a good calibration adjustment in all horizons.

2.5.2 Crop development

Based on plant observation, the phenology of the crop was evaluated using the Fehr and others scale⁽³⁴⁾; Fehr and Caviness⁽³⁵⁾.

One of the key stages in defining soybean crop yield is the critical period (CP), which occurs from the beginning of R4 to R6, inclusive.

To evaluate the aboveground biomass, the aboveground part of the plants was extracted from one linear meter per plot every 15 or 20 days. Samples were not extracted from the six central rows so as not to alter the sowing density, since the final crop yield was evaluated in the central rows. For the final aboveground biomass, sampling was carried out in stages R5.5, before the beginning of leaf fall. The samples were dried in an oven at 60 °C until constant weight.

2.5.3 Yield

The grain yield was evaluated by harvesting three subsamples of 2 m² each, in the six central rows, reaching a harvest area of 6 m² per plot. Grain yield, weight of 1000 grains and number of grains per square meter were measured. The harvest index (HI) was estimated as: dry grain weight/total dry matter. Harvest grain moisture was evaluated using a grain moisture analyzer (Multi-grain, Dickey-

John). The grain weight was corrected to a humidity of 14%.

The harvest dates were May 7, 2015, and April 22, 2016, for Years 1 and 2, respectively.

2.6 Productivity indicators of water use by crops

To evaluate the different irrigation strategies proposed, different indicators of water use efficiency were estimated. The combination of indicators can inform about the most appropriate management strategies⁽³⁶⁾. The consumed water use efficiency (CWUE) is one of the measures commonly used to evaluate management strategies. However, the CWUE does not discriminate the irrigation contribution, and according to Howell⁽³⁷⁾, other expressions can discriminate the irrigation role, such as the supplementary water use efficiency of evapotranspired by irrigated treatments with respect to rainfed (SWUE) and the irrigation water use efficiency (IWUE) (Eq. 4 and 5).

$$CWUE(\text{kg m}^{-3}) = \frac{\text{Yield}(\text{kg ha}^{-1})}{ETc_{adj}(\text{m}^3\text{ha}^{-1})} \quad \text{Eq. 3}$$

$$SWUE = (\text{Yield}_t - \text{Yield}_0) / (ETc_t - ETc_0) \quad \text{Eq. 4}$$

$$IWUE = (\text{Yield}_t - \text{Yield}_0) / I \quad \text{Eq. 5}$$

Where:

Yield_t: Yield irrigation treatment (Kg ha⁻¹)

Yield₀: Yield rainfed (Kg ha⁻¹)

ETc_t: ETc adj irrigation treatment (m³)

ETc₀: ETc rainfed (m³)

I: Irrigation (mm)

To evaluate the effect of deficit irrigation on yield, a deficit irrigation stress index (DISI) was calculated⁽³⁸⁾. It relates the yield obtained in each treatment (Yield_t) with the yield of the most irrigated one (Yield_r).

$$DISI = (\text{Yield}_r - \text{Yield}_t) / \text{Yield}_r \quad \text{Eq. 6}$$

2.7 Statistical analysis

Data were analyzed using the statistical package INFOSTAT⁽³⁹⁾. Means were separated using Fisher's test (p ≤ 0.05 between means) to detect differences between treatments for grain yield, weight of



1000 grains, grains per m² and biomass. The relationship between grain yield and the amount of water applied by irrigation was evaluated using a regression fit.

2.8 Transparency of data

Available data: The entire data set that supports the results of this study was published in the article itself.

3. Results

3.1 Climatic characterization

The atmospheric demand (ET_o) was higher than the ET_c in both years, with a 50% probability of occurrence for a series of 40 years, mainly during the CP

(Table 2). In the CP (February and March) the PP was lower than the PP value with a 50% probability of occurrence in both years. In Year 1, due to late sowing dates, the CP was between March 12 and April 10. In Year 2 it was between January 31 and March 1. It is worth mentioning that before the CP, in the phenological stages of flowering and pod formation, the PP was the lowest of the crop cycle, 27 and 11 mm for Year 1 and 2, respectively.

In Year 2, PP occurred before the end of the crop cycle and continued for several days. This situation did not allow immediate harvest, because it was impossible to enter the crop with saturated soil and because the PP continued for 20 days. The yield was affected due to fallen plants and the loss of harvestable grains.

Regarding solar radiation during CP, the values were 5% higher than the average.

Table 2. Monthly average potential evapotranspiration (ET_o), cumulative PP and solar radiation for Year 1, Year 2 and value with 50% probability of occurrence in 40 years (1980-2020)

	Evapotranspiration (ET _o) (mm month ⁻¹)			Monthly PP (mm month ⁻¹)			Solar Radiation (cal cm ⁻² day)		
	1980-2020	Year 1	Year 2	1980-2020	Year 1	Year 2	1980-2020	Year 1	Year 2
October	108	128	108	96	150	63	440	445	404
November	141	146	146	91	187	73	529	525	524
December	173	174	177	76	66	131	581	570	580
January	179	167	188	83	106	11	581	537	583
February	136	153	158*	92	27	82*	506	538	523*
March	111	121*	103	87	72*	93	405	425*	350
April	63	87	57	86	30	252	292	343	215
May	36	47	34	73	21	56	216	220	175

* Critical period

Both years presented the maximum ET_c in February (6.27- and 6.50-mm d⁻¹), due to late sowing dates. Year 2 also presented high ET_c in January (6.21 mm day⁻¹) because that year the crop was sown in mid-November and reached the maximum K_c in the last week of January.

Table 3. Daily average crop evapotranspiration (ET_c) in mm d⁻¹ for each year of evaluation and average of the two years

ET _c mm d ⁻¹	Year 1	Year 2	Average 2 years
December	2.35	3.01	2.68
January	3.95	6.21	5.08
February	6.27	6.51	6.39
March	4.50	3.40	3.95
April	2.57	1.11	1.84



3.2. Grain yield, production of aboveground biomass and harvest index

The results indicate that irrigation affected grain yield in both evaluation years. The response to the different treatments depended on the specific conditions of each year, mainly the quantity and distribution of PP. The yield of the 9 mm treatment was significantly higher than the other treatments (except for the 6 mm in year 1), and the rainfed presented the lowest yield. The water deficit conditions caused a significant yield reduction in the rainfed and 3 mm, compared to 9 mm (Table 4).

The 1000-grain-weight yield component did not differ statistically between treatments in Year 1, and it was higher in 9 and 6 mm, in Year 2, which were statistically different from 3 mm and rainfed (Table 4). The number of grains per square meter was higher in 6 and 9 mm in both years, with a significant difference between them in Year 2; and the 3 mm and rainfed treatments presented a lower number of grains per square meter, differing from all the treatments.

Table 4. Grain yield, weight of 1000 grains and number of grains per m², for the two years of evaluation. Grain moisture corrected to 14%

	Yield Kg ha ⁻¹		Weight 1000 grains gr		N° grains Grains m ⁻²		Yield 2 years Kg ha ⁻¹ Average
	Year 1	Year 2	Year 1	Year 2	Year 1	Year 2	
Rainfed	3454 c	2135 b	200 ab	192 b	1978 c	1455 d	2795 c
3 mm	4575 b	2779 b	200 ab	194 b	2541 b	1607 c	3678 b
6 mm	5652 a	2882 b	208 a	201 a	3369 a	2389 b	4267 b
9 mm	5973 a	4117 a	193 b	207 a	3559 a	3065 a	5045 a

Means with the same letter are not significantly different (p > 0.05).

The aboveground biomass production was higher in 6 and 9 mm, and higher in Year 1 compared to Year 2. On average, the 6- and 9-mm treatments achieved 13359 and 15602 kg DM ha⁻¹ of aboveground biomass and the rainfed, approximately half,

6945 Kg DM ha⁻¹. The harvest index, which relates the harvestable yield (grain) with the aboveground biomass produced, was higher in 3 mm and rainfed, with values from 0.40 to 0.43, being from 0.28 to 0.36 in 9 mm.

Table 5. Produced biomass (Kg DM ha⁻¹) and harvest index

	Aboveground Biomass Kg DM ha ⁻¹			Harvest index	
	Year 1	Year 2	Average 2 years	Year 1	Year 2
Rainfed	8521 c	5368 b	6945 c	0.41	0.40
3 mm	10740 bc	8979 ab	9860 bc	0.43	0.31
6 mm	14320 ab	12399 a	13359 ab	0.39	0.23
9 mm	16450 a	14755 a	15602 a	0.36	0.28



3.3. Water balance

The ETc adj was between 390 and 603 mm, with the lowest values in the rainfed. The 6- and 9-mm treatments presented similar ETc adj between each other and close to each year's ETc. Only the rainfed was affected by the low PP of Year 1, which occurred from flowering, CP and until the end of the crop cycle (Table 2), being lower than average for a 40-year series. This effect is clearly seen in the Ks value, both in the cycle average and in the CP (Table 6).

In Year 1, the 3 mm treatment had a Ks of 0.98 and an ETc adj similar to 6 and 9 mm, however, its grain and biomass yield was lower than in these treatments.

The net irrigation requirements were 423 and 416 mm in 9 mm to meet the total ETc of the crop. However, 6 mm required between 40 and 70 mm

less irrigation to meet the same objective, making better use of the PP.

Figure 1 shows the occurred PP during the crop cycle. Years 1 and 2 presented 20 and 38 PP events, respectively. On average, the total cumulative precipitation represents 49 and 69% of each year's ETc; however, not all PP was effective (Table 6).

The water content in the soil in 9 mm and 6 mm remained high, close to FC, not falling below the threshold of stomatal closure, while in rainfed as of approx. V10 stage, soil moisture fell below the threshold in the two years, and 3 mm remained close to the threshold in Year 1 and below it in Year 2 from R2 to R7 (Figure 2). This treatment did not maintain an adequate level of humidity in the soil when the water requirement increased, due to the higher demand and the scarce PP occurrence, and the soil RAW was depleted in approx. 17 days (Figure 2).

Table 6. Adjusted evapotranspiration (ETc Adj), Irrigation, Effective precipitation (PPeff.), average Stress coefficient of the cycle (Ks cycle), and Stress coefficient in CP (Ks CP)

Year 1 ETc: 569 mm PPt: 281 mm	ETc adj (mm)	Irriga- tion (mm)	PPeff. (mm)	Water Total	Ks cycle	Ks CP
Rainfed	404		268	268	0.71	0.56
3 mm	555	261	249	510	0.98	0.98
6 mm	566	368	183	551	0.99	1.00
9 mm	566	416	146	562	0.99	1.00
Year 2						
ETc: 604 mm PPt: 421 mm						
Rainfed	390	0	338	338	0.72	0.47
3 mm	525	195	324	519	0.90	0.80
6 mm	601	353	275	628	1.00	1.00
9 mm	603	423	216	639	1.00	1.00



Figure 1. Daily and cumulative precipitation during the soybean growing season for the two years of evaluation

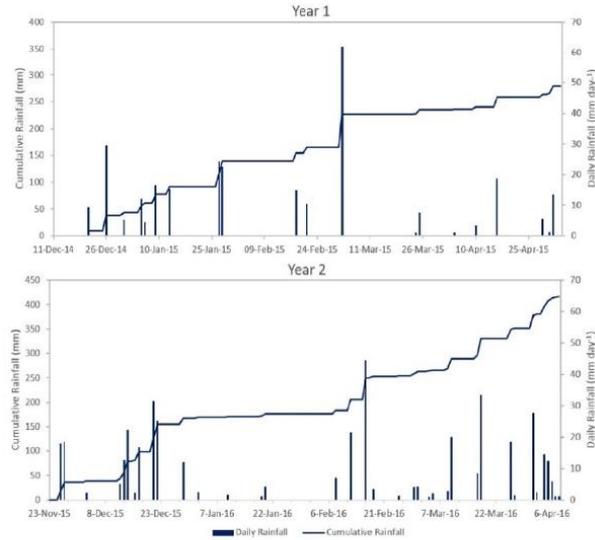
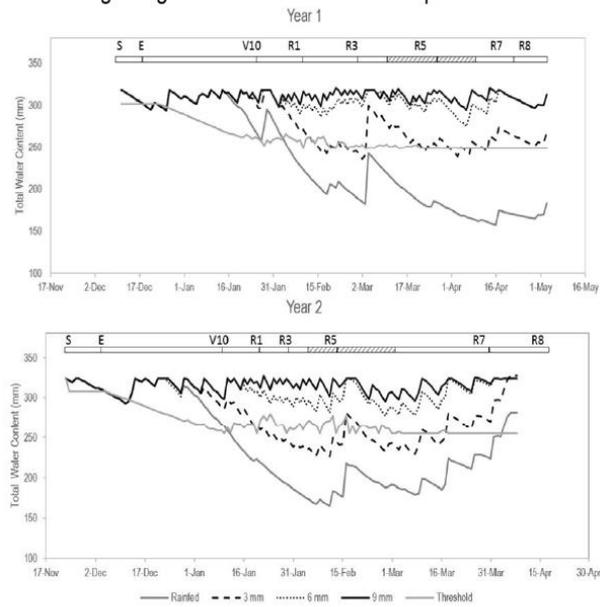


Figure 2. Evolution of the total water (mm) in the total root depth (0.80 m) for the different treatments. The upper-scale indicates the phenological stages and CP for each evaluation cycle (/ / /). S: Sowing, E: Emergence, V10: 10th knot, R1: Beginning of the flowering, R3: Beginning of pod formation, R5: Seed formation, R7: Beginning of maturation and R8: Complete maturation





3.4. Relationships between yield, irrigation and ET. Water productivity indicators

Results indicate that the relationship between the yield and the irrigation applied was linear in the two years of evaluation and in the average of the years. The regression equations have a good fit with R² of 0.96 and 0.94 for Year 1, and the average and R² of 0.77 for Year 2. The linear regression coefficient, which indicates the increase in grain yield for each unit of increased irrigation applied, was 6.03 and 3.86 kg mm⁻¹ for Years 1 and 2, respectively.

The water productivity evaluated using different indicators was higher in 9 and 6 mm, and higher in Year 1 compared to Year 2. In Year 1, the yields were higher and the amount of irrigation water was

similar in both years. Although Year 2 presented more abundant PP, the irrigation requirement was similar to Year 1, since half of the PP occurred at the end of the cycle. In Year 2, the rainfed, 3 mm and 6 mm treatments did not differ from each other in yield, but the 6 mm received more irrigation water, therefore, it had a worse performance. On average, each added mm of irrigation (IWUE) and each extra evapotranspired mm (WUE) produce more yield in 9 mm than in 3 and 6 mm.

The Deficit Irrigation Stress Index (DISI) was greater in the rainfed treatment, followed by the 3 mm. The index was greater in Year 2, which would indicate a greater level of stress in all deficit treatments.

Figure 3. Relation between grain yield (Yield) and irrigation applied (I) in the crop cycle. Year 1: Yield=6.025 x + 3339 (R²=0.96); Year 2: Yield=3.8625 x + 2041 (R²=0.77); 2 years: Yield=4.9521 x + 2697 (R²=0.94)

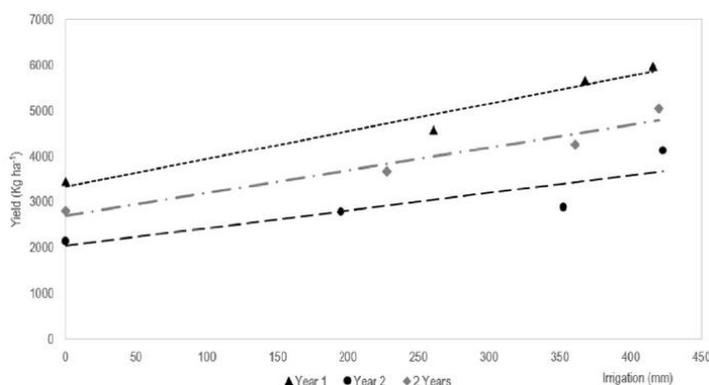


Table 7. Efficiency of the consumed water (CWUE), of the supplementary water use compared to rainfed (SWUE), of the irrigation water use (IWUE), and deficit irrigation stress index (DISI)

Treat.	CWUE (kg m ⁻³)			SWUE (Kg m ⁻³)			IWUE (Kg m ⁻³)			DISI (tt ⁻¹)		
	Year 1	Year 2	2 years	Year 1	Year 2	2 years	Year 1	Year 2	2 years	Year 1	Year 2	2 years
Rainfed	0.85	0.55	0.70							42.2	48.1	44.6
3 mm	0.82	0.53	0.68	0.74	0.48	0.62	0.43	0.33	0.39	23.4	32.5	27.1
6 mm	1.00	0.48	0.73	1.36	0.35	0.79	0.60	0.21	0.41	5.4	30.0	15.4
9 mm	1.06	0.68	0.86	1.55	0.93	1.20	0.61	0.47	0.54			



4. Discussion

This experiment was developed under climatic conditions of atmospheric demand between 4 and 5% over the ET_0 value with 50% probability of occurrence considering the months of greater demand (January to March). The PP was below this value (22 and 30% lower during the same period). This situation generated water deficit conditions in the rainfed and 3 mm treatments in key stages for the yield formation, from the flowering to the final maturation of the crop⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾.

The daily average ET_c in the month of maximum demand for this experiment was 6.5 mm d^{-1} in February, which is similar to the average ET_c for a series of 40 years in January (6.6 mm). When using this value to design the irrigation equipment for soybean crops, such as central Pivot, whose application efficiency is around 85-90%⁽⁴²⁾, the irrigation water requirement rise to 7.6 mm d^{-1} . In this situation, equipment that is able to apply 7.6 mm d^{-1} meets the crop demands throughout the cycle. Nevertheless, this equipment requires a higher initial investment, greater operational cost, and it is oversized for the first and last stages of the crops cycle, when the water demand is at its lowest. The 6 mm treatment was able to maintain soil humidity levels over the threshold of stomata closure, applying 5.5 mm d^{-1} net (90% application efficiency). When the crop demand was greater, the soil reserve contributed with the difference between the crop demand and irrigation. The 6- and 9-mm irrigation treatments kept the soil moisture close to FC when reaching the stages of greatest water requirement and CP, keeping soil moisture levels above the stomata closure threshold.

The ET_c adj was higher as the crop received more water, the 6 mm and 9 mm treatments had no ET_c adjustment (566 and 603 mm, Year 1 and 2, respectively). The ET_c in this experiment is consistent with the values mentioned by regional and extra-regional researchers. According to Doorenbos and Kassam⁽⁴³⁾ the estimated ET_c for the maximum soybean production is between 450 and 700 mm; according to Steduto and others⁽⁴⁰⁾ between 300 and 800 mm, depending on the type of cultivar and environmental conditions. Montoya and Otero⁽⁴⁴⁾ estimated values of 380 mm in rainfed and approx.

580 mm with irrigation in 35 simulations carried out with the Aquacrop model⁽⁴¹⁾, using climatic data similar to the ones used in this experiment. Other researchers mention ET_c values of 821 mm in full irrigation in Bursa, Turkey⁽⁴⁵⁾; 452 mm in Nebraska, USA⁽⁴⁶⁾, also with irrigation; 505 mm with full irrigation, and 227 in rainfed in a temperate climate, Serbia⁽²⁾; 601 mm full irrigation and 452 mm in rainfed, in south-central Nebraska⁽¹⁾; 650 mm in full irrigation and 310 in rainfed, in Hungary⁽⁴⁷⁾.

Although the 3 mm treatment in Year 1 had an ET_c adj similar to that of 6 and 9 mm, the yield was significantly lower. In this case, the humidity level was above the stomata closure threshold, but below the leaf expansion threshold during the reproductive stages (Figure 2). This resulted in lower leaf area production, lower biomass and lower yield⁽⁴¹⁾.

The daily and cumulative PP was not enough to cover the water requirement of the crop in any of the 2 years. While 20 and 38 rainfall events occurred in Year 1 and Year 2, respectively, their distribution and volume were not adequate. In Year 2, up to V10, the PP covered the crop demand, after that, the PP was minimal and the increase in crop demand caused the rainfed to exhaust the RAW in 15 days, while 3 mm exhausted it in 25 days. Soils with less water storage capacity than the soil in this test would have had greater deficits. Uruguay has shallow soils in agricultural areas which present frequent water deficit conditions in summer⁽⁴⁸⁾. Considering a root depth of 0.80 m meant more available water for the crop to use during the cycle. The soil in which the experiment was developed, Typic Argiudoll, has 163 mm of potentially available water, at 1 m deep; however, due to degradation reasons (erosion), the net available water can decrease to 130 mm in this type of soil, classified as high class of available water⁽⁴⁸⁾. The experiment soil characterization indicates that the water available up to 0.80 m is 138 mm, higher than the indicated by the previous reference, considering the same depth, but no evidence of degradation due to erosion was found, which would explain the differences. This means that for the crop to begin its stomatic adjustment the AW must fall more than 60 mm, with a threshold of 0.44 ("p" adjusted for an ET_c of 6.5 mm d^{-1}), which occurs in 9 days with a daily demand of 6.5 mm , without irrigation.



Treatments 9 and 6 mm did not present significant differences in yield in Year 1, but they did in Year 2, where no differences were observed between these treatments in water consumption. In Year 2 the 6 mm yield was more affected by the plants overturned by the PP which occurred at the end of the cycle. This situation may explain the low harvest rates obtained in Year 2 in irrigated treatments.

The maximum yields were almost 6.0 tt ha⁻¹, in 6- and 9-mm treatments (Year 1), similar to those obtained in local crop evaluations, and 3.4 tt ha⁻¹ in rainfed. At the commercial level, the average yields recorded are around 3.0 tt ha⁻¹ in rainfed and 4.0 tt ha⁻¹ with irrigation⁽²¹⁾. Gajić and others⁽²⁾ obtained yields of 4.27 tt ha⁻¹ with irrigation and 2.59 tt ha⁻¹ in rainfed, in temperate climate conditions. All irrigation treatments yielded more than rainfed, indicating the importance of irrigation even with low irrigation depth (3 mm).

The 9 mm treatment performed the best in the two years, in terms of yield and water productivity; however, it did not make good use of the PP, only 52% of them were effective. In the 6 mm treatment, the yield loss due to plant overturning explained the lower efficiency in the use of water.

The aboveground biomass production coincides with that mentioned locally by Giménez⁽⁴⁹⁾, but it is higher than the mentioned by other researchers⁽²⁾⁽⁴⁴⁾, mainly in the 6 and 9 mm treatments. The biomass in rainfed and 3 mm is similar to that mentioned by Galić and others⁽²⁾ in rainfed treatments and 40% of full irrigation. The 6- and 9-mm treatments kept the soil moisture close to FC, close to the leaf expansion threshold, avoiding the leaf expansion stress⁽⁴¹⁾⁽⁵⁰⁾, developing more biomass than 3 mm and rainfed. This higher biomass production did not translate into a proportional yield increase in 6 and 9 mm, and the HI was lower than rainfed and 3 mm. In this regard, Raes and others⁽⁴¹⁾ indicate that the HI can be negatively affected by this excessive biomass growth which does not mean a more harvestable yield.

The evolution of the total water in the root depth indicates adequate irrigation management since the humidity was kept between the threshold and FC, in most of the crop cycle, in 6 and 9 mm. This form of

irrigation management ensures high crop transpiration rates without stomata adjustment that reduces it and without affecting photosynthesis⁽⁴⁰⁾⁽³¹⁾. However, Steduto and others⁽⁴⁰⁾ recommend irrigation schedules based on the depletion of 60% of the total AW, that is, close to the threshold recommended by FAO 56 (50%), indicating that the applied irrigation is lower and the yield is not significantly affected. Although this practice allows greater use of PP, it can be risky in the absence of PP for prolonged periods and high-frequency irrigation equipment that cannot replenish the daily crop demand, when it is high, as is the case of central pivots and localized irrigation⁽⁴²⁾. These systems are designed using the average daily crop ETc, so if the irrigation is managed to keep the humidity close to the threshold content, the soil moisture may fall below the stomata adjustment threshold in prolonged periods with demands above the average and without PP. These situations are frequent in temperate climates with erratic rainfall in the growth cycle. This situation was observed in this experiment during the CP in both evaluation years (Figure 1). Otero and others⁽⁵¹⁾ evaluated different irrigation strategies, including exhausting up to the threshold and restoring with 10 mm of irrigation, using the water balance model Winsareg⁽⁵²⁾. Results indicate that this strategy took better advantage of rainfall and made less use of irrigation water. However, the equipment designed to comply with this irrigation strategy must be able to manage 10 mm per day, and results in higher pumping flow and hydraulic design with larger diameter pipes, therefore higher investment and operating cost.

The water productivity indicators (CWUE, SWUE, IWUE) were similar to those mentioned by several researchers⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵³⁾ and higher than those indicated by Payero and others⁽⁵⁴⁾. The indicators that distinguish the role of irrigation in water productivity of the crop are the IWUE and SWUE⁽³⁷⁾⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾⁽⁵⁷⁾, since they consider the incremental yield, above the rainfed yield caused by the added irrigation. Both indicators were higher in 9 mm, followed by 6 mm; however, in Year 1 the IWUE of both treatments was similar, with 48 mm less irrigation in the 6 mm treatment. In both years, the 6 mm treatment had the same ETc as 9 mm, but with less irrigation water applied (48 and 70 mm, Year 1 and 2, respectively).



The relationships between yield and applied water were linear, coinciding with those obtained by Kirnak and others⁽¹¹⁾, Payero and others⁽⁵⁴⁾, and Irmak and others⁽¹⁾, who investigated in semi-humid climatic conditions in south-central Nebraska, with PP during the crop growth cycle. Regarding the yield increases per mm applied, Payero and others⁽⁵⁴⁾ obtained increases from 5.28 to 8.29 kg ha⁻¹ above the intercept in dry years, greater than those of this study, which were 6.02 and 3.86 kg ha⁻¹, Years 1 and 2, respectively. However, other researchers found a quadratic correlation between yield and ETC_{adj}⁽²⁾⁽⁵⁸⁾.

In Year 1, the 6- and 9-mm treatments did not differ from each other, indicating that the equipment designed to apply a maximum irrigation depth of 6 mm would be the most convenient since it makes better use of PP and uses less irrigation water than the equipment with a maximum irrigation depth of 9 mm. However, the highest yield in Year 2 occurred with 9 mm, while the rest of the treatments did not differ from each other, possibly because 6 mm presented greater yield losses due to plant overturning.

5. Conclusions

The results of two years of evaluation indicate that the different irrigation regimes affect the yield and water productivity in soybean cultivation; even the smallest irrigation depth, 3 mm, had a positive effect on the yield compared to rainfed.

The 9 mm treatment was the best performing treatment in both years, but in Year 1 it did not differ significantly from the 6 mm. The 6 mm treatment in Year 2 had a lower yield, probably because it was the most affected by the harvest delay due to rainfall and the consequent grain loss. In the 6 mm treatment, the amount of irrigation water applied was lower and the use of rainwater was greater than in the 9 mm treatment, in both years.

To optimize irrigation management, an economic analysis is required. In this case, the proposed objective was to determine the minimum daily irrigation depth that allows high yields with better use of rainfall, and that ultimately determines lower equipment investment and operating costs. The lowest

costs are given by smaller equipment, associated with a smaller irrigation depth.

According to the results of this study, equipment designed with a capacity to replace a maximum of 6 mm per day would be the best option in Uruguay's soils, which have high and very high-water retention capacity, similar to the one in the present experiment. On the other hand, the 3-mm option must be economically analyzed to estimate whether the yield increase achieved by applying 6 mm justifies the higher investment and operating cost compared to applying 3 mm.

Therefore, it would be advisable to model the obtained results and evaluate them for a series of several years with measured climatic data to give a more reliable irrigation management recommendation, taking into account more diverse climatic and soil conditions than those observed in these two years of experiment.

Acknowledgments

The study was funded by the FSA_1_2013_1_12590 project of ANII (National Agency for Research and Innovation).

Author contribution statement

RH: experiment design, writing, analysis of results, statistical processing, interpretation of results. SD: contribution in writing and in the interpretation of results.

References

1. Irmak S, Specht JE, Odhiambo LO, Rees JM, Cassaman KG. Soybean yield, evapotranspiration, water productivity, and soil water extraction response to subsurface drip irrigation and Fertigation. *Trans ASABE* [Internet]. 2014 [cited 2021 Aug 30];57:729-48. Available from: <https://bit.ly/3t1MdMG>.



2. Gajić B, Kresović B, Tapanarova A, Životić L, Todorović M. Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different rainfall conditions in a temperate environment. *Agric Water Manag* [Internet]. 2018 [cited 2021 Aug 30];210:224-31. Available from: <https://bit.ly/3mLLPjZ>.
3. Montoya F, Garcia C, Pintos F, Otero A. Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. *Agric Water Manag* [Internet]. 2017 [cited 2021 Aug 30];193:30-45. Available from: <https://bit.ly/3zvadds>.
4. Scardigno A. New solutions to reduce water and energy consumption in crop production: a water energy food nexus perspective. *Curr Opin Environ Sci Health* [Internet]. 2020 [cited 2021 Aug 30];13:11-5. Available from: <https://bit.ly/38E4XbL>.
5. Izquier R. Uso eficiente del agua y la energía: modelos de diseño y gestión conjunta de sistemas de bombeo y balsas en redes colectivas en sistemas de riego [doctoral's thesis on Internet]. Albacete (ES): Universidad de Castilla La Mancha; 2015 [cited 2021 Aug 30]. 126p. Available from: <https://bit.ly/3yxFPOa>.
6. Djaman K, Irmak S, Rathje WR, Martín DL, Eisenhauer DE. Maize evapotranspiration, yield production functions, biomass, grain yield, harvest index, and yield response factors under full and limited irrigation. *Trans ASABE* [Internet]. 2013 [cited 2021 Aug 30];56:273-93. Available from: <https://bit.ly/3yrvEuv>.
7. Akcay S, Dagdelen N. Water use efficiency, yield and yield components of second crop sunflower under deficit irrigation. *Turk J Field Crops* [Internet]. 2016 [cited 2021 Aug 30];21:190-9. Available from: <https://bit.ly/3sYkj3Q>.
8. Fereres E, Soriano MA. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J Exp Bot* [Internet]. 2007 [cited 2021 Aug 30];58:147-59. Available from: <https://bit.ly/3mJRrv7>.
9. Karam F, Masaad R, Sfeir T, Mounzer O, Rouphael Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agric Water Manag* [Internet]. 2005 [cited 2021 Aug 30];75:226-44. Available from: <https://bit.ly/3Dxo5WP>.
10. Giménez L, Paredes P, Pereira LS. Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress: application of AquaCrop and SIMDualKc models. *Water* [Internet]. 2017 [cited 2021 Aug 30];9(6):393. Available from: <https://bit.ly/3gGruZx>.
11. Kirnak H, Dogan E, Turkoglu H. Effect of drip irrigation intensity on soybean seed yield and quality in the semi-arid Harran plain, Turkey. *Span J Agric Res* [Internet]. 2010 [cited 2021 Aug 30];8(4):1208-17. Available from: <https://bit.ly/3Dwzjer>.
12. Torrión J, Setiyono T, George L, Graef G, Kenneth G, Cassman K, Irmak S, Specht J. Soybean irrigation management: agronomic impacts of deferred, deficit, and full-season strategies. *Crop Sci* [Internet]. 2014 [cited 2021 Aug 30];54(6):2782-95. Available from: <https://bit.ly/2WA4BQq>.
13. Capurro MC, Beretta A, Sawchik J, Puppo L. Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego. *Agrociencia Uruguay*. 2017;21(2):65-76.
14. Silva V de PR, Silva RA, Maciel GF, Braga CC, Silva Junior JLC da, Souza EP de, Rodrigues RS, Silva MT, Holanda RM de. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in Motopiba region, Brazil. *Cienc Rural* [Internet]. 2018 [cited 2021 Aug 30];48:1-8. Available from: <https://bit.ly/2Wxa7TW>.
15. Silva V de PR, Silva RA, Maciel GF, Souza EP de, Braga CC, Holanda RM de. Soybean yield in the Matopiba region under climate changes. *Rev Bras de Eng Agric e Ambient* [Internet]. 2020 [cited 2021 Aug 30];24(1):8-14. Available from: <https://bit.ly/2WCUXwj>.



16. Puppo L, García-Petillo M. Determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) para el diseño de equipos de riego en el Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. 2015;19(1):122-30.
17. Sawchik J, Ceretta S. Consumo de agua por sojas de distinto grupo de madurez en diferentes ambientes de producción. In: *Jornada Técnica de cultivos: trabajos presentados*. Montevideo: INIA; 2005. p. 41-5. (Actividades de Difusión; 417).
18. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, DIEA (UY). Encuesta agrícola: invierno 2016 [Internet]. Montevideo: MGAP; 2016 [cited 2021 Aug 30]. 21p. (Serie encuestas; 337). Available from: <https://bit.ly/3i2rEvB>.
19. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, DIEA (UY). Encuesta agrícola: invierno 2017 [Internet]. Montevideo: MGAP; 2017 [cited 2021 Aug 30]. 26p. (Serie encuestas; 348). Available from: <https://bit.ly/3DX8TU>.
20. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, DIEA (UY). Encuesta agrícola: invierno 2018 [Internet]. Montevideo: MGAP; 2018 [cited 2021 Aug 30]. 36p. (Serie encuestas; 353). Available from: <https://bit.ly/3mMj07c>.
21. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, DIEA (UY). Encuesta agrícola: invierno 2019 [Internet]. Montevideo: MGAP; 2019 [cited 2021 Aug 30]. 28p. (Serie encuestas; 358). Available from: <https://bit.ly/3jusWjS>.
22. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, DIEA (UY). Encuesta agrícola: invierno 2020 [Internet]. Montevideo: MGAP; 2020 [cited 2021 Aug 30]. 23p. (Serie encuestas; 362). Available from: <https://bit.ly/3mLqHKl>.
23. Grassini P, Torrión JA, Yang HS, Rees J, Andersen D, Cassman KG, Specht JE. Soy-bean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *Field Crops Res* [Internet]. 2015 [cited 2021 Aug 30];179:150-63. Available from: <https://bit.ly/2WAQ3jq>.
24. Corsi W. Programación del riego con informes de evaporación. In: *Manejo de la información agroclimática para apoyo a la toma de decisiones en riego*. Montevideo: INIA; 1994. p. 1-16. (Serie de actividades de difusión; 26).
25. Giménez L, García-Petillo M. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. 2011;15(2):100-8.
26. Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy* [Internet]. 12th ed. Washington: USDA; 2014 [cited 2021 Aug 30]. 360p. Available from: <https://bit.ly/38r9cXK>.
27. Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes (UY). *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay*. Vol 3, Descripción de las Unidades de Suelos. Montevideo: MAP; 1979. 452p.
28. Dardanelli J, Severina I, Andriani J. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo: su rol en la optimización del riego suplementario. In: *Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas*. Montevideo: INIA; 2010. p. 19-28.
29. Lindemann T, Plata V, Oyhançabal W, Sancho D. La percepción de productores y técnicos agropecuarios. In: *Clima de cambios: nuevos desafíos de adaptación para Uruguay* [Internet]. Vol. 2, La percepción de productores y técnicos agropecuarios. [place unknown]: FAO; 2013 [cited 2021 Aug 30]. 93p. Available from: <https://bit.ly/3sWLFb4>.
30. Merriam J, Keller J. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Logan: Utah State University; 1978. 271p.
31. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO; 1998. 322p. (FAO Irrigation and Drainage; 56).
32. Haverkamp R, Vauclin M, Vachaud G. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. Local standpoint. *Soil Sci*. 1984;137:78-90.
33. Puppo L, García C, Girona J, García-Petillo M. Determination of Young olive tree water consumption with drainage Lysimeters. *J Water Resour Prot* [Internet]. 2014 [cited 2021 Aug 30];6(9):841-51. Available from: <https://bit.ly/3gHbeb2>.



34. Fehr W, Caviness C, Burmood D, Pennington J. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Sci*. 1971;2:929-32.
35. Fehr W, Caviness C. Stages of soybean development. Ames (IA): Iowa State University; 1977. 11p. (Special Report; 87).
36. Rudnick D, Irmak S, West C, Chavez J, Kisekka I, Marek T, Schneekloth J, Mitchell Mcallister D, Sharma V, Djaman K, Aguilar J, Schipanski ME, Rogers DH, Schlegel A. Deficit irrigation management of maize in the High Aquifer Region: a review. *J Am Water Resour Assoc* [Internet]. 2019 [cited 2021 Aug 30];55(1):38-55. Available from: <https://bit.ly/3gMgPN7>.
37. Howell TA. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron J* [Internet]. 2001 [cited 2021 Aug 30];93(2):281-9. Available from: <https://bit.ly/3DwG28b>.
38. Pandey R, Maranville JW, Chetima MY. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a sahelian environment: shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. *Agric Water Manag*. 2000;46:15-27.
39. Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, González L, Tablada M, Robledo CW. *InfoStat* [Internet]. Version 2011. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias; 2014 [cited 2021 Aug 30]. Available from: <https://bit.ly/3dDvlyu>.
40. Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. *Crop yield response to water*. Rome: FAO; 2012. 500p. (Irrigation and drainage; 66).
41. Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. *AquaCrop Plug-in program: reference manual* [Internet]. Version 4.0. Rome: FAO; 2013 [cited 2021 Aug 30]. 14p. Available from: <https://bit.ly/3zvXK99>.
42. Tarjuelo JM. *El riego por aspersión y su tecnología*. 3 ed. Madrid: Mundi prensa; 2005. 591p.
43. Doorembos J, Kassam H. *Yield response to water*. Rome: FAO; 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage; 64).
44. Montoya F, Otero A. Is Irrigating Soybean Profitable In Uruguay? A Modeling Approach. *Agron J* [Internet]. 2019 [cited 2021 Aug 30];111(2):749-63. Available from: <https://bit.ly/2WBucsE>.
45. Sincik M, Candogan B, Demirtas C, Buyucangaz H, Yazgan S, Goksoy A. Deficit irrigation of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a sub-humid climate. *J Agron Crop Sci* [Internet]. 2008 [cited 2021 Aug 30];194:200-5. Available from: <https://bit.ly/2YbouOD>.
46. Suyker A, Verma S. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems. *Agric For Meteorol* [Internet]. 2009 [cited 2021 Aug 30];149:443-52. Available from: <https://bit.ly/3ztnFu4>.
47. Anda A, Simón B, Soós G, Texeira da Silva J, Kucserka T. Crop-water relation and production of two soybean varieties under different water supplies. *Theor Appl Climatol* [Internet]. 2019 [cited 2021 Aug 30];137:1515-28. Available from: <https://bit.ly/3yzLiUU>.
48. Molino JH, Califra A. *Agua disponible de las Tierras del Uruguay: 2da. Aproximación* [Internet]. 2001 [cited 2021 Aug 30]. 13p. Available from: <https://bit.ly/3DtUJsm>.
49. Giménez L. Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo. *Agrociencia Uruguay* [Internet]. 2017 [cited 2021 Aug 30];21(2):77-90. Available from: <https://bit.ly/3jswS4n>.
50. Steduto P, Hsiao T, Raes D, Fereres E. *AquaCrop: the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles*. *Agron J* [Internet]. 2009 [cited 2021 Aug 30];101(3):426-37. Available from: <https://bit.ly/3kAyqc2>.
51. Otero A, Montoya F, García C. *Programación del riego*. Montevideo: INIA; 2017. 68p. (Serie Técnica; 232).
52. Pereira LS, Teodoro PR, Rodrigues PN, Texeira JL. *Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG*. In: *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Dordrecht: Kluwer; 2003. p. 161-80.



53. Alfonso C, Barbieri P, Hernández M, Lewczuk NA, Martínez JP, Echarte MM, Echarte L. Water productivity in soybean following a cover crop in a humid environment. *Agric Water Manag* [Internet]. 2020 [cited 2021 Aug 30];232:106045. Available from: <https://bit.ly/3Bs2zRF>.
54. Payero JO, Tarkalson DD, Irmak S, Davison D, Petersen JL. Effect of timing of a deficit irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry mass. *Agric Water Manag* [Internet]. 2009 [cited 2021 Aug 30];96(10):1387-97. Available from: <https://bit.ly/3t3Zjc4>.
55. Viets FG. Fertilizers and the efficient use of water. *Adv Agron*. 1962;14:223-64.
56. Bos MG. Irrigation efficiencies at crop production level. *ICID Bull*. 1980;29(2):18-25.
57. Djaman K, Irmak S. Soil water extraction patterns and crop, irrigation, and evapotranspiration water use efficiency of maize under full and limited irrigation and rainfed settings. *Trans ASABE* [Internet]. 2012 [cited 2021 Aug 30];55(4):1223-38. Available from: <https://bit.ly/38sL47c>.
58. Demirtas C, Yazgan S, Candogan BN, Sincik M, Buyukcangaz H, Goksoy AT. Quality and yield response of soybean (*Glycine max* L. Merrill) to drought stress in sub-humid environment. *Afr J Biotechnol* [Internet]. 2010 [cited 2021 Aug 30];9:6873-81. Available from: <https://bit.ly/3kFc2ON>.

4. AJUSTE DEL MODELO AQUACROP EN MAÍZ CON DIFERENTES NIVELES DE RIEGO EN CONDICIONES DE CLIMA TEMPLADO

Hayashi R.¹, Dogliotti S.²

¹Universidad de la Republica, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay.

²Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Montevideo, Uruguay.

4.1. RESUMEN

El modelo AquaCrop permite evaluar estrategias de riego que mejoren el uso del agua de riego. En este estudio se calibró y validó este modelo para maíz utilizando datos experimentales de ensayos de riego con diferentes niveles deficitarios, en tres temporadas, 2015/16 y 2016/17(calibración) y 2014/15 (validación), en el sur del Uruguay. Se evaluaron tres láminas máximas de reposición: 3, 6 y 9 mm día⁻¹ y seco (solo precipitaciones). El cultivo fue parametrizado para las condiciones locales y se ajustaron los coeficientes de estrés hídrico. La calibración simuló bien rendimiento, biomasa y humedad del suelo en los tratamientos regados. Todos los índices estadísticos utilizados para evaluar el modelo indicaron un buen ajuste entre datos observados y simulados, a excepción del coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF). En el seco, el modelo subestimó el rendimiento (EF de -0,52). El suelo del ensayo permitía una mayor exploración radical que la utilizada inicialmente. Con 0,90 m profundidad, el modelo simuló bien el rendimiento del seco, principalmente en el año seco (EF de 0,79). El modelo predice el rendimiento con buen ajuste en diferentes situaciones de riego y precipitaciones si se ajustan los coeficientes de estrés y el cultivo es parametrizado en forma adecuada, principalmente la profundidad de raíces.

Palabras clave: riego deficitario, aquacrop, Zea Mays, clima templado

4.2. SUMMARY

The AquaCrop model allows evaluating irrigation strategies to improve the use of irrigation water. It was calibrated and validated for maize using experimental data from irrigation trials with different deficit levels, in three seasons, 2015/16, 2016/17 (calibration) and 2014/5 (validation), , in southern Uruguay. Three maximum irrigation depths were

evaluated: 3, 6 and 9 mm day⁻¹ and rainfed (rainfall only). The crop was parameterized for local conditions and water stress coefficients were adjusted. The calibration simulated the yield, biomass and soil moisture in the irrigated treatments with good performance. All the statistic indexes used to evaluate the adjustment between observed and simulated data model indicated a good model performance, with the exception of the efficiency coefficient of the Nash-Sutcliffe (EF). The model underestimated the yield in the rainfed treatment, (EF of -0.52). The soil allowed for further root exploration. At 0.90 m root depth, the model simulated well the yields in the rainfed treatment, mainly in dry years (EF of 0.79). The model predicts the yield with good adjustment in different irrigation and rainfall situations if the stress coefficients are adjusted and the crop is properly parameterized, mainly the root depth.

Keywords: deficit irrigation, AquaCrop, Zea Mays, temperate climate

4.3. INTRODUCCIÓN

Las proyecciones actuales de crecimiento poblacional (Naciones Unidas, 2010) estiman que en 2030 habrá cerca de 8,5 billones de personas. Esta población creciente aumentará la demanda de alimentos, fibras y servicios relacionados con los recursos hídricos. La competencia por el uso del agua en diversas actividades, en parte incrementado por el aumento poblacional, genera presión en la producción de alimentos. Este efecto es más notorio y preocupante en zonas áridas o semiáridas donde el agua es escasa. En zonas templadas y húmedas, el cambio climático causará alteraciones en los patrones de distribución de las precipitaciones y de su intensidad, siendo menos efectivas para los cultivos y aumentando los escurrimientos (IPCC, 2014). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) indica una tendencia al incremento de los eventos extremos de precipitación, así como de los eventos de calor y sequía, para América central y del Sur (IPCC, 2014). Maximizar la eficiencia de uso del agua y de la energía constituyen objetivos principales de muchos trabajos de investigación, para lograr mayor productividad del agua y otros recursos de producción. No solo mejora el uso de los recursos escasos, sino también la rentabilidad de la producción y su sostenibilidad.

En Uruguay, la ocurrencia de eventos de déficit de precipitación acumulado máximo durante la primavera y el verano no muestra tendencias significativas generalizadas, aunque en la mayoría de las estaciones meteorológicas la tendencia es al déficit decreciente. Esto no es incompatible, sin embargo, con la existencia de eventos de déficit históricamente muy altos (asociados a secas extremas) en años recientes. En el año 2015, el déficit hídrico impactó muy especialmente sobre el sector agropecuario, dejando importantes pérdidas económicas (MVOTMA-SNRCC, 2016).

En Uruguay, la disponibilidad de agua de riego no presenta grandes limitaciones (FAO-AQUASTAT, 2022); sin embargo, el riego es utilizado en un bajo porcentaje de la superficie sembrada de cultivos de verano (3 %). Uno de los principales argumentos que impiden una mayor adopción del riego, particularmente en el maíz, son los altos costos energéticos (Bachino, 2012). Tradicionalmente, el riego es utilizado para obtener rendimientos potenciales, cubriendo la demanda total de agua de los cultivos. Sin embargo, las estrategias de riego deficitario son alternativas que permiten mejorar la eficiencia del uso del agua (Ferreeres y Soriano, 2007) y reducir los costos directos de riego.

Una estrategia a tener en cuenta es planificar el uso del agua almacenada en el suelo para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos durante el período de mayor demanda (período de punta o pico). El uso de esta estrategia requiere que el sistema de riego se opere de manera que el depósito de agua disponible del suelo esté lleno (o casi lleno) antes de ingresar al período de punta. Las necesidades de agua de esta etapa podrán satisfacerse mediante el sistema de riego y mediante el agotamiento planificado de la zona de la raíz. La magnitud en la cual se reduce el caudal de diseño para el sistema de riego depende de la cantidad de agua disponible que se puede almacenar en la zona de la raíz del cultivo y la duración del período de punta. Esta estrategia conlleva el riesgo de que un período de uso máximo anormalmente largo o fallas inesperadas del sistema durante o justo antes del período de uso máximo puedan provocar un estrés no planificado en el cultivo debido a la falta de agua (Bernardo et al., 2005, Hoffman et al., 2007).

Estas alternativas de riego deficitario deben ser evaluadas tratando de abarcar condiciones ambientales diversas (clima y suelo) que normalmente ocurren en clima templado y húmedo. A nivel de experimentación a campo, es posible recabar información acotada al tiempo de experimentación. La posibilidad de utilizar modelos ayuda en la

evaluación de estrategias de riego y manejo del cultivo, siempre que el modelo sea adecuadamente calibrado y validado para la zona de estudio.

El modelo AquaCrop, desarrollado por la FAO (Raes et al., 2009, 2012), es utilizado a nivel mundial para la evaluación de la respuesta al agua de cultivos de interés comercial. Es considerada como herramienta de ayuda en la toma de decisiones para definir estrategias de manejo del cultivo que permitan mitigar las consecuencias del cambio climático.

En Uruguay, el modelo ha sido parametrizado para maíz (Giménez, 2019) con datos de experimentos con déficit hídrico, con buen ajuste en situaciones de confort hídrico o déficit moderado, mientras que en situaciones de déficit hídrico severo la simulación no fue adecuada. En estas últimas condiciones, el modelo estimó menor rendimiento debido a la subestimación de la transpiración y de la biomasa total producida.

El maíz es uno de los principales cultivos de verano en Uruguay y de importancia económica mundial, tanto por su uso para la alimentación humana y animal como para la producción de energía y otros productos industriales.

El objetivo del presente trabajo es ajustar el modelo AquaCrop para el cultivo de maíz a las condiciones climáticas del sur de Uruguay, con diferentes manejos del agua de riego.

4.4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1. Experimentos de campo

Los datos necesarios para ajustar el modelo AquaCrop corresponden a datos de campo colectados durante 3 temporadas de experimentación de maíz con riego deficitario (Hayashi y Dogliotti, 2021). El experimento se realizó en el Campo Experimental de la Facultad de Agronomía, Centro Regional Sur, Canelones, Uruguay (34°37' S y 56°13'O) en las temporadas 2014-15, 2015-16 y 2016-17. De acuerdo con la clasificación de Koppen y Geiger, el clima es templado/mesotérmico, sin estación seca y verano caluroso (Cfa). La precipitación anual promedio es de 1200 mm con alta variabilidad interanual e irregularidad anual. La temperatura media estival varía entre 18 y 23 °C, la radiación promedio varía entre 400 y 580 cal cm⁻² día⁻¹, con una humedad promedio del 72 %.

El suelo predominante es un Brunosol Eutrítico típico Lac., de la Unidad de suelos Tala Rodríguez, correspondiente a Argiudol típico según la clasificación taxonómica del USDA. En el cuadro 1 se presenta información sobre sus propiedades hídricas.

Cuadro 1: características del suelo utilizadas en el modelo, correspondientes con el suelo del experimento

Horizonte m	Saturación Vol %	CC Vol %	PMP Vol %	DA gr cm ⁻³	Ksat mm día ⁻¹	Textura
0 - 20	52,0	38,9	22,5	1,25	500	Fr Lm Ac
20 - 40	46,0	43,6	251	1,43	300	Fr Ac
40- 60	46,0	38,6	21,4	1,43	200	FrAc
+ 60	47,6	38,4	21,4	1,40	200	FrAc
Número de curva:		72				
Agua rápidamente evaporable del horizonte superficial (mm): 13						

CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; DA: densidad aparente; Ksat: conductividad hidráulica en flujo saturado; Vol %: humedad volumétrica

La velocidad de infiltración del suelo es de 8,8 mm h⁻¹, medida con el método de doble anillo infiltrómetro, cuando el contenido de humedad del suelo era del 50 % de agotamiento del AD (umbral de riego).

4.4.2. Diseño experimental

Los ensayos en maíz consistieron en tres tratamientos de riego y un testigo sin riego: 3 mm (máxima lámina de reposición 3 mm día⁻¹), 6 mm (máxima lámina de reposición 6 mm día⁻¹), 9 mm (máxima lámina de reposición 9 mm día⁻¹) y seco (solo recibe la precipitación). Cada tratamiento indica la capacidad máxima diaria de reposición con riego. Si el cultivo tiene necesidades hídricas diarias mayores a estas láminas, el riego será deficitario generándose diferentes niveles de riego deficitario en diferentes etapas fenológicas del cultivo.

El diseño experimental fue de bloques completos con parcelas al azar, 4 tratamientos y 4 repeticiones. Las parcelas eran de 12 x 6 m, con 12 filas separadas 0,50 m, sin espacios libres entre parcelas, para evitar efectos de borde que generen condiciones microclimáticas diferentes dentro del ensayo (efecto oasis). El área experimental total fue de 1152 m².

4.4.3. Manejo del cultivo

Se utilizaron híbridos de maíz de alto potencial con base en la evaluación nacional de cultivares realizado por el Instituto Nacional de Semillas (INASE). Las fechas de siembra fueron 6 de noviembre de 2014, 30 de octubre de 2015 y 9 de noviembre de 2016. Se

realizó siembra directa, con filas a 0,50 m de separación y 0,15 m entre plantas y la población objetivo fue de 100 mil plantas ha⁻¹, acorde a información de investigación local en situaciones de cultivo regado. Se realizaron aplicaciones de herbicida pre y postsiembra para evitar aparición de malezas. Para evitar restricciones nutricionales, se fertilizó con 78 kg ha⁻¹ de N y 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Fosfato Diamónico, 18-46-0) a la siembra y se refertilizó con 150 kg ha⁻¹ de N (Urea), en V6.

Para obtener en forma precisa las láminas de riego de cada tratamiento se utilizó el sistema de riego por goteo, con limitadores de presión para lograr una alta uniformidad en cada parcela. Se colocó un lateral por fila de cultivo, con goteros de 4 l h⁻¹ separados 1,0 m, en tresbolillo para mejor distribución del agua. La tasa de aplicación fue de 8 mm h⁻¹, acorde a la velocidad de infiltración del suelo. Los riegos se realizaron dos o tres veces por semana, aplicando el agua correspondiente a las necesidades totales de los días previos, hasta el máximo permitido en cada tratamiento.

4.4.4. Colecta de datos y medidas realizadas

4.4.4.1. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos para los archivos de clima necesarios para el modelo fueron obtenidos de la estación meteorológica del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Las Brujas, ubicado a 20 km del sitio de estudio. Las precipitaciones durante el período de experimentación fueron obtenidas localmente con un pluviómetro colocado en el ensayo. La caracterización climática de las tres temporadas puede encontrarse en Hayashi y Dogliotti 2021.

4.4.4.2. Medidas en el cultivo

La fenología del cultivo se realizó mediante observación de las plantas y utilizando la escala de Ritchie y Hanway (1982).

La evolución de la biomasa aérea y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) se evaluaron en el segundo y tercer año del ensayo. Aproximadamente cada 30 días se extrajeron las plantas de un metro lineal en la parte central de cada parcela y se secaron en estufa a 60 °C hasta peso constante.

El rendimiento en grano se determinó cosechando manualmente tres submuestras de 2 m² cada una, en las filas centrales de cada parcela, totalizando 6 m² por parcela. Se midió rendimiento de grano, materia seca total y peso de 1000 granos. Se ajustó el peso del grano a 14 % de humedad.

Finalmente, el índice de cosecha (IC) se estimó como: peso de grano seco/materia seca total.

4.4.4.3. Evolución del contenido de humedad en el suelo

Se realizó un seguimiento de la humedad del suelo utilizando una sonda de neutrones (CPN, modelo 503-DR Hydroprobe, Campbell Pacific Nuclear Corp., CA, EE. UU.) en los dos primeros años y en el último año, una sonda de capacitancia portátil (FDR, Delta T Devices, PR2). Ambas sondas fueron calibradas para los diferentes horizontes hasta una profundidad de 100 cm, y se logró una adecuada recta de calibración.

Las medidas con la sonda de neutrones fueron realizadas de 2 a 3 veces por semana. En cambio, las medidas con la sonda FDR se realizaban antes y después del riego.

4.4.5. Ajuste y validación del modelo AquaCrop

El modelo AquaCrop estima el rendimiento de un cultivo a partir de la estimación de la biomasa. Es un modelo sencillo, robusto y de fácil uso (Steduto et al., 2009, Raes et al., 2009). Es ampliamente utilizado en todo el mundo, siendo una herramienta que permite evaluar estrategias de manejo del agua para predecir los rendimientos.

La estimación del rendimiento se realiza en cuatro etapas. La primera consiste en la simulación de la cobertura del cultivo (CC). En función de la cobertura generada por el cultivo, en la segunda etapa, el modelo estima la transpiración del cultivo (T), considerando los diferentes estreses que pueden ocurrir a lo largo el ciclo del cultivo. En la tercera etapa, el dato de transpiración es utilizado para calcular la biomasa (B) teniendo en cuenta la productividad del agua normalizada (WP*). Finalmente, la B es utilizada para estimar el rendimiento final del cultivo (Steduto et al., 2009, Raes et al., 2009).

4.4.5.1. Ajuste del modelo

El modelo AquaCrop requiere datos del cultivo para realizar las simulaciones en función del agua consumida. El cultivo de maíz está calibrado para este modelo; sin embargo, algunos parámetros deben ajustarse para las condiciones locales donde se realizó la experimentación.

Para la calibración/ajuste del modelo se tuvieron en cuenta los datos experimentales de la temporada 2015-16, ya que las condiciones climáticas determinaron una mayor demanda hídrica, la cual está asociada a mayores rendimientos, y las evaluaciones de campo se tomaron de forma más intensiva durante esa temporada. Se utilizaron los datos del tratamiento de 9 mm, ya que es el que cumplía con las necesidades hídricas del cultivo

sin generar condiciones de déficit en ningún momento del ciclo. Se compararon la cobertura, la biomasa, el rendimiento y el contenido de agua del suelo.

La evaluación del modelo AquaCrop en diferentes niveles hídricos del cultivo se logró comparando el desarrollo del dosel simulado, la acumulación de biomasa, el rendimiento de grano y la humedad del suelo con las observadas a campo.

4.4.5.2. Otras consideraciones

El ensayo se llevó a cabo sin deficiencias nutricionales, en ausencia de malezas y con agua de riego de buena calidad, por lo cual esos aspectos no fueron tenidos en cuenta en el ajuste del modelo.

El sitio experimental tiene una pendiente suave (1 %) y el cultivo se realizó siguiendo dicha pendiente para favorecer la escorrentía en eventos de lluvia abundante. Para evitar condiciones de anegamiento que perjudiquen el cultivo, se seleccionó esta opción de manejo de campo en el modelo.

Las simulaciones fueron iniciadas 10 días previos a la fecha de siembra, lo cual permitió incorporar al balance hídrico precipitaciones que ocurrieron en presiembra y que afectaron los datos de humedad del suelo simulados por AquaCrop.

Para cada tratamiento y en cada temporada se confeccionó un archivo de contenido de agua del suelo que incluía los datos medidos con sonda de neutrones o FDR en el experimento de campo, y en las últimas dos temporadas archivos de producción de biomasa aérea (OBS). El modelo posteriormente realizó el análisis estadístico del ajuste de las simulaciones (SIM) con los datos observados (OBS).

4.4.5.3. Procedimiento para el ajuste del modelo

En primer lugar se ajustaron los parámetros no conservativos del modelo, dependientes del manejo del cultivo (densidad de siembra, profundidad radical inicial y final, momento en el cual se llega a la máxima profundidad radical, cobertura máxima, duración de las diferentes etapas fenológicas). Posteriormente, el ajuste de los otros parámetros del modelo fue iterativo, modificando principalmente los parámetros no conservativos. En cada cambio de los datos de entrada se ejecutaron simulaciones utilizando el archivo de cultivo calibrado y el archivo de riego correspondiente a cada tratamiento. Una vez que se logró un buen ajuste de los parámetros del modelo con el tratamiento sin déficit hídrico, se compararon los valores simulados y medidos de biomasa y rendimiento de grano para los tratamientos con riego deficitario.

4.4.5.4. Evaluación estadística del ajuste del modelo

Para evaluar la bondad de ajuste de la simulación de la biomasa y del contenido de agua del suelo realizada por AquaCrop, el modelo utiliza las siguientes índices estadísticos: coeficiente de correlación de Pearson (r), raíz del error cuadrático medio (RMSE en mm), raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE %), coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe, (EF) e índice de concordancia de Willmott (d) (Ec. 1 a 5)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad \text{Ec. 1}$$

r , el coeficiente de correlación de Pearson, puede tomar valores entre $0 < r < 1$. A mayor valor de r , mejor ajuste. El uso de esta medida de bondad de ajuste se recomienda cuando se espera una relación lineal entre las variables observadas y simuladas.

$$\text{RMSE} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad \text{Ec. 2}$$

RMSE, error cuadrático medio de la raíz, expresa la varianza del error residual, varía de $0 + \infty$, indica qué tan bien ajusta el valor medido con el valor predicho del modelo. Cuando está cercano a cero, indica un buen ajuste entre medido y simulado.

$$\text{NRSME} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{O}} \quad \text{Ec. 3}$$

NRMSE, relación entre el RMSE y la media de los valores observados, expresado en porcentaje. La simulación es excelente cuando NRSME es menor al 10 %, buena entre 10 y 20 %, aceptables, entre 20 y 30 % y pobre si es mayor a 30 % (Jamieson et al., 1991)

$$\text{EF} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{Ec. 4}$$

EF, coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF), expresa la magnitud relativa del error cuadrático medio cuando se compara con la varianza de los datos observados. Varía entre $-\infty$ y 1, EF = 1 indica ajuste perfecto, EF= 0 indica que las predicciones del modelo son tan precisas como el promedio de los datos medidos y, si es negativo, indica que el promedio de los datos medidos dan una mejor predicción que el modelo, o sea, que el modelo no aporta.

Cuadro 2: indicadores de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF)

EF	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2-0,4	Satisfactorio
0,4-0,6	Bueno
0,6-0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

Fuente: Molnar (2011)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

Ec. 5

Donde:

O_i : Valor observado (medido)

\bar{O} : Media de los valores observados

S_i : Valor simulado

\bar{S} : Media de los valores simulados

d , el índice de concordancia de Willmott (1982), varía entre 0 y 1. El modelo tiene un buen ajuste cuando el índice está cercano a 1 y se considera un mal ajuste si el valor está cercano a 0.

Para la variable rendimiento en grano, a los índices mencionados anteriormente se agregaron el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de regresión (b) y el error medio absoluto (MAE)

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad \text{Ec. 6}$$

R^2 , coeficiente de determinación, va de 0 a 1, valores altos indican menor varianza del error y, normalmente, valores mayores a 0,5 son considerados aceptables (Santhi et al., 2001) y, cuanto más cercano a 1, indica menos error de la varianza

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i \times S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad \text{Ec. 7}$$

b , coeficiente de regresión, si está cerca de 1, indica que los valores simulados están estadísticamente cercanos a los observados

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad \text{Ec. 8}$$

MAE, error medio absoluto, expresa la magnitud de la media de los errores de estimación. Cuantifica la precisión de una técnica de predicción comparando los valores predichos frente a los observados.

4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.5.1. Ajuste del modelo AquaCrop

En los siguientes cuadros (3 y 4) se presentan los principales parámetros ajustados utilizados en el modelo AquaCrop para simular la biomasa y el rendimiento en grano del maíz.

Cuadro 3: valores predeterminados de AquaCrop (Hsiao et al., 2009) y valores ajustados para los principales parámetros conservativos del modelo utilizados en la simulación de maíz.

Parámetros conservativos	Modelo	Calibrado
Productividad normalizada del agua del cultivo (g m ⁻²)	33,7	34,3
Índice de cosecha de referencia (%)	48	55
Temperatura base (°C)	8	8
Temperatura máxima (°C)	30	30
Coefficiente de crecimiento del dosel (% / día) CGC*	16,312	14,789
Coefficiente de disminución del dosel (% / día) CDC*	11,691	13,724
Incremento de la cobertura (en fracción de la cobertura del suelo/GDD)	0,0125	0,0118
Disminución en cobertura (en fracción de suelo cubierto, en GDD*)	0,010	0,00954
Coefficiente de transpiración del cultivo a 100 % de cobertura.	1,05	1,12
Factor de agotamiento del agua del suelo para la expansión del dosel (umbral superior)	0,14	0,10
Factor de agotamiento del agua del suelo para la expansión del dosel (umbral inferior)	0,72	0,60
Factor de agotamiento del agua del suelo para control estomático (umbral superior)	0,69	0,45

*del inglés, CGC: *Canopy Growth Coefficient*; CDC: *Canopy Decline Coefficient*, expresados como porcentaje diario, GDD, *Growing Degree Day* (grados día)

El índice de cosecha (IC) utilizado en el modelo (55 %) fue superior al 48 % propuesto, debido al uso de variedades de maíz de alto rendimiento que surgen como recomendación de la evaluación de cultivares realizado por el INASE-INIA.

La profundidad radical fue otro parámetro que se ajustó en forma iterativa. Se inició con una profundidad radical de 70 cm, con la cual los tratamientos regados simulaban bien los rendimientos y la biomasa; sin embargo, el tratamiento seco no lograba un buen ajuste. Se evaluaron otras profundidades (0,80, 0,90 y 1,00 m) que el suelo del ensayo permitía y se llegó a que con 0,90 m las simulaciones del seco ajustaban mejor con los datos observados (ver cuadro 5).

Cuadro 4: valores predeterminados de AquaCrop (Hsiao et al., 2009) y valores ajustados para los principales parámetros no conservativos del modelo utilizados en la simulación de maíz.

Parámetros No conservativos	Modelo	Calibrado
Densidad de plantas (pl ha ⁻¹)	70000	100000
Cobertura inicial del cultivo al 90 % de emergencia (%)	46	65
Máxima cobertura del cultivo (CCx) en fracción del suelo cubierto	0,96	0,96
Tiempo desde siembra a emergencia, GDD	80	65
Tiempo desde siembra a máxima profundidad radical, GDD (días)	1409	927
Tiempo desde siembra a inicio de senescencia, GDD	1400	1422
Tiempo desde la siembra hasta la floración, GDD	880	886
Tiempo desde la siembra hasta la madurez, GDD	1700	1724
Longitud de la etapa de floración, GDD	180	232
Duración de la construcción del índice de cosecha, GDD	750	827
Profundidad radical mínima efectiva (m)	0,30	0,20
Profundidad máxima de enraizamiento (m)	2,30	0,70
Máxima extracción de agua por las raíces en el primer cuarto de la zona radical (m ³ de agua m ⁻³ de suelo. día)	0,045	0,048
Máxima extracción de agua por las raíces en el último cuarto de profundidad (m ³ de agua m ⁻³ de suelo día)	0,011	0,007

Se modificó el tiempo desde la siembra hasta máxima profundidad radical. Los datos por defecto indican que la máxima profundidad se alcanza cuando el cultivo inicia la etapa de senescencia (Hsiao et al., 2009). Según Tarjuelo (2005), para cultivos anuales es válido considerar que la profundidad radical efectiva máxima se alcanza a partir del momento en que se llega al Kc máximo y permanece constante hasta el final del ciclo del cultivo. Según Fassio et al. (1998), hasta casi R3 hay crecimiento radical; luego de este estadio, este es limitado. Además, indican que esta etapa se da, aproximadamente, a 80 días después de la emergencia. En la calibración, se ubicó esta etapa al inicio de la floración (71 días desde la siembra). Este ajuste afecta el resultado de las simulaciones, ya que los rendimientos logrados en los ensayos no eran simulados por el modelo debido a que en la etapa de formación del rendimiento consideraba menos agua disponible de la

que realmente había en el suelo, porque la exploración radical era menor. Cuando se modifica este dato los rendimientos ajustan mejor a los observados. Hsiao et al. (2009) indican una tasa de crecimiento de la raíz en maíz de 2,0 a 2,3 cm d⁻¹, lo cual lleva a que la máxima profundidad (2,30 m) se dé a inicios de la senescencia del follaje. En el presente estudio, se consideró que las raíces podrían llegar a los 0,90 m o 1,0 m y que esas profundidades ocurren 10 días luego de que el cultivo alcanza la máxima cobertura.

La densidad de siembra ajustada a 100 mil plantas por ha (datos del ensayo) modifican la cobertura inicial del cultivo al 90 % de emergencia (CCo), siendo esta del 69 % respecto a la calibrada para 70 mil plantas por ha (46 %). Si bien el tamaño del dosel por planta (cc_o) es un parámetro conservativo, la densidad de siembra afecta la CC_o, ya que se define como la multiplicación del cc_o por la densidad de plantas (Steduto et al., 2012). Este parámetro afecta las pérdidas de agua por evaporación en esta etapa inicial, la cual resulta improductiva para el cultivo (agua evaporada que no pasa por la planta). En la medida en que el cultivo logre una mayor cobertura de la superficie del suelo en menor tiempo (mayor sombreado de la superficie), dichas pérdidas se ven reducidas, lo que mejora el uso del agua.

Los parámetros de crecimiento y disminución de la cobertura del cultivo (CGC y CDC) calibrados fueron de 13,37 % d⁻¹ y 12,53 % d⁻¹, respectivamente. Estos valores difieren entre 18 y 7 % respecto a los valores propuestos por Hsiao et al. (2009). El CGC calibrado es menor, lo que significa que el cultivo tiene una tasa de crecimiento del follaje menor y alcanzó la máxima cobertura unos días después; por otra parte, el CDC es mayor, por lo cual la etapa de senescencia se daría en menos días. Sin embargo, el modelo ajustado con datos observados tiene una etapa de floración y de construcción del rendimiento mayor a los valores por defecto, lo cual puede afectar el rendimiento final del cultivo. La WP* (34,3 g m⁻²) fue similar al propuesto por Hsiao et al. (2009) y al obtenido por Abedinpur et al. (2012) y Clemente G. (2020).

En lo referente a los coeficientes de estrés hídrico, estos coeficientes están relacionados con el agotamiento del agua en la zona radical. El estrés que provoca el cierre de los estomas (conductancia estomática, K_{s_{sto}}), según la calibración de FAO (Hsiao et al., 2009), inicia cuando el contenido de humedad del suelo desciende a menos del 0,69 del ADT, indicando que es un cultivo tolerante al estrés hídrico. Este coeficiente fue modificado a 0,45 (cultivo sensible al estrés hídrico). Este mismo ajuste lo realiza

Abedinpour et al., 2012 y 2014, Ran et al., 2018, pero a 0,5 (entre moderadamente sensible a sensible al estrés hídrico). Es importante ajustar este coeficiente, ya que indica el contenido de humedad a partir del cual se inician los procesos de cierre estomático, que es el estrés asociado a la disminución del rendimiento por disminuir la transpiración haciéndola menor a la potencial (Steduto et al., 2012). Giménez (2019), con datos experimentales locales, utiliza el $K_{s\text{sto}}$, de Hsiao et al. (2009) (valor por defecto), obteniendo simulaciones con errores en las situaciones con estrés hídrico en maíz en años con bajas PP y atribuye esos errores al no ajuste de los coeficientes de estrés, confirmando la necesidad de ajustar estos valores.

4.5.2 Evaluación del ajuste del modelo: calibración y validación

4.5.2.1. Rendimiento en grano y producción de biomasa aérea

En el cuadro 5, se presentan los datos de rendimiento en grano del maíz observados en los experimentos (OBS) y los rendimientos simulados por AquaCrop (SIM). Como se mencionó anteriormente, los datos de las temporadas 2015-16 y 2016-17 fueron utilizados para calibrar el modelo y los del año 2014-15, para la validación.

La predicción del error (Pe) de la calibración y la validación del modelo AquaCrop indican valores absolutos altos para el tratamiento secano (78,2 % y 31,8 %) en las temporadas donde la ETo fue superior al promedio de 38 años para la zona de estudio (Hayashi y Dogliotti, 2021). En estos años, el modelo simula rendimientos más bajos a los observados en el experimento. En los demás tratamientos, el Pe(%) fue menor al 10 %. Todos los indicadores de ajuste del modelo utilizados para evaluar la calibración del modelo (NRMSE, RMSE, d, R², MAE, b) dan valores que indican un buen ajuste, a excepción del coeficiente de eficiencia (EF), el cual da valores negativos indicando que el modelo no aporta, es decir, que el promedio de los datos medidos dan una mejor predicción que el modelo. Sin embargo, estos indicadores, incluyendo el EF, mejoran cuando se ajusta la profundidad radical de la simulación en el caso del secano (ver cuadros 5, 6, 7 y 8).

La producción de biomasa final simulada tiene un ajuste muy bueno con respecto a lo observado en el experimento de campo, teniendo en cuenta los indicadores de ajuste presentes en los cuadros 7 y 8 y los rangos manejados para cada indicador mencionados anteriormente. En el caso del Pe, el tratamiento secano en la temporada 2015-16 es el

que presenta el mayor valor absoluto (30,6 %), al igual que ocurrió con el rendimiento en grano en este tratamiento.

Cuadro 5: rendimiento de Maíz (t.ha⁻¹), simulado (SIM) y observado (OBS) en la calibración y validación del modelo AquaCrop, predicción del error (Pe)

RENDIMIENTO (t ha⁻¹)					
2015-16 (Calibración)					
	OBS	SIM		Pe (%)	
		0,70 m	Secano con 0,90 m	0,70 m	0,90 m
Secano	9,323	2,028	7,833	-78,2	-16,0
3 mm	12,917	13,309		3,0	
6 mm	14,247	15,377		7,9	
9 mm	14,665	16,013		9,2	
2016-17 (Calibración)					
Secano	13,364	12,847	14,222	-3,9	6,4
3 mm	14,818	15,312			-3,3
6 mm	16,103	15,756			-2,2
9 mm	17,108	15,861			-7,3
2014-15 (Validación)					
Secano	12,786	8,720	10,868	-31,8	-15,0
3 mm	13,616	13,815		1,5	
6 mm	15,379	15,070		-2,0	
9 mm	17,466	16,009		-8,3	

Cuadro 6: índices estadísticos de ajuste del modelo. Coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe, (EF), raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE %), índice de concordancia de Willmott (d), coeficiente de determinación (R^2), error absoluto medio (MAE en t.ha⁻¹), raíz del error cuadrático medio (RMSE en t.ha⁻¹), y coeficiente de regresión (b).

	CALIBRACIÓN		VALIDACIÓN		
	0,70 m	Secano con 0,90 m	0,70 m	Secano con 0,90 m	Unidades
EF	-0,52	0,79	-0,46	0,54	
NRMSE	19,1	7,2	14,6	8,2	%
d	0,83	0,95	0,78	0,89	
R²	0,82	0,85	0,70	0,81	
MAE	1,596	0,91	1,51	0,97	t ha ⁻¹
RMSE	2,708	1,01	2,17	1,22	t ha ⁻¹
b	0,97	1,01	0,91	0,94	

Cuadro 7: biomasa total observada (OBS) y simulada (SIM) con el modelo AquaCrop, predicción del error (Pe)

BIOMASA (t ha ⁻¹)						
		OBS	SIM		Pe (%)	
			0,70 m	Secano con 0,90 m	0,70 m	Secano con 0,90 m
2015-16	Secano	18,169	12,614	15,624	-30,6	-14,0
	3 mm	28,854	24,527		-15,0	
	6 mm	31,355	28,529		-9,0	
	9 mm	33,722	29,734		-11,8	
2016-17	Secano	26,683	23,810	26,361	-10,8	-1,2
	3 mm	28,766	28,377		-1,4	
	6 mm	30,767	29,240		-5,0	
	9 mm	30,731	29,435		-4,2	

Cuadro 8: índices estadísticos de ajuste del modelo para la biomasa. Coeficiente de determinación (R^2), raíz del error cuadrático medio (RMSE en $t\ ha^{-1}$), raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE %), coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe, (EF), índice de concordancia de Willmott (d), error absoluto medio (MAE) y coeficiente de regresión (b).

Índice	Secano con	Secano con	Unidades
	0,70 m	0,90 m	
R^2	0,93	0,90	
RMSE	3,28	2,58	$t\ ha^{-1}$
NRMSE	11,4	9,00	%
EF	0,45	0,66	
d	0,90	0,92	
MAE	2,85	2,15	$t\ ha^{-1}$
b	0,91	0,93	

El tratamiento seco es el que presenta un mayor error en la predicción dada por el modelo en años con PP escasas (2014-15 y 2015-16). Giménez (2019) obtuvo resultados similares en los rendimientos y producción de biomasa en tratamientos con deficiencias hídricas durante la floración (período crítico). En años con precipitaciones escasas, AquaCrop subestimó el rendimiento y la biomasa. Como se mencionó anteriormente, Giménez atribuyó los errores de estimación a un desajuste de los coeficientes de estrés (K_s) para condiciones severas de deficiencia hídrica. Otra posible causa puede estar relacionada con el crecimiento y profundidad del sistema radical efectivo. Según Allen et al. (1998) y Pereira y Allen (1999), la profundidad radical máxima en cultivos en seco puede ser mayor, llegando a 1,70 m en caso de suelos sin impedimentos de exploración radical. El suelo del presente ensayo, en función de sus características físicas, permitiría explorar hasta los 0,90-1,00 m; sin embargo, las simulaciones iniciales fueron realizadas teniendo en cuenta una profundidad radical efectiva de 0,70 m. Como fue mencionado anteriormente, se consideró la opción de realizar simulaciones en el caso del seco con una profundidad mayor: 0,80 a 1,0 m. Con 0,90 m, el modelo simuló el rendimiento del seco con menores errores, tanto en los rendimientos como en la biomasa (cuadros 5 y 7).

En los datos presentados anteriormente se incluyeron los valores simulados considerando una profundidad de 0,90 m en el caso del secano (valores entre paréntesis). Los indicadores de ajuste del modelo mejoran notoriamente, especialmente el coeficiente de eficiencia (EF), que pasa de valores negativos a positivos mayores a 0,50, lo cual indica un buen ajuste. Por consiguiente, el análisis continuará teniendo en cuenta la simulación del secano con una profundidad radical de 0,90 m.

Según Steduto et al. (2012), la profundización aumenta la zona radical y reduce el déficit de humedad (agotamiento de humedad) si las capas más profundas del suelo tienen alto contenido de agua. En los ensayos, en la temporada 2015-16, los escasos eventos de lluvias ocurridas previas y durante el ciclo del cultivo permitieron recargar el perfil del suelo hasta los 0,90 m, lo cual permitió al cultivo utilizar el agua almacenada a esa profundidad cuando las PP fueron de menor magnitud, apenas 11 mm durante el período crítico (enero de 2016). Por esta razón, el rendimiento del secano resultó poco afectado, rindiendo 9,323 t ha⁻¹ (Hayashi y Dogliotti, 2021).

4.5.2.2 Contenido de agua del suelo

En la figura 1, se presenta la evolución del contenido de agua total del suelo simulado por el modelo y lo observado en el experimento a campo para los tratamientos más deficitarios (secano y 3 mm). Para el secano se consideró el agua total hasta 0,90 m con un contenido de agua total a CC de 357 mm y a PMP de 202 mm, ADT de 155 mm.

En el cuadro 7, se presentan los indicadores de ajuste del modelo entre valores simulados y observados de contenido de agua total del suelo para los 4 tratamientos y los 3 años de evaluación que proporciona AquaCrop. En general, se lograron buenos ajustes en todos los tratamientos.

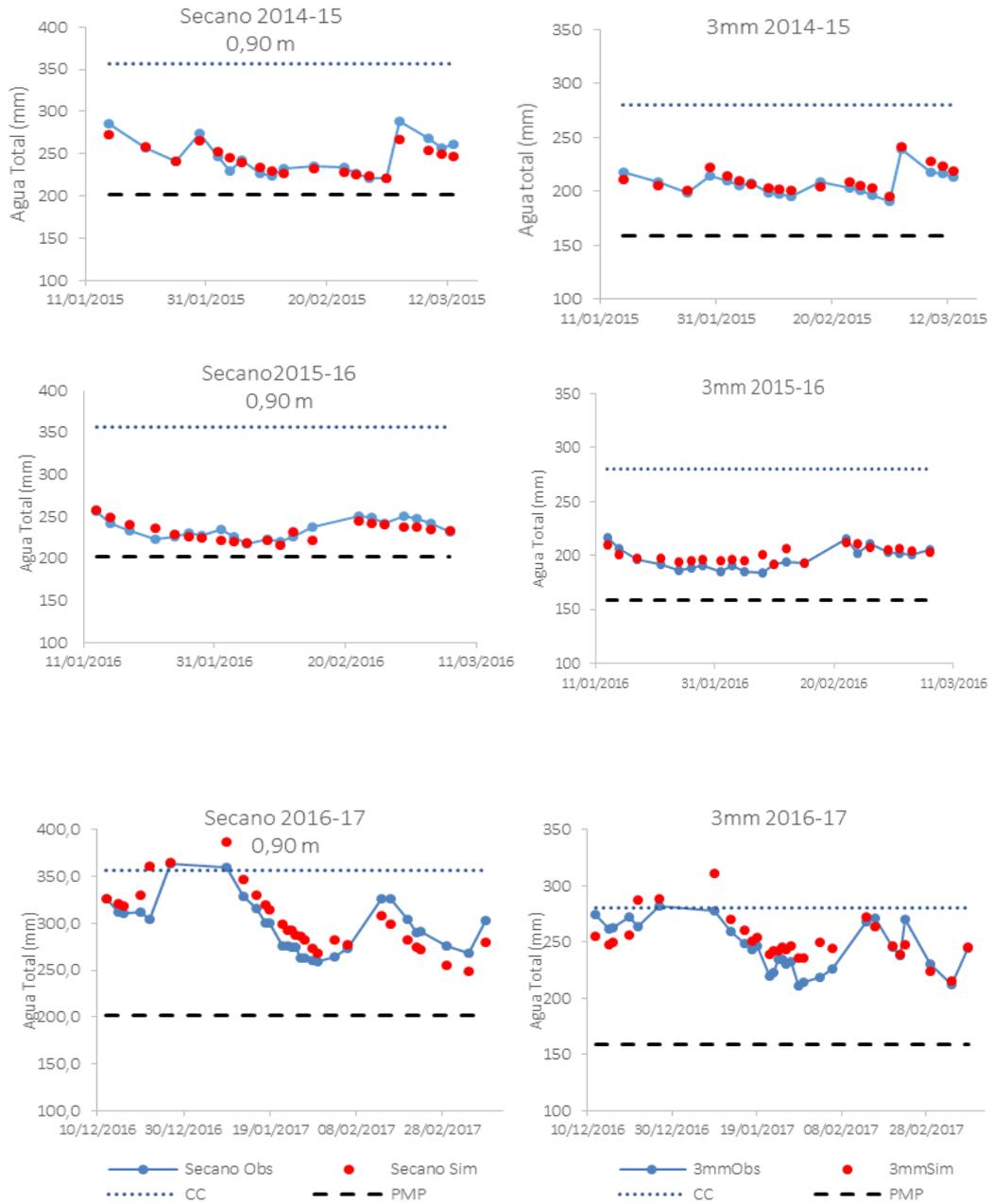


Figura 1: evolución del agua total (mm), simulados (puntos rojos) y observados (línea azul), en los 0,90 m de profundidad radical en el tratamiento secano y a los 0,70 m en el tratamiento de 3 mm. Contenido de agua total (mm) a capacidad de campo (..... CC), y a punto de marchitez permanente (- - - - - PMP).

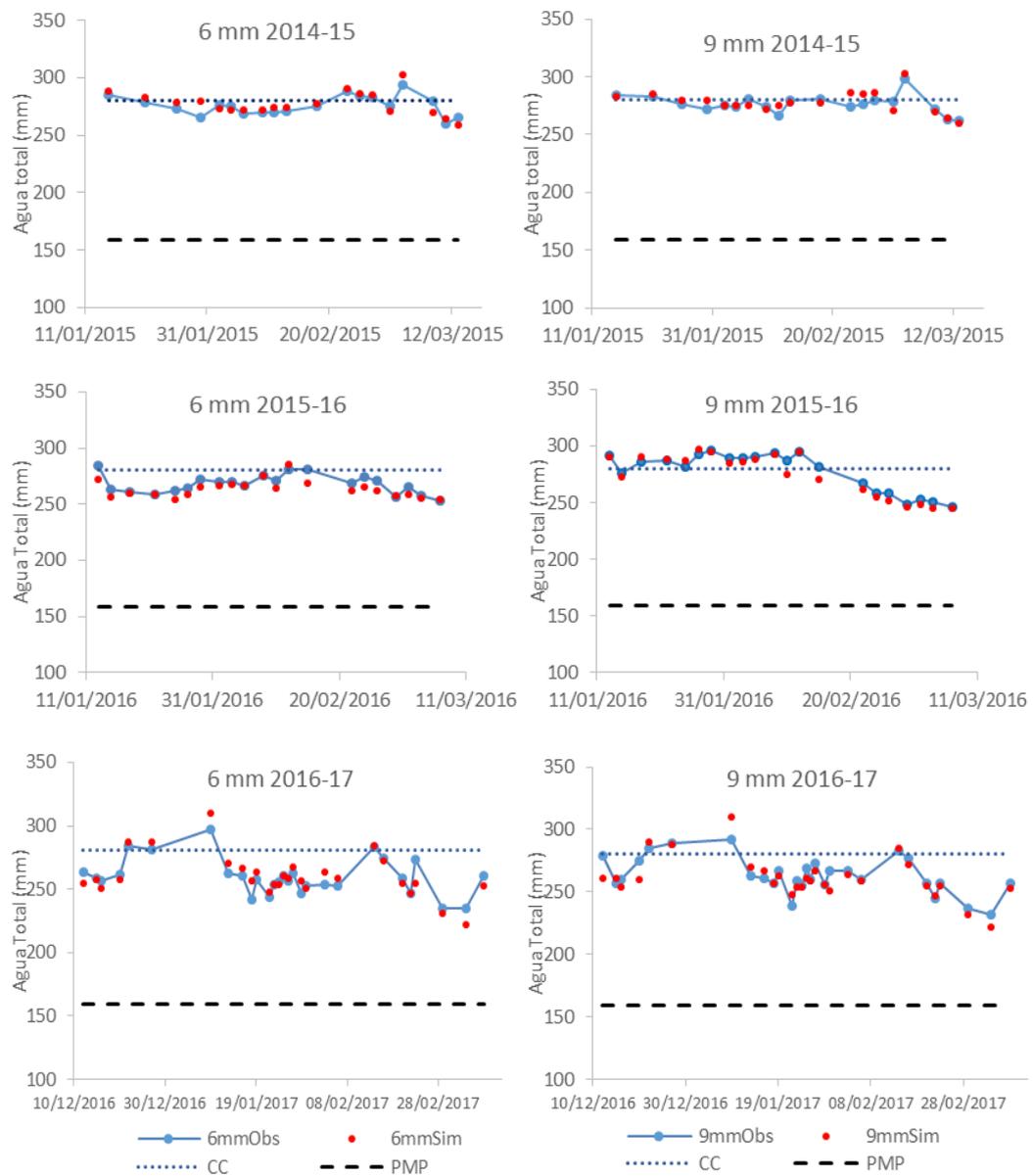


Figura 2: evolución del agua total (mm), simulados (puntos rojos) y observados (línea azul), en los 0,70 m de profundidad radical, en los tratamientos de 6 mm y 9 mm. Contenido de agua total (mm) a capacidad de campo (..... CC), y a punto de marchitez permanente (- - - - - PMP).

Cuadro 7: indicadores de ajuste del modelo entre valores simulados y observados de contenido de agua total del suelo para los 4 tratamientos y los 3 años de evaluación estimados por el modelo.

	Tratamientos	<i>r</i>	RMSE (mm)	NRMSE (%)	EF	Índice de Willmott (<i>d</i>)
2014/15	Secano	0,93	9,2	3,7	0,81	0,93
	3 mm	0,93	5,3	2,5	0,76	0,94
	6 mm	0,84	5,6	2,0	0,55	0,90
	9 mm	0,83	5,4	2,0	0,54	0,90
2015/16	Secano	0,78	7,6	3,3	0,53	0,87
	3 mm	0,80	7,1	3,6	0,45	0,80
	6 mm	0,84	6,1	2,3	0,45	0,85
	9 mm	0,97	5,0	1,8	0,92	0,98
2016/17	Secano	0,82	20,0	6,7	0,50	0,89
	3 mm	0,75	15,8	6,5	0,45	0,83
	6 mm	0,90	7,4	2,8	0,73	0,94
	9 mm	0,90	7,7	2,9	0,71	0,94

r, coeficiente de correlación de Pearson; RMSE, raíz del error cuadrático medio; NRMSE, raíz del error cuadrático medio normalizado; EF, coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe; *d*, índice de concordancia de Willmott.

Los indicadores de ajuste del modelo entre valores observados y simulados de la evolución del agua total en la profundidad radical considerada indican un buen ajuste entre estos (cuadro 7 y figuras 1 y 2). El coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF) dio valores entre 0,45 y 0,92, ajuste bueno a excelente según la clasificación de Molnar (2011). En la temporada 2016-15, la RMSE fue de 20,0 y 15,8 mm y la EF fue de 0,50 y 0,45 en los tratamientos de secano y 3 mm, respectivamente. Si bien el ajuste es bueno, son las dos situaciones donde las simulaciones tuvieron menor concordancia con los valores observados.

En los tratamientos de 6 y 9 mm el contenido de agua en el suelo estuvo en torno al agua total (CC) y, en algunos momentos, por encima de CC. Estas situaciones, que fueron más frecuentes en el tratamiento de 9 mm, son a causa del manejo del riego con umbrales bajos (próximos a CC) y la ocurrencia de PP luego del riego. Esta forma de manejar el riego, dejando agotar el consumo diario y reponiendo el déficit generado, típico de los métodos de riego de alta frecuencia (riego por goteo y pívot central), resulta seguro para el

cumplimiento de las necesidades hídricas de los cultivos, principalmente en las etapas críticas, donde las necesidades hídricas son mayores y el umbral de riego es más exigente (menor agotamiento) respecto a etapas tempranas o tardías (Tarjuelo, 2005, Allen et al., 1998, Bernardo et al., 2005). Sin embargo, son poco eficientes en el uso de las precipitaciones y pueden generar situaciones de suelo con contenido de humedad por encima de CC, como ocurrió en el ensayo, principalmente en la temporada 2016-17. En condiciones de suelo de drenaje pobre, pueden ocurrir problemas de anegamiento; sin embargo, en este ensayo, el suelo tenía buen drenaje y el sistema de cultivo en hileras en el sentido de la pendiente (1 %), favorecieron la rápida evacuación de los excesos hídricos.

Los resultados obtenidos indican que AquaCrop simula bien los rendimientos en situaciones de estrés hídrico leve y riego adecuado (3, 6 y 9 mm) en las tres temporadas evaluadas, cada una con diferentes situaciones climáticas (PP media, PP escasa y PP abundante) (Hayashi y Dogliotti, 2021). En el caso del tratamiento secano, el resultado se vio afectado por las condiciones climáticas de cada temporada evaluada y por la profundidad radical del cultivo. En situaciones de alta demanda atmosférica (ET_o) y escasas PP, el tratamiento secano tuvo un mejor ajuste en el rendimiento y biomasa si se consideraba una profundidad radical de 0,90 m; mientras que, en un año con abundantes PP, el ajuste fue bueno tanto con 0,70 como con 0,90 m.

Es necesario tener presente que las condiciones ensayadas fueron realizadas en un suelo característico de la zona sur del Uruguay (Argiudol típico) con una capacidad de retención de agua disponible media a alta (Molfino y Califra, 2001), siendo este parámetro hídrico del suelo fundamental para el manejo del riego y la respuesta del cultivo.

En este trabajo se comprueba que la simplicidad del modelo AquaCrop en cuanto a datos de entrada mínimos requerido, fácilmente disponible o que se pueden recopilar fácilmente, lo hace fácil de usar por los usuarios finales de tipo profesional o de investigación cuando se quieren evaluar estrategias de riegos deficitarios o riegos completos.

AquaCrop es una gran herramienta que permitiría evaluar opciones de riego con mayor productividad del agua bombeada y mejor aprovechamiento de las precipitaciones, contribuyendo así a mitigar los efectos del cambio climático sobre los cultivos regados.

4.6 CONCLUSIONES

1. El modelo AquaCrop simuló aceptablemente el rendimiento y la producción de biomasa de los tratamientos de riego (3, 6 y 9 mm) y el secano cuando la profundidad de enraizamiento se fijó en 0,90 m.
2. El modelo AquaCrop simuló muy bien la evolución del contenido de agua en el suelo en los tratamientos de riego y de secano.
3. Los resultados de este estudio permiten pensar que AquaCrop puede ser utilizado en nuestro país para evaluar estrategias de riego deficitario en maíz.
4. Es necesario ajustar los coeficientes de estrés del cultivo para mejorar la calidad de las simulaciones.

4.7. BIBLIOGRAFÍA

- Abedinpour M, Sarangi A, Rajput TBS, Singh M, Pathak H, Ahmad T. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 110. 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- Abedinpour M, Sarangi A, Rajput TBS, Singh M. 2014. Prediction of maize yield under future water availability scenarios using the AquaCrop model. *Journal of Agricultural Science* 152(4), 558-574. <https://doi.org/10.1017/S0021859614000094>
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56. FAO, Rome, Italy. 300 p.
- Bachino F. 2012. Análisis de costos y rentabilidades en riego por aspersión. En 2º Seminario Internacional de riego en cultivos y pasturas. Paysandú. Uruguay. 83-97.
- Bernardo, S., Soares, A.A. Mantovani E.C. 2005. Manual de Irrigação. Universidad Federal de Viçosa. 7ma ed. (Actualizada y ampliada). 611 p.
- Clemente G. 2020. Modelamiento del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) e impacto económico ante escenarios futuros de cambio climático usando AquaCrop. Tesis. Universidad Nacional del centro del Perú. Facultad de Agronomía. Perú. 284 p

- FAO-AQUASTAT. (Food and Agriculture Organization) 2022. Base de datos central de AQUASTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [En línea]. Último acceso: 9 febrero 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/aquastat/statistics/query/index.html;jsessionid=CC7831C02D6B731966AAC9A1A76C2255>
- Fassio A, Carriquiry A, Tojo C, Romero R. 1998. Maíz, aspectos sobre su fenología. Serie Técnica N° 101. INIA
- Fereres E, Soriano MA. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*. 58 (2). 147–159.
- Giménez L. 2019. AquaCrop model evaluation in maize under different water availabilities in the western of Uruguay. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*. 9(2), 103- 117. <http://dx.doi.org/10.21276/ijpaes>
- Hayashi R, Dogliotti S. 2021. Water productivity in maize, at different levels of deficit irrigation in humid climate. *Agrociencia Uruguay*, 25(1), e390. Epub 01 de junio de 2021. <https://dx.doi.org/10.31285/agro.25.390>
- Hoffman GJ, Evans RG, Jensen ME, Elliot RL. 2007. *Design and operation of farm irrigation systems*. 2nd edition. ASABE. 862p.
- Hsiao TC, Heng L, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D, Fereres E. 2009. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101. 448–459.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 p.
- Jamieson PD, Porter JR, Wilson DR. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*. 27(4), 337-350. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3).

- Molfino JH, Califra A. 2001. Agua disponible de las Tierras del Uruguay: 2da. Aproximación 13 p [En línea]. Último acceso: 9 febrero 2022. Disponible en: <https://bit.ly/3DtUJsm>.
- Molnar P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Suiza: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich.
- MVOTMA-SNRCC (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente-Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático y Variabilidad) 2016. Cuarta comunicación nacional a la conferencia de las partes en la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Uruguay 2016. [En línea]. Último acceso: 18 junio 2022. Disponible en: <https://www.undp.org/es/uruguay/publications/plan-nacional-de-adaptaci%C3%B3n-la-variabilidad-y-el-cambio-clim%C3%A1tico-para-el-sector-agropecuario-pna-agro>.
- Naciones Unidas. 2010. La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: síntesis 2010. Santiago de Chile: UN. 113p. [En línea]. Último acceso: 18 de junio 2022. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2974/S2010992_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1- A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10 (3), 282–290.
- Pereira LS, Allen RG. 1999. Irrigation and Drainage. En: van Lier HN, Pereira LS, Steiner FR. CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Volume I. Land and Water Engineering. Editorial CIGR – The International Commission of Agricultural Engineering. ASAE
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*. 101 (3): 438-447
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. 2012. Crop Water Productivity. Calculation Procedures and Calibration Guidance. AquaCrop version 4.0. FAO Land and Water Development Division, Rome
- Ran H, Kang S, Li F, Du T, Tong L, Li S, Ding R, Zhang X. 2018. Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid

- Northwest China, Agricultural Water Management. 203, 438-450.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.030>.
- Ritchie SW, Hanway JJ. 1982. How a corn plant develops. Iowa: Iowa State University of Science and Technology. 21p. (Special Report; N° 48).
- Santhi C, Arnold JG, Williams JR, Dugas WA, Srinivasan R, Hauck LM. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. Journal of American Water Resources Association. 37(5). 1169-1188
- Steduto P, Raes D, Hsiao TS. 2009. Concepts and applications of AquaCrop: the FAO crop water productivity model. Crop Modelling and Decision Support. 175–191.
- Tarjuelo JM. 2005. El riego por aspersión y su tecnología (3a ed. rev. y ampl.) Ed. Mundi-Prensa. España. 581p
- Willmott CJ. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of the American Meteorological Society. 63: 1309-1313.

5. USO DEL MODELO AQUACROP EN MAÍZ PARA EVALUAR ESTRATEGIAS DE RIEGO EN CLIMA TEMPLADO

Hayashi R.¹, Dogliotti S.²

¹Universidad de la Republica, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay

² Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Montevideo, Uruguay.

5.1. RESUMEN

El riego suplementario estabiliza y aumenta el rendimiento de los cultivos en situaciones de clima templado y húmedo. Sin embargo, la adopción de esta tecnología en Uruguay es muy baja, básicamente asociada a costos energéticos elevados y desconocimiento del manejo de cultivos regados. El objetivo de este trabajo es evaluar, mediante simulaciones con AquaCrop, tres láminas máximas de riego y tres estrategias de manejo de esas láminas en maíz. Las láminas evaluadas fueron 3, 6 y 8 mm netos. Los manejos fueron umbrales de riego: agotar 10 mm, agotar 50 % del agua fácilmente disponible (AFD) y agotar 100 % del AFD. Se analizaron las variables productivas, las necesidades de riego y la demanda energética de cada estrategia. Finalmente, se realizó un análisis de ingresos parciales considerando un cultivo de maíz regado por pivót central para llegar a una recomendación de manejo del riego por pivót. Se concluye que 5 mm da rendimientos e ingresos similares a 8 mm, sin considerar costos de inversión, los cuales son mayores en 8 mm. En cuanto al manejo, agotar el 100 % del AFD tiene mayor productividad del agua, pero resulta riesgosa en años secos; sin embargo, es factible variar la estrategia en función de las perspectivas climáticas de cada año.

Palabras clave: AquaCrop, estrategia de riego, costos de riego

5.2. INTRODUCCIÓN

El uso de herramientas informáticas (modelos) en la agricultura que predicen el rendimiento, crecimiento y desarrollo de los cultivos es de gran utilidad en la toma de decisiones respecto al manejo a realizarse sobre estos. Un modelo calibrado y validado para un determinado cultivo permitirá predecir su comportamiento al variar determinadas prácticas de manejo como pueden ser el nivel de nutrientes, la disponibilidad de agua o las fechas de siembra, entre otros. También permiten optimizar el manejo agronómico de los cultivos (Steduto et al., 2009).

Actualmente existe un gran interés por el uso de modelos que simulen la respuesta de los cultivos al consumo de agua para estimar los rendimientos con base en el nivel de

déficit hídrico. Existen varios modelos de este tipo, uno de los más utilizados es el Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), que estima los efectos de las prácticas de manejo y las condiciones ambientales en los cultivos incluyendo el manejo del agua (Jones et al., 2003). Otro modelo que ha sido calibrado y utilizado en Uruguay es el Cropping Systems Simulation Model (CropSyst) (Stöckle et al., 2003). Estos modelos demandan para su calibración y operación un número grande de parámetros, algunos específicos para los cultivares, que complican su aplicación. Por otra parte, el modelo AquaCrop liberado por la FAO (Raes et al., 2009) es un modelo dinámico que simula el rendimiento alcanzable de los cultivos herbáceos como una función del consumo de agua y puede usarse para analizar escenarios agrícolas en ciclos y localidades diferentes (Heng et al., 2009; Hsiao et al., 2009; Steduto et al., 2009). Este modelo hace foco en el agua, ya que esta es la clave para la producción agrícola que deberá cumplir con la demanda de alimentos de la población mundial en constante crecimiento y porque es un recurso escaso que tiene diversos usos, generando condiciones de competencia por su uso (Steduto et al., 2009).

AquaCrop es un modelo simple porque utiliza un número reducido de parámetros en comparación con otros modelos biofísicos (Raes et al., 2009) y se ha calibrado con buen ajuste a resultados experimentales en varias regiones agrícolas del mundo (Ran et al., 2018, Greaves y Wang, 2017, Abedinpour et al., 2012 y 2014). AquaCrop realiza simulaciones de la respuesta del rendimiento a la disponibilidad de agua bajo diversas condiciones ambientales y de manejo, incluidos escenarios derivados del cambio climático, basadas en procesos ecofisiológicos y de balance de agua en el suelo. Requiere un número relativamente pequeño de parámetros y variables de entrada que son de fácil determinación (Steduto et al., 2009).

Las salidas del modelo son el rendimiento y la biomasa producida. Además, provee información sobre el balance hídrico, la productividad del agua, índice de cosecha, etc., que permiten analizar o explicar el rendimiento logrado, y de esta forma mejorar las estrategias de manejo del agua o manejo del cultivo de forma de ser más eficiente en el uso de los recursos.

En situaciones como las de Uruguay, de clima templado, con precipitaciones durante todo el año con gran variabilidad intra e interanual, el riego es una tecnología que permite aumentar los rendimientos y estabilizarlos. La adopción de esta tecnología en Uruguay es

muy baja, básicamente asociada a los costos energéticos elevados de la aplicación del riego (Bachino, 2012) y a desconocimiento del manejo de cultivos regados.

En este trabajo, se evaluaron diferentes estrategias de manejo de riego con diferentes láminas máximas de reposición diaria para el cultivo de maíz, mediante simulaciones con AquaCrop para una serie de 41 años. El maíz es uno de los principales cultivos de verano y con gran respuesta al riego debido a su gran sensibilidad a las deficiencias hídricas (Andrade et al., 1996, Steduto et al., 2012). Los resultados de las simulaciones se utilizan para discutir opciones de manejo del riego en dos zonas de importancia para el cultivo de maíz en Uruguay.

5.3 MATERIALES Y MÉTODOS

En el capítulo anterior, se calibró el modelo AquaCrop para el cultivo de maíz. Con este modelo calibrado se realizó la simulación para una serie de años amplia, 41 años (1980 a 2021), con el objetivo de dar una recomendación de manejo de riego en 2 localidades, Paysandú y Colonia, ambas ubicadas en la principal zona cerealera del Uruguay.

En el modelo se parametrizó el cultivo con información local de ensayos de campo de ambos sitios experimentales y se utilizó la base de datos climáticos de la estación meteorológica más cercana con disponibilidad de datos meteorológicos necesarios para el modelo y para una serie amplia de años (INIA Salto Grande e INIA La Estanzuela).

5.3.1 Suelos

La elección de los suelos tuvo en cuenta el tipo de suelo predominante en la zona agrícola del Uruguay. Se consideró la profundidad efectiva de raíces en función del tipo de suelo.

El suelo de Colonia corresponde a la Unidad de suelos Ecilda Paullier-Las Brujas y el de Paysandú, a la Unidad San Manuel (Carta de Suelos 1:1.000.000). Ambos suelos corresponden a Brunosoles Eutricos Típicos, los cuales predominan en la zona agrícola del litoral oeste del Uruguay. Según Molino y Califra (2001), son suelos con capacidad de retención de agua potencial media (80-120 mm) a alta (120-180 mm). Dado que el objetivo es definir una estrategia de riego, se parte de la base de que el riego es una tecnología que permite potenciar los rendimientos, por tanto, se aplica en ambientes que permitan expresar esos potenciales. Por esta razón, no fue intención de este trabajo evaluar

estrategias de riego en suelos con limitantes físicas (superficiales o deteriorados) y que tienen baja capacidad de almacenar agua en su perfil. Tampoco se tuvieron en cuenta limitantes en cuanto a la fertilidad del suelo. El riego forma parte de un paquete tecnológico que permite garantizar la producción económica de un cultivo, con adecuado manejo de los recursos naturales, por lo cual se deben tener en cuenta todos los aspectos de la producción: fertilidad de suelos, manejo integrado de plagas y enfermedades, rotación de cultivos, entre otros (Bernardo et al., 2005).

El agua disponible (AD) para la profundidad radical considerada en las simulaciones (82 y 54 cm) es de 108,6 y 71,2 mm en Colonia y Paysandú, respectivamente. Considerando el umbral de riego de ($p = 0,55$) recomendado por el manual de FAO 56, el agua fácilmente disponible es de 60 mm y 39 mm para Colonia y Paysandú, respectivamente.

Cuadro 1: parámetros hídricos de suelo utilizados en la simulación

Colonia	Unidad de Suelo, Ecilda Paullier- Las Brujas				Grupo hidrológico C			
	Horizonte	Prof.	CC	PMP	SAT	DA	Ksat	CAAD
	A ₁	0-24	36,4	21,1	51,6	1,28	214	36,7
	B ₂	24-56	41,4	29,1	49,5	1,34	32	39,4
	B ₃	56-82	42,1	29,6	49,3	1,34	23	32,5
AD hasta los 82 cm								108,6 mm
Paysandú	Unidad de Suelo, San Manuel				Grupo hidrológico C			
	A ₁	0-10	37,3	23,5	51,7	1,28	175	13,8
	A ₃	10-25	37,5	24,2	49,6	1,34	103	20,0
	B ₂	25-46	40,7	28,6	49,5	1,34	40	25,4
	B ₃	46-54	29,8	15,1	49,3	1,34	254	12,0
AD hasta los 54 cm								71 mm

CC: capacidad de campo, mm 10 cm⁻¹; PMP: punto de marchitez permanente, mm 10 cm⁻¹; SAT: saturación mm 10 cm⁻¹; DA: densidad aparente, gr cm⁻³; Ksat: conductividad hidráulica en flujo saturado, mm d⁻¹; CAAD: capacidad de almacenamiento de agua disponible, mm horiz⁻¹.

Una característica del suelo a tener en cuenta y que el modelo considera está en función de la clasificación de los suelos del Uruguay en grupos hidrológicos, según la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de EE. UU. (SCS), y que afectan el

escurrimiento generado por las precipitaciones. En esta situación, ambos suelos son del grupo hidrológico C. Si bien los dos son similares en este aspecto, hasta el horizonte B₂, el suelo de Paysandú posee un horizonte B₃ (a partir de los 46 cm de profundidad) que tiene mayor K_{sat} y que puede afectar su drenaje interno, aumentándolo.

Según Durán A. (1997), en el grupo C, los suelos tienen velocidad de infiltración lenta cuando están completamente mojados. Estos suelos tienen generalmente una capa que impide el movimiento descendente del agua o son de texturas moderadamente finas a finas y poseen una velocidad lenta de transmisión del agua.

5.3.2 Estrategias de riego evaluadas

Se ejecutó el modelo para 3 láminas de reposición, 3, 5 y 8 mm netos, con tres umbrales de riego diferente: 100 % de agotamiento del agua fácilmente disponible (AFD), 50 % de agotamiento de AFD y 10 mm de agotamiento de AFD. También se evaluó la situación sin riego. El total de estrategias evaluadas fue de 10 para cada sitio.

Las estrategias de riego fueron:

Sin riego

Agotar 10 mm y reponer 3 mm: E3_10

Agotar 10 mm y reponer 5 mm: E5_10

Agotar 10 mm y reponer 8 mm: E8_10

Agotar 50 % del AFD, reponer 3 mm: E3_50 %

Agotar 50 % del AFD, reponer 5 mm: E5_50 %

Agotar 50 % del AFD, reponer 8 mm: E8_50 %

Agotar 100 % del AFD, reponer 3 mm: E3_100 %

Agotar 100 % del AFD, reponer 5 mm: E5_100 %

Agotar 100 % del AFD, reponer 8 mm: E8_100 %

En el modelo el umbral de ajuste estomático (P upper), fue fijado en 0,45 para una E_{Tc} de 5 mm d⁻¹, con la opción de que el modelo lo modifique en función de la E_{Tc}. Este dato indica que el agua fácilmente disponible (AFD) es el agua contenida entre capacidad de campo y un agotamiento del 45 % (promedio) del agua disponible total (ADT). De esta

forma, las estrategias de 50 % y 100 % de agotamiento del AFD corresponden con un agotamiento del 22,5 % y del 45 % del ADT, respectivamente. En el caso de agotar 10 mm, en función del suelo, estos 10 mm representan un agotamiento de aproximadamente 9 y 14 % del ADT en Colonia y Paysandú, respectivamente.

Considerando una eficiencia de aplicación de entre 85 y 90 %, las láminas evaluadas corresponden a los tratamientos probados en los ensayos a campo (6 y 9 mm). En el caso de 3 mm, se evaluó la lámina neta de 3 mm, ya que el modelo no permite el uso de láminas en fracciones menores a 1 mm.

Las fechas de siembra de cada año se definieron, en el caso del secano, indicándole al modelo que inicie la simulación cuando el acumulado de precipitaciones en 4 días consecutivos fuera de, al menos, 20 mm, a partir del 1 de octubre y no más allá del 31 de diciembre de cada año. Este criterio permitió asegurar la emergencia del cultivo al proporcionarle humedad para la germinación. En las estrategias con riego se dio una fecha fija (1.º de octubre), ya que se dispone de riego para todo el ciclo y, por lo tanto, la fecha de siembra no es dependiente de las PP.

5.3.3 Estimación de la demanda energética

Con el objetivo de realizar una comparación de la demanda energética de cada una de las estrategias evaluadas, se tuvieron en cuenta algunos supuestos:

- Lámina aplicada: surge del modelo (promedio de 41 años)
 - Eficiencia de aplicación del método de riego, pívot central: 85 % (Morales et al., 2022, Bernardo et al., 2005, Tarjuelo, 2005)
 - Área de riego bajo el pívot: 69 ha (largo de lateral 470 m)
 - Eficiencia de bomba: 80 % (Catálogo)
 - Eficiencia del motor: 85 %
 - Horas de riego diarias: 20 h
 - Presión a la entrada del pívot: 350 KPa (35 m.c.a.) (Morales et al., 2022, Tarjuelo, 2005)
 - Presión en la bomba o altura manométrica: 600 KPa (60 m) (pérdidas de carga en la conducción, accesorios, diferencias topográficas y presión a la entrada del pívot)
- Fórmula para calcular la demanda de energía (DE) para riego (Bernardo et al., 2005):

$$DE = 0,0271 \times A \times D \times Hman / (Ei \times Eb \times Em)$$

Ec. 1

Siendo:

DE: demanda de energía (Kw/año)

A: área a regar (ha)

D: lámina real de riego en el ciclo (mm)

Hman: altura manométrica (mca)

Ei: eficiencia de riego

Eb: eficiencia de la bomba

Em: eficiencia del motor

5.3.4. Análisis de márgenes de ingreso por efecto del riego

Se realizó un análisis parcial de los márgenes de ingreso generados por la incorporación del riego con pivot central, método de riego que es más utilizado en el caso de riego en maíz en Uruguay. Para ello se hizo un análisis de los costos de energía asociados a la aplicación del riego para una de las localidades: Colonia.

Se consideró el costo de energía eléctrica del pliego tarifario 2022 de la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE), para la modalidad de mediano consumidor (cuadro 2)

Cuadro 2: costo energía eléctrica para mediano consumidor con una potencia contratada (PC) mínima igual o mayor a 10 Kw, expresado en dólares estadounidenses (USD) (cotización, 42 \$U/ 1 USD)

	Períodos horarios	USD Kwh ⁻¹	Franja horaria	Horas de riego
Costo energía (USD)	Valle	0,0530	0 a 7	7 (35 %)
	Llano	0,1166	7 a 18 y 22 a 24	13 (65 %)
	Punta	0,2653	18 a 22	0
Costo potencia mes ⁻¹ (USD)		9,05		
Cargo fijo mes ⁻¹ (USD)		16,81		

Fuente: pliego tarifario UTE, 2022

Se utilizó una planilla Excel para el cálculo del costo de riego en función de la lámina de riego aplicada, teniendo en cuenta un pivot de 69 ha (468 m de lateral de riego). La lámina utilizada es el promedio de 41 años para cada uno de los tratamientos simulado por el modelo.

Además, se tuvieron en cuenta las siguientes ecuaciones y consideraciones:

a) Q: Caudal ($m^3 h^{-1}$): $mm \times 10 \times Sup / (Ea \times h)$ Ec. 2

Donde:

mm: lámina neta máxima de cada estrategia (3, 5 y 8 mm)

Sup: superficie bajo riego en ha (pívot de 69 ha)

Ea: eficiencia de aplicación (85 %)

h: jornada de riego en h (20 h)

b) Volumen por año: $LN_R \text{ total} \times 10 \times Sup / Ea$ Ec.3

c) LN_R : Lámina neta riego, promedio de las LN que surge del modelo (cuadro 8).

d) Horas de riego: LN_R / mm de cada estrategia Ec.4

e) Potencia al eje de la bomba: $Caudal (l/s) \times Hm / (Eb \times 102) = Kwh$ Ec.5

f) Potencia del motor: $Potencia \text{ al eje de la bomba} / Em = Kwh$ Ec. 6

g) Costo potencia contratada (CPC): depende de la potencia requerida por el motor de la bomba (se consideró una eficiencia del motor del 85 %)

h) Cargo fijo anual: $cargo \text{ fijo mensual} \times 12 \text{ meses} = 16,81 \times 12 = 202 \text{ USD}$ Ec. 7

i) Costo potencia contratado (CPC): según la modalidad contratada con UTE, los meses de riego tienen un costo del 100 % del CPC y los meses que **no** se riegan, el CPC es del

50 %. Se consideraron 5 meses de riego (de octubre a febrero, inclusive). Para el costo anual se utilizó la siguiente fórmula:

Costo anual contratado: $PC \times CPC \times 5 + PC \times CPC \times 0.5 \times 7$

Ec.8

Para dar una estimación más ajustada de los márgenes de ingreso se tuvieron en cuenta los costos asociados a los insumos para la producción (laboreo, semilla, fertilizante, fitosanitarios, cosecha, seguros, gastos poscosecha, etc.). La Sociedad de Fomento Rural Colonia Valdense (SOFOVAL, 2021) proporciona anualmente la presupuestación para la producción para maíz de primera; para la zafra 2021-22, indica un presupuesto de 943 USD ha⁻¹ para una densidad de siembra de 65 mil pl ha⁻¹. Se corrige el costo de la semilla para 110 mil (100 mil pl ha⁻¹), lo que significa un costo de 1052 USD ha⁻¹ (72.588 USD por pívot).

En el caso de la renta de la tierra, se tomaron como referencia valores presentados en un estudio publicado en el Anuario OPYPA 2021 (MGAP, 2021), en el cual, según el destino de la tierra, en este caso agrícola-ganadero, el precio de promedio mercado (2017 a 2020) fue de 173 USD ha⁻¹ año⁻¹.

En cuanto a los ingresos medios, se tomaron como referencia los precios FOB oficiales para el maíz de la Bolsa de Cereales (<https://www.bolsadecereales.com/precios-oficiales>) (mayo 2022), que indican un precio de USD 323 t⁻¹. Este precio tiene variaciones a lo largo del año y, actualmente, por situaciones internacionales particulares, experimenta valores por encima de la media de 187 USD t⁻¹, promedio de 2016 a abril 2022 (Bolsa de Cereales, 2022).

5.3.4.1. Limitaciones del análisis de márgenes de ingreso

Este análisis no pretende ser un análisis económico de la incorporación de riego en maíz. Por ello es importante considerar que no fueron tenidos en cuenta los siguientes rubros:

- Amortización del equipo de riego (pívot, obras accesorias, conducción del agua)
- Electrificación
- Amortización obra de almacenamiento de agua
- Amortización de maquinaria (laboreo, aplicaciones de agroquímicos, cosecha)

Este último rubro es común a todas las estrategias de riego y secano; por tanto, no generaría diferencias en los márgenes de ingreso.

5.3.5. Análisis de los datos

Teniendo en cuenta el objetivo de este trabajo, los resultados obtenidos fueron presentados mediante el uso de estadísticas descriptivas; por lo tanto, no se utilizaron métodos inferenciales.

Se calculó el promedio (de los 41 años) de las variables tenidas en cuenta para formular una recomendación de manejo del riego. En el caso del rendimiento, también se calculó el desvío estándar poblacional de los datos para informar sobre la dispersión de los datos.

Se analizaron variables productivas: rendimiento (Kg ha^{-1}) y su desvío; índice de cosecha, productividad del agua evapotranspirada (WPet , en Kg m^{-3}); variables relacionadas con el uso del agua: evaporación, transpiración, escurrimiento superficial, drenaje, riego, niveles de estrés (estrés de expansión foliar y estrés de cierre estomático), demanda energética y variables económicas (márgenes parciales).

5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.4.1. Paysandú

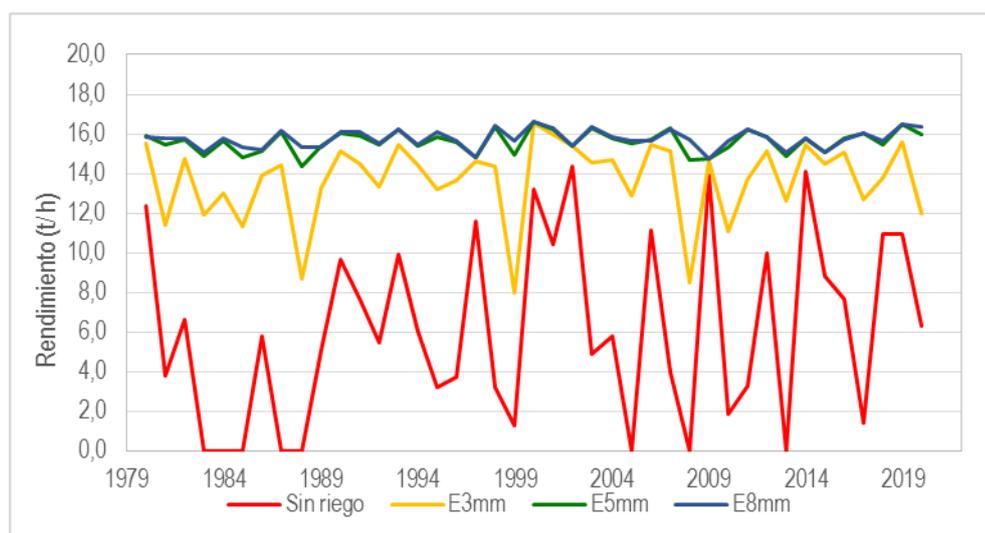
En el cuadro 3, se presentan el resumen de los resultados productivos para los 41 años de simulaciones.

Los rendimientos para las estrategias sin riego y 3 mm tienen una gran variación entre años (gráfica 1), aunque los rendimientos de 3 mm no son bajos. El rendimiento sin riego está en coherencia con el rendimiento promedio indicado por los datos de las Estadísticas Agropecuarias (DIEA), que indica un promedio en torno a los $5,0 - 6,0 \text{ t ha}^{-1}$, dependiendo de la zona productiva.

Como se observa en la gráfica 1 las estrategias de riego de 5 y 8 mm dan rendimientos más elevados y estables (menor variabilidad entre años), excepto la estrategia de 5 mm con 100 % de agotamiento de AFD, que tiene un desvío de 0.691 t ha^{-1} (36 % superior)(cuadro 3). La estrategia de riego que mejor WPet logra es la de agotar 100 % del AFD y reponer 5 u 8 mm, aunque los rendimientos medios son algo menores.

Cuadro 3: rendimiento promedio, desvíos del rendimiento, índice de cosecha (IC) y productividad del agua evapotranspirada (WP_{Et}) obtenidos en AQ para las diferentes estrategias de riego para la localidad de Paysandú

Paysandú	Rendimiento t ha ⁻¹	Rendimiento mínimo - máximo	Desvío	IC	WP _{Et} Kg m ⁻³
Sin riego	6,061	0 -14,361	4,591	39	1,60
E3_10	13,986	8,528 -16,603	1,901	54	2,56
E3_50 %	13,932	8,617-16,622	1,886	54	2,55
E3_100 %	13,066	6,710 -16,379	2,166	54	2,54
E5_10	15,715	14,750-16,604	0,501	54	2,66
E5_50 %	15,725	14,657 -16,593	0,506	54	2,65
E5_100 %	15,391	13,628 -16,583	0,691	54	2,70
E8_10	15,786	14,771 -16,599	0,461	54	2,67
E8_50 %	15,795	14,795 -16,597	0,460	54	2,66
E8_100 %	15,684	14,695 -16,569	0,463	54	2,72



Gráfica 1: rendimientos simulados por el modelo AquaCrop, para el cultivo de maíz en la localidad de Paysandu, promedios según lamina de diseño.

En el siguiente cuadro están las variables relacionadas con la distribución del agua proveniente de las precipitaciones y del riego.

Cuadro 4: datos de evaporación (E), transpiración(Tr), ETc, escurrimiento superficial (Escurr), drenaje, pérdidas de agua, riego y número de riegos promedio para las diferentes estrategias de riego para la localidad de Paysandú.

Paysandú	E(mm)	Tr(mm)	ETc	Escurr. (mm)	Drenaje (mm)	Pérdidas de agua (mm)	Riego (mm)	N.º de riegos
Sin riego	160	188	347	88	118	206	0	0
E3_10	166	383	549	100	146	247	241	80
E3_50 %	170	381	550	100	144	243	238	79
E3_100 %	163	355	518	94	132	226	183	61
E5_10	157	439	596	124	170	294	345	69
E5_50 %	160	439	599	121	165	286	337	67
E5_100 %	149	427	576	105	141	246	264	53
E8_10	156	442	597	144	186	330	383	48
E8_50 %	158	442	600	143	179	322	375	47
E8_100 %	145	438	583	116	149	265	294	37

AquaCrop estima las pérdidas de agua debidas a la evaporación directa desde el suelo que queda descubierto durante todo el ciclo del cultivo. Estas pérdidas por evaporación son consideradas agua no productiva y son de mayor magnitud en las primeras etapas del ciclo del cultivo, siendo afectadas por la frecuencia de riego (Allen et al., 1998). De esta forma, las estrategias que agotan el 100 % del AFD antes de realizar el riego son las que tienen menores pérdidas por evaporación porque la frecuencia de riego es menor y se moja menos la superficie del suelo. En el caso del secano, el modelo estima la evaporación aun si el cultivo termina antes su ciclo por estrés hídrico (años sin rendimiento en grano); por esta razón. Los valores de evaporación en el secano son mayores a los tratamientos más regados E5 y E8. Otra variable a tener en cuenta es el escurrimiento, ya que, si es excesivo, puede provocar erosión del suelo y arrastre de nutrientes o pesticidas. Según Tarjuelo (2005), el uso de agua excesiva para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos implica la existencia de filtraciones, escorrentía o percolación profunda que, aunque puede reutilizarse posteriormente al pasar a cauces superficiales o a recarga de acuíferos, provocará, además de un posible deterioro de la calidad de las aguas receptoras, un sobredimensionamiento de las obras hidráulicas que las almacenan y las transportan. En esta evaluación, las pérdidas de agua están dadas

por el régimen de humedad en el suelo y el mayor o menor aprovechamiento de las precipitaciones.

En este punto del análisis, las estrategias de 5 y 8 mm con 100 % AFD son las que generan menor escurrimiento y pérdidas de agua totales. Sin embargo, E8_100 %, en promedio, realiza menos riegos en la temporada (37 vs. 53).

Como ya se mencionó, un factor que incide principalmente en la adopción del riego más allá de lo productivo es la demanda de energía (Kw), debido a que está directamente asociada al costo operativo del riego (Bachino, 2012). Asimismo, la elección de una estrategia de riego también estará influenciada por este mismo factor.

En el cuadro 5, se presenta la demanda de energía de las diferentes estrategias de riego. Como se explicó en la metodología, para estimar dicha demanda se tuvieron en cuenta algunos supuestos.

Obviamente, en la medida en que disminuye la lámina diaria aplicada (3, 5 u 8 mm), el gasto de energía por riego disminuye debido a que la lámina afecta directamente el caudal que debe dar la bomba. Por tanto, en este análisis lo que genera diferencias, además de la lámina neta aplicada, es el número de riegos.

Cuadro 5: datos promedio de consumo de energía para las diferentes estrategias de riego para la localidad de Paysandú

Paysandú	Bomba Kw h⁻¹	Potencia del motor (Kw h⁻¹)	Kw riego⁻¹	Kw * total año⁻¹
Sin riego	0	0	0	0
E3_10	25	29	585	46.986
E3_50 %	25	29	585	46.344
E3_100 %	25	29	585	35.739
E5_10	41	49	975	67.248
E5_50 %	41	49	975	65.655
E5_100 %	41	49	975	51.572
E8_10	66	78	1.560	74.789
E8_50 %	66	78	1.560	73.153
E8_100 %	66	78	1.560	57.281

*se consideró una eficiencia del motor del 85 %

En promedio, la E3_100 % es la de menor consumo eléctrico (35.739 Kw año⁻¹), luego E5_100 % con 51.572 Kw año⁻¹ y, finalmente, E8_100 % con 57.281 Kw año⁻¹.

Teniendo en cuenta todos los factores analizados, la estrategia de riego con una lámina neta de 5 mm aplicada cuando se llega al 100 % de AFD resulta más conveniente, ya que tiene rendimiento elevado y estable, menores pérdidas de agua, menor gasto de agua de riego y menor consumo de energía por año en comparación con E8_100 %. Si bien no es el de mayor rendimiento promedio, es uno de los que tiene mayor productividad del agua (2,70).

En algunas situaciones se ha discutido el riesgo que lleva el manejo del riego de esta forma (dejar descender el contenido de humedad hasta el umbral y, a partir de ese momento, reponer la lámina otorgada por el pivote), debido a que en años de alta demanda se puede generar déficit hídrico en las etapas críticas que pueden afectar el rendimiento ($K_s < 1$) (Bernardo et al., 2005). En el análisis de 41 años de simulación, esta situación ocurrió todos los años; sin embargo, en promedio, no superó el 2,1 % de reducción del rendimiento por cierre estomático, mientras que el estrés por expansión foliar fue, en promedio, del 8 %.

Cuadro 6: porcentaje promedio de estrés de expansión foliar y cierre estomático para la localidad de Paysandú.

Paysandú	Expansión Foliar (%)	Cierre estomático (%)
Sin riego	39	24,8
E3_10	12	7,4
E3_50 %	13	7,6
E3_100 %	20	10,2
E5_10	1	1,4
E5_50 %	1	1,4
E5_100 %	8	2,1
E8_10	0	1,2
E8_50 %	0	1,2
E8_100 %	3	1,1

5.4.2. Colonia

Los resultados para la localidad de Colonia muestran tendencias similares a los obtenidos para la localidad de Paysandú, con rendimientos promedio superiores en Colonia en maíz regado (cuadro 7). Estos mayores rendimientos son explicados por ciclos de cultivos más largos (promedio de 132 días) respecto a los de Paysandú (promedio de

118 días), debido a la acumulación térmica (GDD) necesaria para el desarrollo de las diferentes etapas fenológicas del cultivo, la cual es acelerada por las temperaturas más elevadas (Martínez-Álvarez, 2015), situación que ocurre en Paysandú. Por esta misma razón, la ETc es mayor en Colonia.

También cabe mencionar que el suelo en Colonia tiene una profundidad radical importante, lo cual repercute en los resultados, ya que su CAAD es mayor y, por lo tanto, permite rendimientos muy altos.

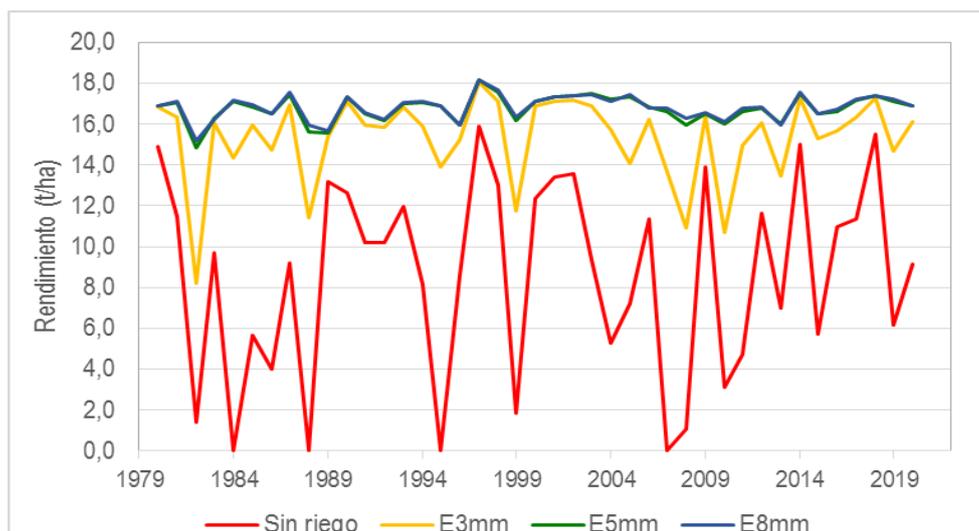
También se observan las altas variabilidades del rendimiento del secano y de la estrategia de 3 mm (cuadro 8 y gráfica 2). La estrategia de 8 mm 100 % es la que, en promedio, tiene mayor WP_{Et} ($2.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), aunque su rendimiento no es el más alto (cuadro 8).

Cuadro 7: rendimiento promedio (t ha^{-1}) por lámina evaluada para Paysandú y Colonia.

Promedios	Paysandú	Colonia
Sin riego	6,061	8,531
E3	13,661	15,293
E5	15,610	16,766
E8	15,755	16,830

Cuadro 8: rendimiento promedio, desvíos del rendimiento, índice de cosecha (IC) y productividad del agua evapotranspirada (WP_{Et}) obtenidos en AQ para las diferentes estrategias de riego para la localidad de Colonia

COLONIA	Rendimiento t ha^{-1}	Rendimiento mínimo - máximo	Desvío (t ha^{-1})	IC	WP_{Et} Kg m^{-3}
Sin riego	8,531	0 -15,880	4,791	45	1,99
E3_10	15,748	9,361 – 18,181	1,908	54	2,56
E3_50 %	15,605	8,904 – 18,170	1,965	54	2,55
E3_100 %	14,524	6,297 – 17,758	2,420	55	2,57
E5_10	16,894	15,301 – 18,225	0,593	54	2,61
E5_50 %	16,901	15,256 – 18,209	0,614	54	2,62
E5_100 %	16,503	14,033 – 18,014	0,754	55	2,70
E810	16,891	15,326 – 18,231	0,590	54	2,61
E8_50 %	16,903	15,317 – 18,226	0,592	54	2,62
E8_100 %	16,695	14,880 – 18,056	0,637	54	2,71



Gráfica 2: rendimientos simulados por el modelo AquaCrop, para el cultivo de maíz en la localidad de Colonia, promedios según lamina de diseño.

Cuadro 9: datos de evaporación (E), transpiración(Tr), escurrimiento superficial (Escurr), drenaje, riego y número de riegos promedio para las diferentes estrategias de riego para la localidad de Colonia.

COLONIA	E(mm)	Tr(mm)	ETc	Escurr. (mm)	Drenaje (mm)	Pérdidas de agua (mm)	Riego (mm)	N° de riegos
Sin riego	162	242	404	61	70	131	0	0
E3_10	186	432	618	79	103	182	284	95
E3_50 %	186	428	614	74	96	170	262	87
E3_100 %	174	395	569	68	81	149	185	62
E5_10	180	472	653	96	131	227	377	75
E5_50 %	179	472	651	85	114	199	340	68
E5_100 %	158	458	616	74	86	160	251	50
E8_10	179	473	652	109	149	258	409	51
E8_50 %	177	473	650	95	127	222	364	45
E8_100 %	154	466	620	80	92	172	270	34

Las pérdidas de agua (escurrimiento más drenaje) son menores a las ocurridas en Paysandú, en parte asociadas a precipitaciones promedio menores durante el ciclo del cultivo en Colonia (508 mm) respecto a Paysandú (534 mm). Estas pérdidas también están asociadas al suelo: si bien ambos suelos son similares, tienen una conductividad hidráulica en flujo saturado (KSat) diferente en los horizontes subsuperficiales que afectan el drenaje interno en el suelo (cuadro 1).

Al igual que en Paysandú, las estrategias que tienen una frecuencia de riego menor (riegos más espaciados) son las que tienen menores pérdidas de aguas (E8_100 % y E5_100 %).

El análisis de la demanda de energía indica que E3_100 % es la estrategia que, en promedio, consume menos energía (36.124 Kw/año), E5_100 % consume 49.003 Kw por año, diferenciándose apenas en un 7,4 % de E8_100 %. El consumo eléctrico por evento de riego es mucho mayor en las estrategias de 5 y 8 mm, 975 y 1560 Kw riego⁻¹ contra 585 Kw riego⁻¹ en las estrategias de 3 mm, ya que este consumo está directamente asociado a la lámina aplicada. Este último punto puede ser una ventaja para las láminas de 3 y 5 mm, ya que es el consumo que el productor/regante ve al momento de decidir cada evento de riego.

Cuadro 10: datos promedio de consumo eléctrico (Kw) para las diferentes estrategias de riego para la localidad de Colonia.

COLONIA	Potencia al eje bomba* Kwh⁻¹	Potencia del motor* Kwh⁻¹	Kw riego⁻¹	Demanda de energía Kw total año⁻¹
Sin riego				0
E3_10	25	29	585	55.478
E3_50 %	25	29	585	51.054
E3_100 %	25	29	585	36.124
E5_10	41	49	975	73.576
E5_50 %	41	49	975	66.297
E5_100 %	41	49	975	49.003
E8_10	66	78	1560	79.813
E8_50 %	66	78	1560	70.945
E8_100 %	66	78	1560	52.638

*Eficiencia de la bomba 80 %, eficiencia del motor 85 %

La demanda energética es una de las variables que se tienen en cuenta al momento de definir una estrategia de riego, ya que afecta directamente los costos operativos del riego. Otro elemento a tener en cuenta y que no fue contemplado en este análisis es el costo de inversión inicial del pívot. En la medida en que el pívot aplica una lámina diaria mayor, su costo de construcción es mayor (mayores diámetros de tubería), al igual que la bomba a utilizarse (Tarjuelo, 2005). En el análisis se consideraron los requerimientos de caudal y presión para determinar el consumo energético (potencia requerida), asumiendo que el

diseño hidráulico del sistema respeta los criterios de uniformidad de presión en el lateral del pivót para el adecuado funcionamiento de los aspersores.

En relación con los niveles de estrés (cuadro 11), fueron similares a los observados en Paysandú. Según Bradford y Hsiao (1982), la expansión foliar es el proceso más sensible al déficit hídrico y la conductancia estomática es menos sensible. El nivel de humedad que afecta el estrés de expansión foliar está próximo al contenido de humedad a CC, por lo cual todas las estrategias evaluadas tienen algún porcentaje de estrés de expansión foliar. El estrés de expansión foliar, al no afectar la apertura estomática, no estaría interfiriendo en el proceso fotosintético y no generaría reducción directa en el rendimiento. Sin embargo, un alto porcentaje del ciclo del cultivo con estrés en la expansión foliar genera plantas de menor tamaño, lo cual determina rendimientos menores por baja capacidad de generar asimilados, para el llenado de granos, dando rendimientos menores. Por esta razón en cada lámina evaluada la estrategia de 100 % de agotamiento del AFD es la que, en promedio, da menos rendimiento.

Cuadro 11: porcentaje promedio de estrés de expansión foliar y cierre estomático.

COLONIA	Expansión foliar (%)	Cierre estomático (%)
Sin riego	34	19,5
E3_10	11	4,4
E3_50 %	12	4,8
E3_100 %	20	7,3
E5_10	1	0,8
E5_50 %	1	0,7
E5_100 %	10	1,1
E8_10	0	0,9
E8_50 %	0	0,8
E8_100 %	6	0,5

A modo de resumen, y para las dos localidades, las láminas de 5 mm y 8 mm aplicadas cuando se agota el 100 % del AFD son estrategias que hacen un mejor uso del agua (valores altos de WP_{Et}), altos rendimientos y estables, menores pérdidas de agua por escurrimiento y drenaje y menor demanda energética por año.

Si la elección por una u otra lámina se ve afectada por los costos de inversión, seguramente se opte por la lámina de 5 mm. En este punto cabe aclarar que en el caso de

contar con un equipo que aplica 5 mm neto, la estrategia que, en promedio, dio mejor resultado es que dicha lámina se aplique cuando se agota el 100 % del AFD; sin embargo, es factible el cambio de estrategia en función del año climático.

En este análisis se evaluaron 3 posibles manejos de umbrales de riego (agotamiento de 10 mm, del 50 % del AFD y del 100 % del AFD); sin embargo, una vez decidida la lámina neta de riego (que define el tamaño o dimensión del equipo), el manejo del riego se puede adecuar. El pivót diseñado para aplicar una lámina neta de 5 mm, dependiendo de los pronósticos climáticos, puede manejarse manteniendo la humedad del suelo cerca de capacidad de campo (con la reserva del suelo llena), puede manejarse mantenido un determinado déficit (por ejemplo, 50 % agotamiento del AFD o 40 o 60...) o usar una estrategia más riesgosa que es la de reponer los 5 mm cuando el contenido de humedad llega al nivel umbral (100 % de agotamiento del AFD).

Según Bernardo et al. (2005), establecer un programa de riego en el cual la lámina media aplicada es menor a la lámina media evapotranspirada es el manejo más eficiente en sistemas de riego de alta frecuencia y menor lámina (riego localizado, pivót); la única preocupación sería mantener la humedad del suelo de las capas superficiales con alto contenido de humedad.

5.4.3. Análisis de Ingresos

Si bien en esta sección no se pretende un análisis económico detallado, se realizó un análisis sencillo de los márgenes de ingreso generado por las estrategias de riego evaluadas para la localidad de Colonia.

Cuadro 12: Análisis de costos variables de energía utilizada en riego para Colonia. Costos expresados en dólares americanos, USD (cotización abril 2022)

Estrategia	Q (m ³ h)	Volumen anual (m ³)	horas totales riego	Costo potencia contratada (CPC) Costo por mes: USD 9,05 5 meses de riego 7 meses sin riego Cargo fijo anual (CFA): USD 202			Distribución horas de riego en cada franja		Costos variables UDS	TOTAL UDS	Costo por mm USD
				Potencia contratada (PC) (Kw)*	Costo anual contratado USD	(CFA + contratado) USD	Valle (horas)	Llano (horas)			
Sin riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E3_10	122	230878	1896	35	2692	2894	664	1232	6260	9154	0,396
E3_50 %	122	212465	1745	35	2692	2894	611	1134	5761	8655	0,407
E3_100 %	122	150335	1235	35	2692	2894	432	803	4076	6970	0,464
E5_10	203	306194	1509	55	4231	4433	528	981	7828	12260	0,400
E5_50 %	203	275901	1360	55	4231	4433	476	884	7053	11486	0,416
E5_100 %	203	203931	1005	55	4231	4433	352	653	5213	9646	0,473
E8_10	325	332150	1023	85	6539	6740	358	665	8202	14942	0,450
E8_50 %	325	295245	909	85	6539	6740	318	591	7290	14031	0,475
E8_100 %	325	219058	675	85	6539	6740	236	439	5409	12149	0,555

* corresponde a la potencia del motor al momento del arranque, que genera un pico de consumo y debe ser tenido en cuenta en la potencia contratada.

Los costos indicados en el cuadro corresponden a costos variables asociados al gasto de energía para la aplicación del riego. No se tiene en cuenta el costo de amortización del equipo de riego (electrobomba, equipo de riego, tuberías de conducción, electrificación). Sin embargo, en el caso de considerar la amortización del equipo de riego, esta será mayor en la medida en que el equipo aplique una mayor lámina de riego diaria (mayor caudal de diseño).

En el siguiente cuadro, teniendo en cuenta el rendimiento de cada estrategia de riego, se presentan los márgenes parciales de ingreso por pivot, considerando los costos de riego, los costos de producción de maíz (1.052 USD/ha, 72.588 USD para 69 ha) y la renta de la tierra (173 USD/ha/año) (MGAP, 2021).

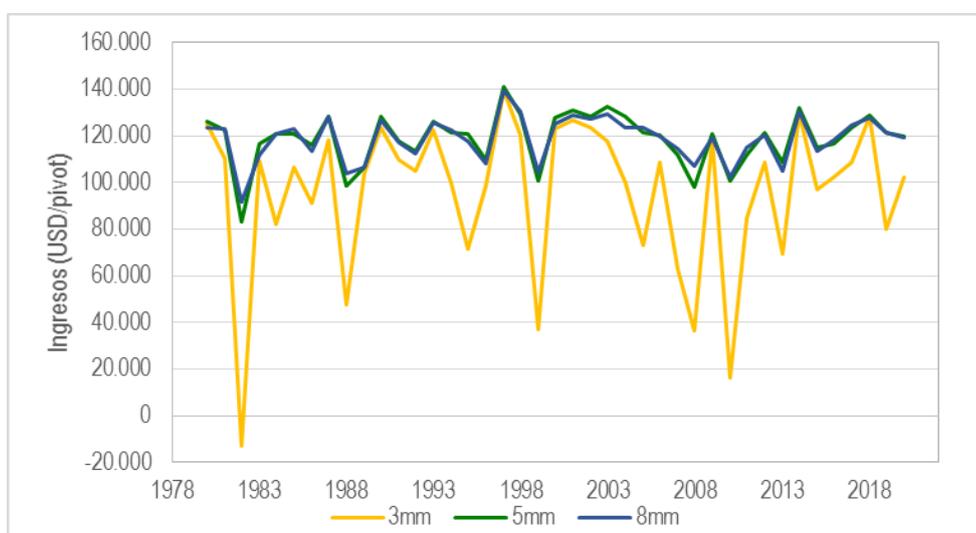
Cuadro 13: análisis de márgenes de ingreso de maíz para cada estrategia de riego, considerando un pivot de 69 ha, el precio internacional del maíz de 323 USD t⁻¹ (mayo 2022) y el precio promedio de los últimos 6 años (187USD t⁻¹) *

	Rend. t ha ⁻¹	Ingreso bruto USD/pivot 323 USD t ⁻¹	Ingreso bruto USD/pivot 187USD t ⁻¹	Costos de producción +Renta USD/pivot	Costo variables (riego) USD	Ingreso neto USD/pivot	
						323 USD t ⁻¹	187 USD t ⁻¹
Sin riego	8,531	190.120	110.069	84.525	0	105.595	25.544
E3_10	15,748	350.983	203.201	84.525	9154	257.304	109.522
E3_50 %	15,605	347.783	201.348	84.525	8655	254.603	108.168
E3_100 %	14,524	323.707	187.409	84.525	6970	232.212	95.914
				Promedio 3 mm		248.040	104.535
E5_10	16,894	376.526	217.989	84.525	12260	279.741	121.203
E5_50 %	16,901	376.671	218.073	84.525	11486	280.661	122.062
E5_100 %	16,503	367.804	212.939	84.525	9646	273.633	118.768
				Promedio 5 mm		278.011	120.678
E8_10	16,891	376.457	217.949	84.525	14942	276.990	118.482
E8_50 %	16,903	376.723	218.103	84.525	14031	278.167	119.547
E8_100 %	15,684	349.541	202.366	84.525	12149	252.866	105.691
				Promedio 8 mm		269.341	114.573

*según información de la Bolsa de Cereales <https://www.bolsadecereales.com/precios-internacionales>

El actual contexto internacional de precios elevados del maíz determina márgenes de ingresos muy altos, más del doble respecto al de los últimos 6 años.

Si bien el análisis teniendo en cuenta rendimientos y láminas anuales promedios da una idea general de los márgenes de ingresos, en ese análisis se pierde la variabilidad que ocurre en ambas variables (rendimiento y láminas de riego) y por ende en los ingresos. En la siguiente gráfica se observa la variabilidad de dichos ingresos parciales para cada año de simulación en las estrategias de riego con mayor WPet (100% de agotamiento del AFD), considerando el precio promedio de los últimos 6 años. En este caso se tienen en cuenta los rendimientos del maíz de cada año y los mm anuales de riego requerido para lograr ese rendimiento. Puede observarse, en el caso de 3mm, la gran variabilidad de los ingresos y un año donde los mismos son negativos, debido a las escasas precipitaciones ocurridas ese año que determinó una lámina total de riego muy alta, y el rendimiento logrado no alcanzó a cubrir los costos productivos del maíz.



Gráfica 2: márgenes de ingresos parciales para las estrategias de riego de 3, 5 y 8mm, con mayor productividad del agua (100% agotamiento del AFD), considerando el precio promedio del maíz de los últimos 6 años.

En el siguiente cuadro están los rendimientos de equilibrio para las dos situaciones de precio del maíz: el precio actual (mayo 2022) y el promedio de los últimos 6 años. El rendimiento económico indica el rendimiento en el cual los ingresos cubren los costos productivos. Cabe recordar que no se están teniendo en cuenta los costos de amortización del equipo, por lo cual los rendimientos de equilibrio serán mayores si se incorporan estos costos.

Cuadro 14: rendimiento equilibrio según precio del maíz

	Precio actual 323 USD t¹	Precio promedio últimos 6 años 187 USD t¹
Sin riego	3,793	6,551
E3_10	4,203	7,260
E3_50 %	4,181	7,222
E3_100 %	4,105	7,091
E5_10	4,343	7,501
E5_50 %	4,308	7,441
E5_100 %	4,225	7,298
E8_10	4,463	7,709
E8_50 %	4,422	7,638
E8_100 %	4,338	7,492

La diferencia en los márgenes de ingreso con el precio actual es de 12,1 % entre 3 mm y 5 mm y de -3,2 % entre 5 mm y 8 mm. El análisis de márgenes de ingresos parciales indica que la estrategia de 5 mm, en promedio, genera ingresos mayores a los de 8 mm y mayores a los de 3 mm. Si tenemos en cuenta el precio promedio de los últimos 6 años, las diferencias aumentan 15,4 % entre 3 y 5 mm y -5,3 % entre 5 y 8 mm.

Este análisis reafirma la elección de la estrategia de 5 mm netos respecto a 8 mm. Como fue mencionado anteriormente, el manejo de esa lámina de 5 mm puede ser ajustado en función del año climático. Si bien agotar el 100 % del AFD tiene una alta productividad del agua evapotranspirada (WP_{Et}), menor lámina neta por ciclo, menores pérdidas de agua y menor consumo eléctrico (cuadros 8, 9 y 10), las diferencias en el rendimiento determinan un margen de ingreso menor respecto a los otros manejos (10 mm o 50 % de agotamiento del AFD). Adicionalmente, está el alto riesgo de que en años con escasas PP, principalmente en el período crítico, el rendimiento se vea afectado significativamente.

Cabe mencionar que, a nivel productivo, se manejan láminas brutas, que tienen en cuenta la eficiencia del método de riego. En este caso, las láminas de 3, 5 y 8 mm corresponden a 3,5, 5,9 y 9,4 mm, respectivamente.

5.5. CONCLUSIONES

Las simulaciones con el modelo AquaCrop indican que:

— La estrategia en secano da rendimientos promedios bajos, en torno a 6 t ha⁻¹ en Paysandú y 8,5 t ha⁻¹ en Colonia, con gran variabilidad en ambas localidades.

— La mayor profundidad del suelo en Colonia determinó mayores rendimientos promedio en todos los tratamientos respecto a los obtenidos en Paysandú.

— En cuanto a la estrategia de 3 mm, si bien las simulaciones dan rendimientos elevados (promedio de 13,7 y 15,3 t ha⁻¹ en Paysandú y Colonia, respectivamente), estos tienen una gran variación entre años y la diferencia entre zonas está asociada a la profundidad del suelo (54 y 82 cm) que permite mayor capacidad de almacenamiento de agua en Colonia.

— La estrategia de 5 mm alcanza rendimientos promedios de 15,6 y 16,8 t ha⁻¹ en Paysandú y Colonia, respectivamente, con poca variabilidad de los rendimientos entre años. Tiene menor lámina de riego por ciclo y menor demanda energética por riego respecto a la estrategia de 8 mm.

— La estrategia de 8 mm tiene rendimientos promedios similares a 5 mm (15,8 y 16,8 t ha⁻¹ en Paysandú y Colonia, respectivamente), con poca variabilidad de los rendimientos entre años, al igual que 5 mm. Sin embargo, tiene una mayor lámina neta por ciclo y, por tanto, mayor demanda de energía para aplicar el riego, haciendo que el margen parcial de ingreso sea menor respecto a 5 mm.

— El análisis parcial de los márgenes de ingreso, teniendo en cuenta los costos de producción (incluyendo manejo poscosecha y renta de la tierra) y los costos energéticos de aplicación del riego, indica que la estrategia de 5 mm sería la más adecuada, ya que los márgenes de ingreso son entre 12 y 15 % mayores a los de 3 mm, entre 30 y 16 mil dólares de diferencia dependiendo del precio del maíz. Por tanto, un equipo pívot diseñado para aplicar 5 mm netos (aproximadamente, 6 mm brutos) sería el más conveniente.

— En lo referente al manejo de esta lámina de riego (5 mm), las simulaciones indican que dejar descender el 100 % AFD y reponer 5 mm es la opción con menor lámina de riego aplicada y menor consumo de potencia por ciclo de cultivo; sin embargo, no es el manejo con mayor margen de ingreso. El manejo dejando agotar el 50 % del AFD da un margen levemente superior (3,4 % más).

Es recomendable un análisis económico que incluya los costos de amortización y mantenimiento de los equipos e infraestructuras (reserva de agua, electrificación, obras de toma), que permita dar fortaleza a las conclusiones de este trabajo.

También es importante tener en cuenta las condiciones bajo las cuales fueron realizadas las simulaciones, en especial el tipo de suelo, ya que este es un componente fundamental en el balance hídrico que realiza el modelo y determina los rendimientos alcanzables.

5.6 BIBLIOGRAFÍA

- Abedinpour M, Sarangi A, Rajput TBS, Singh M, Pathak H, Ahmad T. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 110. 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- Abedinpour M, Sarangi A, Rajput TBS, Singh M. 2014. Prediction of maize yield under future water availability scenarios using the AquaCrop model. *Journal of Agricultural Science*. 152(4), 558-574. <https://doi.org/10.1017/S0021859614000094>
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56. FAO, Rome, Italy. 300p.
- Andrade F, Cirilo A, Uhart S, Otegui ME. 1996. *Ecofisiología del maíz*. Editorial La Barrosa y Dekalpress. INTA, FCA UNMP. Argentina. 292 p.
- Bachino F. 2012. Análisis de costos y rentabilidades en riego por aspersión. En 2º Seminario Internacional de riego en cultivos y pasturas. Paysandú. Uruguay. 83-97.
- Bernardo S, Soares AA, Mantovani EC. 2005. *Manual de Irrigação*. Universidad Federal de Viçosa. 7ª ed. (Actualizada y ampliada). 611 p.
- Bolsa de Cereales. 2022 (En línea). Último acceso: 20 de abril 2022. Disponible en: <https://www.bolsadecereales.com/precios-internacionales>
- Bradford KJ, Hsiao TC. 1982. Physiological Responses to Moderate Water Stress. In: Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H. (eds) *Physiological Plant Ecology II*.

- Encyclopedia of Plant Physiology, vol 12/ B. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-68150-9_10
- Durán A. 1997 Clasificación hidrológica de los suelos del Uruguay Agrociencia Uruguay. 1 (1). 15-29.
- Greaves GE, Wang YM. 2017. Identifying irrigation strategies for improved agricultural water productivity in irrigated maize production through crop simulation modelling. Sustainability, 9(4), 630. <https://doi.org/10.3390/su9040630>
- Heng LK, Hsiao TS, Evett S, Howell T, Steduto P. 2009. Validating the FAO AquaCrop, the Model for irrigated and water deficient field Maize. Agronomy Journal, 101: 488-498.
- Hsiao TC, Heng L, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D, Fereres E. 2009. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. Agronomy Journal. 101, 448–459.
- Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt, LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ, Ritchie JT. 2003. The DSSAT cropping system model, European Journal of Agronomy. 18(3–4)235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Martínez-Álvarez. 2015. Ecofisiología del cultivo de maíz. En «El cultivo de maíz en San Luis». Ed. Garay JA, Colazo JC. INTA Ediciones. Argentina
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2021. Anuario OPYPA 2021. Análisis sectorial y cadenas productivas, temas de política, estudios. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/opypa>
- Molfino JH, Califra A. 2001. Agua disponible de las Tierras del Uruguay: 2da. Aproximación [En línea]. Último acceso 9 febrero 2022. 13p. Disponible en: <https://bit.ly/3DtUJsm>
- Morales P, Beretta A, García-Prechac F, García C, Tarjuelo JM. 2022. Avaliação do desenho e funcionamento dos pivôs centrais instalados no Uruguai. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research. 5(1): 279-294. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-025>
- SOFOVAL (Sociedad de Fomento Rural Colonia Valdense). 2021. Presupuestación de Maíz 1.^a – 2021-2022. Colonia Valdense, Uruguay. [En línea]. Último acceso: 18 de

- junio 2022. Disponible en: https://www.sofoval.com/wp2018/wordpress/wp-content/uploads/2021/08/MAIZ-DE-PRIMERA_page-0001.jpg
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal* 101 (3): 438-447
- Ran H, Kang S, Li F, Du T, Tong L, Li S, Ding R, Zhang X. 2018. Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China, *Agricultural Water Management*. 203, 438-450. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.030>.
- Steduto P, Hsiao TS, Fereres E, Raes D. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. *Estudio FAO: Riego y Drenaje*, 66. 510 p.
- Steduto P, Raes D, Hsiao TS. 2009. Concepts and applications of AquaCrop: the FAO crop water productivity model. *Crop Modelling and Decision Support*. 175–191.
- Stöckle CO, Donatelli M, Nelson R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289–307
- Tarjuelo JM. 2005. *El riego por aspersión y su tecnología (3a ed. rev. y ampl.)* Ed. Mundi-Prensa. España. 581p.
- UTE (Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas).2022. *Pliego Tarifario 2022*. 18p

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL

6.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS Y DEMANDA HÍDRICA DE LOS CULTIVOS

El presente estudio se desarrolló en condiciones climáticas diferentes en cada temporada de evaluación. Analizando los datos de ETo del modelo AquaCrop (Steduto et al., 2009, Raes et al., 2009) para las simulaciones con 41 años de datos climáticos de la estación meteorológica de INIA Las Brujas, en los cuales se consideró el período de octubre a febrero/marzo (tabla 1), la ETo de la temporada 2014-15 tuvo una probabilidad de no excedencia del 60 %, la 2015-16, del 79 % y la 2016-17, de un 5 %. El porcentaje de no excedencia es definido como el valor de ETo que se espera que no sea excedido el p % del tiempo, donde p es el nivel de probabilidad. Esto significa que, en el caso de la temporada 2016-17, solo un 5 % de los años la ETo no es superada, en los 41 años corresponde a 1 año, indicando una ETo de las más bajas; mientras que en 2014-15 y 2015-16, la ETo es superada en un 60 y 79% de los años, siendo mayores a la ETo con un 50 % de no excedencia y la ETo promedio.

En el caso de las precipitaciones, la probabilidad de ocurrencia fue de 43, 81, y 33 % para 2014-15, 2015-16 y 2016-17, respectivamente. En este caso, la probabilidad de ocurrencia indica la probabilidad de que un determinado valor de PP sea igualado o superado. Por tanto, en el caso de 2016-17, solo el 33 % de los años superan el valor de PP ocurridas en esa temporada (13 de 41 años).

La ETo promedio en enero fue 5,4, 6,1 y 4,6 mm d⁻¹ para 2014-15, 2015-16 y 2016-17, respectivamente, y para la serie histórica de 1980 a 2021 fue 5,8 mm d⁻¹ con un máximo de 7,0 mm d⁻¹. Con el dato promedio de ETo, la ETc para el diseño del equipo para maíz será de 6,96 mm d⁻¹ ($K_c = 1,2$) (Allen et al., 1998). Si se considera una eficiencia global del método de riego en torno al 85 % (E_a) para riego con pivót central (Tarjuelo, 2005, Morales et al., 2022), el valor para el diseño asciende a 8,19 mm d⁻¹.

En soja, la ETc máxima en las dos temporadas evaluadas (2014-15 y 2015-16) ocurrió en el mes de febrero (6,27 y 6,50 mm d⁻¹), debido a las fechas de siembra tardías. Utilizando este dato de ETc para el diseño de un equipo de riego para el cultivo de soja con pivót central, las necesidades de riego ascienden a 7,65 mm d⁻¹, considerando la misma E_a de 85 %. Si consideramos el manejo de fechas de siembra que permitan el

desarrollo de la etapa crítica o período crítico del cultivo de soja en el mes de mayor demanda hídrica (enero), que corresponde con el período de mayor radiación solar, con el objetivo de lograr mayores rendimientos (con riego), la demanda de riego en la temporada de mayor ETo (2015-16) sería 8,25 mm d⁻¹.

Tabla 1: probabilidad de no excedencia para la ETo y probabilidad de excedencia de la precipitación de cada temporada del ensayo, acumulado de octubre a marzo, teniendo en cuenta 41 años de datos climáticos para la localidad de Las Brujas (1980 a 2021).

Temporada	ETo		Precipitaciones	
	mm	Probabilidad de NO excedencia (%)	mm	Probabilidad de excedencia (%)
2014-15	637	60	494	43
2015-16	664	79	322	81
2016-17	559	5	506	33
50 % prob.	629	50	442	50
Promedio	627		463	

En ambos cultivos estos datos indicarían que el tratamiento de 9 mm, en promedio, cubre las necesidades de riego para el mes de máxima demanda (enero), en tanto 6 y 3 mm lo cubren parcialmente.

Sin embargo, si el diseño del equipo de riego se realiza teniendo en cuenta que sea capaz de aplicar la ETc de diseño (8,19 y 8,25 mm d⁻¹), cumpliendo con la demanda del cultivo durante todo el ciclo y, principalmente, en período crítico del cultivo, resulta en un equipo de mayor inversión inicial, con mayor costo de funcionamiento y que en las primeras y últimas etapas del ciclo del cultivo resulta sobredimensionado, ya que la demanda hídrica en dichas fases es bastante menor.

El tratamiento de 6 mm, tanto en maíz como en soja, fue capaz de mantener niveles de humedad en el suelo por encima del umbral de cierre estomático, aplicando 5,1 mm d⁻¹ netos (85 % de Ea). Cuando la demanda hídrica del cultivo fue mayor, la reserva del suelo aportó la diferencia entre la demanda del cultivo y el riego. Los riegos de 6 y 9 mm mantuvieron la humedad del suelo próximo a capacidad de campo (CC) al llegar a las etapas de mayor requerimiento hídrico y período crítico (PC), manteniendo los niveles de humedad del suelo por encima del umbral de cierre estomático.

Para definir un manejo o una estrategia de riego adecuada a la situación climática y edáfica del Uruguay se requiere un análisis que involucre más años de información y el análisis de ingresos generados por la incorporación de riego teniendo en cuenta los costos que este genera.

En este trabajo, uno de los objetivos planteados fue determinar la lámina diaria mínima de reposición con riego que permita altos rendimientos con mejor aprovechamiento de las precipitaciones y que, en definitiva, determina menores costos de inversión y operación del equipo. Los menores costos están dados por un equipo de menor tamaño, asociado a una lámina más chica.

Las proyecciones de cambio climático en la región donde se ubica Uruguay indican que habrá un aumento en las PP en los meses de verano-otoño y una disminución en invierno-primavera, con aumento de la variabilidad interanual (Cabré et al., 2016). Esto indicaría que los volúmenes de precipitación serán suficientes para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos, pero su mala distribución generará déficit puntuales en el ciclo fenológico del cultivo, similar a lo ocurrido en la tercera temporada de este experimento. Estos escenarios climáticos agregan complejidad al manejo del riego y a las decisiones que se deben tomar al momento de diseñar los equipos. La variabilidad interanual de las precipitaciones seguirá generando inestabilidad de los rendimientos (MGAP-SNRCC, 2019) y el riego es la única herramienta que permitirá estabilizarlos.

6.2. RENDIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

Tanto en maíz como en soja se observó un efecto positivo del riego sobre el rendimiento. Con base en los resultados obtenidos, si bien el promedio de los años de evaluación indica mejor desempeño del tratamiento de 9 mm, es necesario un análisis de los márgenes de ingreso económico que permita definir cuál es la opción más rentable. Para los cultivos, la mejor opción es 9 mm d⁻¹; sin embargo, los costos de inversión y operación de un equipo de riego de estas características son superiores a los de un equipo que aplique 6 mm d⁻¹. Por otro lado, 6 mm d⁻¹ es más eficiente en el aprovechamiento de las PP y de la reserva de agua del suelo (artículo 1). No sería recomendable 3 mm d⁻¹ debido a que somete al cultivo a estrés hídrico desde el inicio de la floración hasta el llenado de grano. Si bien esto no fue reflejado en forma significativa en los rendimientos de este ensayo, existen numerosos trabajos de investigación que

muestran disminución en los rendimientos cuando se da esta situación (Comas et al, 2019, Rudnick et al., 2019, Kresović et al., 2016 y Djaman et al., 2013). El tratamiento de 3 mm logró rendimientos elevados tanto en maíz como en soja, y en el caso de la soja no se diferencia significativamente de 6 mm.

Cabe mencionar que en este ensayo el manejo de las diferentes láminas de riego consistió en mantener el suelo próximo a su capacidad de campo, reponiendo el agua que el cultivo consume diariamente hasta la lámina máxima determinada por cada tratamiento (3, 6 o 9 mm d⁻¹). Esta forma de manejar el riego permite a los tratamientos con láminas deficitarias, en etapas de máxima demanda o en años donde la demanda atmosférica supera los valores promedio, utilizar la reserva del suelo durante varios días antes de llegar al nivel umbral, manteniendo el cultivo en confort hídrico.

El tratamiento de 9 mm logró mayor productividad de uso del agua en dos de tres temporadas, para el caso del maíz, y, en soja, en ambas temporadas evaluadas, lo que indica que es una alternativa eficiente en el uso del agua. Sin embargo, hizo un menor aprovechamiento de las PP, factor que debe ser tenido en cuenta en el manejo del riego en clima húmedo. Dada la variabilidad climática entre años, es recomendable modelar estos resultados utilizando bases de datos climáticas que permitan respaldar la decisión al momento de definir el caudal de diseño de los equipos de riego. Asimismo, existe la posibilidad de generar bases de datos climáticas a futuro en función de modelos de cambio climático que serían de gran utilidad para el diseñador.

En el caso del maíz, no hubo respuesta entre los tratamientos regados en la temporada con menores PP (2015-16), en la cual se esperaba una mayor diferencia entre tratamientos. Existe la posibilidad de una mayor exploración radical del cultivo en 3 y 6 mm, sumado a las PP ocurridas previo al PC y que fueron superiores a la media histórica que permitieron la recarga del suelo más allá de la profundidad radical estimada. Estos dos hechos podrían haber permitido el normal desarrollo del cultivo en el PC de este, o con niveles de estrés leves, donde 3 y 6 mm extrajeron agua a mayor profundidad, en tanto 9 mm utilizó el agua proveniente del riego y del AFD sin necesidad de profundizar más. Esto también explicaría los altos rendimientos obtenidos en el caso del maíz en el tratamiento seco.

En la calibración del modelo AquaCrop se comprobó lo mencionado anteriormente, ya que, para lograr los rendimientos obtenidos a campo en el seco, los valores simulados

logran buen ajuste con lo observado cuando al cultivo tiene una profundidad radical de 0,90 m.

6.3. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO

La evolución del agua total en la profundidad radical indica un adecuado manejo del riego, ya que la humedad se mantuvo entre el umbral y CC en la mayor parte del ciclo del cultivo, en 6 y 9 mm, tanto en maíz como en soja. Esta forma de manejo del riego asegura altas tasas de transpiración por parte del cultivo sin ajuste estomático que reduzca la apertura estomática, sin afectar la fotosíntesis (Steduto et al., 2012, Allen et al., 1998). Sin embargo, Steduto et al. (2012) recomiendan calendarios de riego con base en un agotamiento del agua disponible total (ADT) del 60 %, es decir, cercano al umbral recomendado por FAO 56 (50 %), indicando que el riego total aplicado es menor y el rendimiento no se ve afectado de forma importante. Si bien esta práctica permite mayor aprovechamiento de las PP, puede resultar riesgosa en ausencia de PP por períodos prolongados y equipos de riego de alta frecuencia que no tienen capacidad para reponer la demanda diaria del cultivo cuando esta es alta, como es el caso de los pivots centrales y el riego localizado (Tarjuelo, 2005). Estos sistemas son diseñados a partir de la ETc promedio diaria del cultivo; por tanto, si el manejo del riego se realiza manteniendo la humedad próxima al contenido umbral, existe la posibilidad de que en períodos prolongados con demandas hídricas mayores al promedio y sin PP, la humedad del suelo descienda por debajo del umbral de ajuste estomático. Estas situaciones son frecuentes en climas templados con precipitaciones erráticas en el ciclo de crecimiento. En este ensayo, esta situación se observó durante el PC en ambos años de evaluación. Otero et al. (2017) evaluaron diferentes estrategias de riego, entre ellas, agotar hasta el nivel umbral y reponer láminas de 10 mm, utilizando el modelo de balance hídrico Winlsareg (Pereira et al., 2003). Los resultados indican que esta estrategia aprovechó mejor las precipitaciones e hizo un menor uso de agua de riego. Sin embargo, el equipo diseñado para cumplir con esta estrategia de riego debe ser capaz de administrar 10 mm diarios y resulta en mayor caudal de bombeo y diseño hidráulico con diámetros de tubería mayores, por tanto, mayor costo de inversión y operación.

6.4. MODELACIÓN DE LOS DATOS

6.4.1. Calibración y validación del modelo AquaCrop para el cultivo de maíz

La calibración de AquaCrop (capítulo 4) indica que este modelo simula bien los rendimientos en situaciones de estrés hídrico leve y riego adecuado (3, 6 y 9 mm) en las tres temporadas evaluadas, cada una con diferentes situaciones climáticas (PP media, escasa y abundante). En el caso del tratamiento seco, el resultado se vio afectado por las condiciones climáticas de cada temporada evaluada. En situaciones de alta demanda atmosférica (ETo) y escasas PP, el tratamiento seco tuvo un menor ajuste tanto en el rendimiento como en producción de biomasa, con valores simulado por debajo de los observados, mientras que en un año con abundantes PP el ajuste fue bueno. El suelo del presente ensayo, en función de sus características físicas, permitiría explorar hasta los 0,90 a 1,00 m; sin embargo, las simulaciones iniciales fueron realizadas teniendo en cuenta una profundidad radical efectiva de 0,70 m. Como fue mencionado anteriormente, se consideró la opción de realizar simulaciones, en el caso del seco, con una profundidad mayor: 0,90 m. Con esta profundidad radical el modelo simuló el rendimiento del seco con menores errores, tanto en los rendimientos como en la biomasa. Según Allen et al. (1998) y Pereira y Allen (1999), la profundidad radical máxima en cultivos en seco puede ser mayor, llegando a 1,70 m en caso de suelos sin impedimentos de exploración radical. Giménez (2019) obtuvo resultados similares en los rendimientos y producción de biomasa en tratamientos con deficiencias hídricas durante la floración (período crítico). En años con PP escasas, AquaCrop subestimó el rendimiento y la biomasa. Este investigador atribuyó los errores de estimación a un desajuste de los coeficientes de estrés (Ks) para condiciones severas de deficiencia hídrica. En la calibración realizada en el capítulo 4, se ajustaron los coeficientes de estrés hídrico, tanto los de estrés de expansión foliar (Ks_{exp}) como los de ajuste estomático (Ks_{sto}). Con este ajuste se mejoraron las simulaciones.

El ajuste del Ks_{exp} mejoró las simulaciones de rendimiento del tratamiento de 3 mm. En este tratamiento, al aumentar la demanda hídrica (por aumento de la ETo y de la cobertura del cultivo), el riego de 3 mm d⁻¹ no es suficiente para reponer dicha demanda y el cultivo empieza a agotar el AD del suelo, llegando a niveles por debajo del umbral de

expansión foliar. Con los valores por defecto del modelo, 3 mm simulaba rendimientos mayores a los observados.

Es necesario tener presente que las condiciones ensayadas fueron realizadas en un suelo característicos de la zona sur del Uruguay (Argiudol típico) con una capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAAD) media a alta (Molfino y Califra, 2001), siendo este parámetro hídrico del suelo fundamental para el manejo del riego y la respuesta del cultivo. Esta alta CAAD del suelo es lo que explica, en buena parte, los altos rendimientos logrados en el secano en los 3 años de evaluación en maíz.

En este trabajo se comprueba la simplicidad del modelo AquaCrop en cuanto a datos de entrada mínimos requerido, fácilmente disponible o que se pueden recopilar sin dificultad, y que lo hacen sencillo de utilizar por los usuarios finales de tipo profesional o de investigación cuando se quieren evaluar estrategias de riegos deficitarios o riegos completos.

6.4.2. Evaluación de estrategias de riego

La utilidad de un modelo, como AquaCrop, es el de realizar simulaciones para condiciones ambientales diferentes a las ensayadas a campo y para muchos años (repeticiones). Los objetivos de las mismas pueden ser varias, por ejemplo, como herramienta de planificación y para ayudar en las decisiones de manejo tanto en agricultura de secano como bajo riego, comprender las respuestas de los cultivos al cambio ambiental, comparar los rendimientos potenciales y reales en campos, identificar las limitantes en la producción de cultivos y la productividad del agua, desarrollar programas de riego (estrategias estacionales y toma de decisiones operativas) o apoyar la toma de decisiones sobre asignaciones de agua y otras políticas de agua (Salman et al., 2021).

En este trabajo se hizo foco en la evaluación de estrategias de riego que permitan rendimientos estables a lo largo de los años para las condiciones de suelo y clima de dos zonas agrícolas ubicadas en la región de agricultura extensiva de cultivos cerealeros e industriales de Uruguay: Paysandú y Colonia.

Para definir una estrategia de riego adecuada para estas zonas, además de las simulaciones con AquaCrop, se realizó un análisis de los costos asociados directamente a

la aplicación del riego de las diferentes estrategias, utilizando la información de las simulaciones.

Cabe mencionar que el análisis se basó en datos promedios para los 41 años de simulaciones. Esto implica que para el caso de las láminas de riego promedio también es importante considerar las láminas máximas o con cierta probabilidad de ocurrencia, ya que estas se dan en los años más secos de la serie de años y que deben ser tenidas en cuenta al momento de diseñar la reserva de agua (embalse o represa). En la siguiente tabla se presenta dicha información para la localidad de Colonia. La lámina con un 25 % de probabilidad de ocurrencia nos indica que la lámina de riego indicada es superada 1 vez cada 4 años, siendo un dato más seguro para el diseño de obras de reserva de agua, en lugar de utilizar la lámina de riego promedio, la cual nos indica que el 50 % de los años es superada (1 vez cada 2 años).

La información de lámina de riego proporcionada por el modelo no solo tiene la utilidad de definir el volumen de agua a embalsar, sino que, además, afecta los costos directos del riego. El análisis de costos energéticos considerados en el capítulo 5 se ve afectado por el número de riegos realizados por año: al aumentar la lámina de riego anual, aumenta la cantidad de riegos y los costos de energía utilizada por año.

Tabla 2: lámina neta de riego promedio, máxima, promedio de los 10 años con mayor lámina y con 25 % de probabilidad de ocurrencia, en mm por año, para la localidad de Colonia.

Estrategia	Lámina neta promedio	Lámina neta máxima	Promedio de 10 años más alto	Con 25 % de probabilidad de ocurrencia
E3_10	284	387	349	315
E3_50 %	262	390	342	303
E3_100 %	185	333	282	225
E5_10	377	550	500	430
E5_50 %	340	540	479	405
E5_100 %	251	470	404	320
E8_10	409	568	527	464
E8_50 %	364	560	497	424
E8_100 %	270	488	423	336

La información presentada en la tabla 2 indica valores orientativos que permiten al diseñador tener una noción de las láminas netas anuales de riego, necesarias teniendo en

cuenta los diferentes criterios que las definen. En el Anexo, tabla 1, se podrán encontrar las láminas para cada una de las estrategias con su correspondiente probabilidad de ocurrencia.

No es objetivo de este trabajo el análisis exhaustivo de los costos de riego, ya que implicaría el análisis de los costos de inversión de toda la infraestructura relacionada con la incorporación de riego (reserva de agua, instalación eléctrica, obras de la estación de bombeo, conducción del agua, pivot de riego, mantenimiento, etc.).

También es importante resaltar que son simulaciones con un modelo, por tanto, la aplicación de los riegos se realiza respetando en forma precisa la estrategia de riego que se le indica al mismo. No contempla posibles fallas en el manejo del riego que normalmente pueden ocurrir durante la temporada de cultivo (roturas) y que pueden afectar el rendimiento final. Tampoco se tuvieron en cuenta deficiencias nutricionales ni problemas de malezas. Si bien con el modelo se puede modificar el nivel de fertilidad y el nivel de enmalezamiento, estas variables no fueron tenidas en cuenta en las simulaciones. Esto es importante tenerlo en cuenta, ya que son factores que modifican los rendimientos finales y que en situaciones reales no son tan controladas como en un experimento de investigación, mostrando las brechas de rendimiento entre los resultados experimentales y los comerciales.

También habrá que considerar el efecto de la huella de las ruedas sobre el suelo, posibles efectos de compactación y el aumento de roturas mecánicas, consecuencias del uso intensivo del pivot. En algunos años la estrategia de 3 mm realizó riegos casi todos los días del ciclo del cultivo (número máximo de vueltas, 130). Esto aumenta también los costos de mantenimiento del equipo. Según los manuales de mantenimiento (Valley Irrigation, 2019), en los equipos giratorios como el pivot central, determinadas partes de la torre central deben lubricarse cada 5 o 7 revoluciones (giros) para evitar su atascamiento o movimientos erráticos que afecten la alineación del pivot central. El mantenimiento general del equipo y la sustitución de piezas está en función de las horas de funcionamiento. Es necesario considerar este tiempo de mantenimiento durante la temporada de riego, ya que el fabricante recomienda chequeos (aspersores, presión de trabajo, presión de las ruedas, alineación del equipo) y, principalmente, lubricación durante el período de uso, permitiendo un funcionamiento correcto y mayor durabilidad del pivot.

Para ejemplificar, en la siguiente figura se muestra una de las simulaciones utilizando datos climáticos para la Estación meteorológica de INIA La Estanzuela, para el cultivo de maíz calibrado, en la localidad de Colonia.

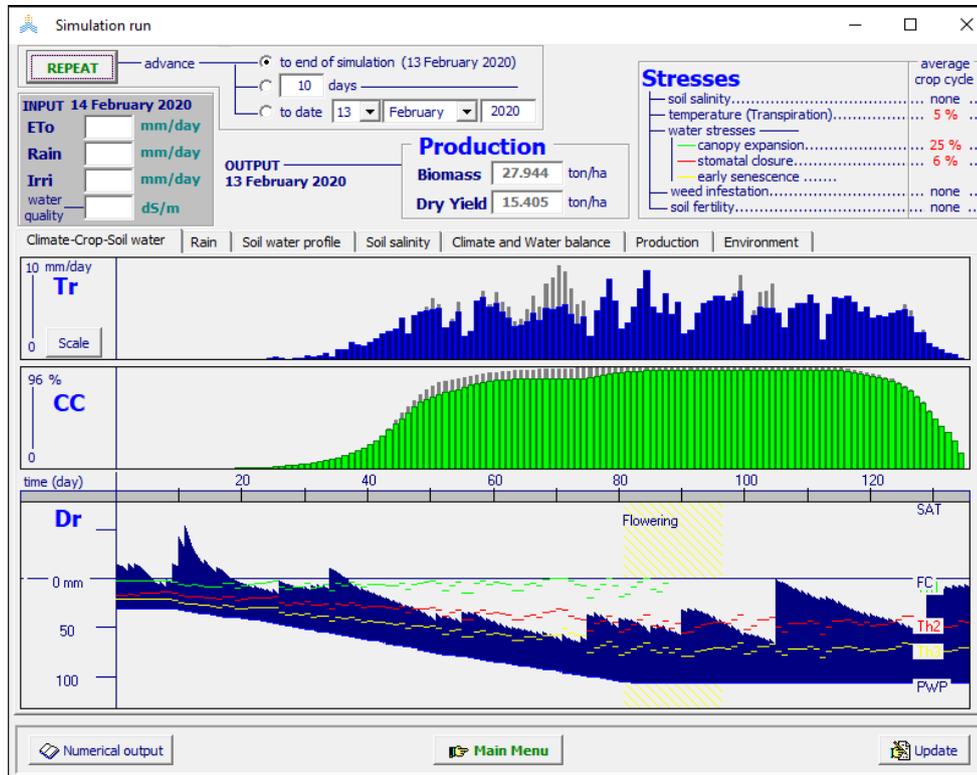


Figura 1: simulación con AquaCrop utilizando datos climáticos de INIA La Estanzuela, para la temporada 2019-20, para las variables transpiración (Tr), cobertura vegetal (CC, Canopy Cover) y déficit de humedad del suelo en la zona radical (Dr, Root Zone Depletion).

La estrategia de riego corresponde a una lámina neta máxima de 3 mm (lámina bruta de 3,5 mm) que se repone cada vez que la humedad del suelo desciende 10 mm del AFD. Puede observarse el continuo descenso del contenido de humedad del suelo (Dr) a partir del día 38 por falta de PP y debido a que el equipo no es capaz de mantener esa reserva de agua en el suelo. En este año, la cantidad de agua de riego necesaria fue de 315 mm netos, un total de 105 eventos de riego, en un ciclo de 136 días (figura 2).

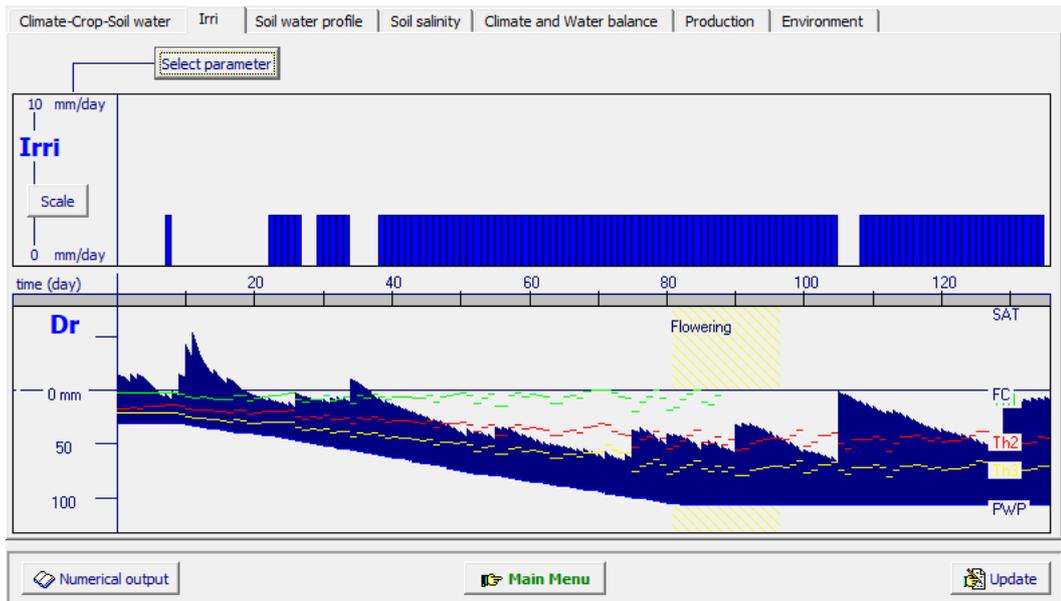


Figura 2: eventos de riego (Irri) para la temporada 2019-20

Como puede observarse en la figura 2, los eventos de riego a partir del día 38 (aproximadamente) se realizaron de forma continua, pero no lograron mantener el déficit de humedad en la zona radical (Dr) por encima de los umbrales de expansión foliar (línea verde) ni de ajuste estomático (línea roja), pero sí por encima del umbral de senescencia (línea amarilla), evitando la senescencia anticipada del cultivo.

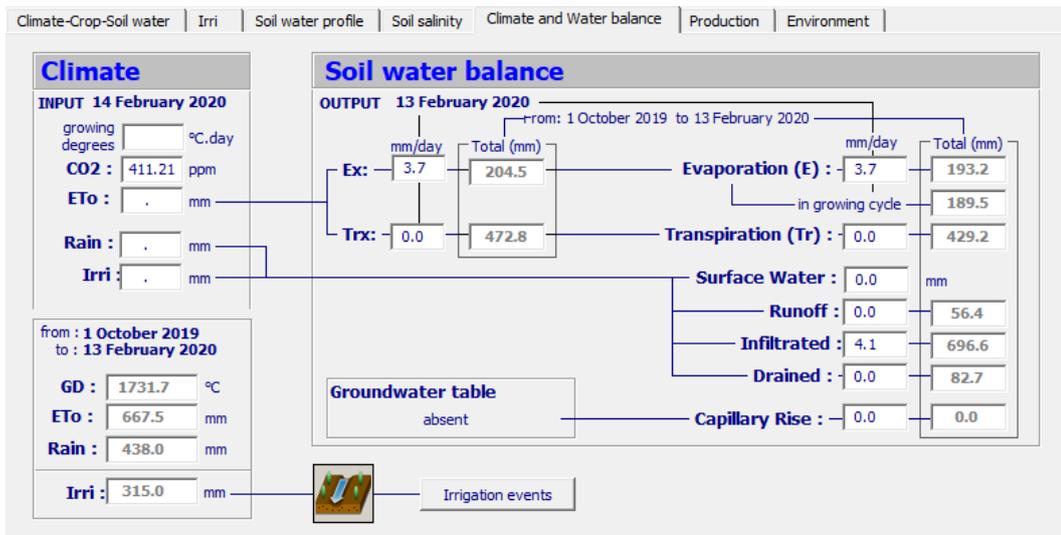


Figura 3: componentes del balance hídrico del suelo para la temporada 2019-2020

La figura 3 muestra los componentes del balance hídrico del suelo realizado por AquaCrop. El rendimiento de esta temporada fue alto, 15,4 t ha⁻¹ (figura 1), a pesar de que

el cultivo sufrió estrés ($K_{s_{exp}}$ y $K_{s_{sto}}$). Para alcanzar este rendimiento, el cultivo consumió 622 mm totales (429,2 + 193,2 mm), de los cuales el 51 % fue agua de riego.

Si bien fue un año donde las PP no fueron escasas (438 mm en el ciclo), su distribución temporal no permitió un suministro continuo de agua para el cultivo; sin embargo, fueron PP oportunas (figura 4). La ocurrencia oportuna de las PP en el PC permitió el rendimiento elevado de esta temporada. Si bien las PP no llevaron el suelo a su capacidad de campo, permitió al cultivo de maíz desarrollarse en esta etapa sin ajuste estomático (línea roja).

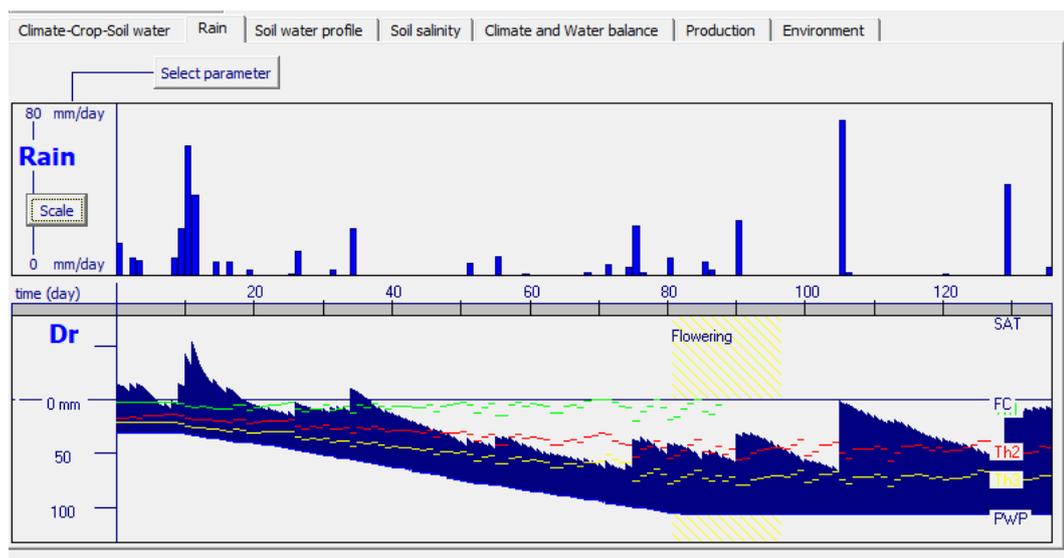


Figura 4: distribución de las precipitaciones para la temporada 2019-2020

Este tipo de análisis permite mejorar, ajustar o definir las decisiones relacionadas con el riego y, al mismo tiempo, explica las causas de un alto o bajo rendimiento de un cultivo.

6.5. ¿CÓMO SE ESTÁ MANEJANDO EL RIEGO EN EL SECTOR PRODUCTIVO DEL URUGUAY?

Según el análisis de encuestas a productores realizadas por INIA et al., (2017), el 32 % de los equipos de riego aplican menos de 6 mm y el 68 % aplican más de 6 mm diarios, basándose en 43 encuestados. En cuanto a la lámina total aplicada por año, del total de encuestados, el 16 % aplican hasta 350 mm, el 50 % aplican hasta 250 mm, 14 %, menos de 150 mm y el resto de los encuestados indica que la lámina es según demanda. Cuando los productores son consultados acerca de las necesidades de investigación, uno de los temas que mencionan es: «Demostrar que diseñar equipos con 3-5 mm con 20 h es un cuello de botella para la alta producción». También la encuesta hace referencia a los

problemas operativos mencionados por los productores: falla eléctrica de las bombas, rotura mecánica de equipos, rotura de tuberías, enterrada del pívot.

La información de esta encuesta muestra que la mayoría de los productores encuestados cuenta con pívots de 6 mm, siendo un indicador de que los equipos pueden cumplir con la demanda del cultivo en la mayoría de los años. Las láminas anuales de riego que aplican, en algunos casos están por debajo de la media estimada en las simulaciones, lo que puede indicar que el manejo del riego no es el adecuado. Este factor muchas veces se traduce en rendimientos obtenidos menores a los esperados en situaciones de riego, desestimulando la incorporación de este. AquaCrop puede analizar un determinado esquema de riego realizado y permite detectar las fallas cometidas en la ejecución del riego; de esta forma, se puede mejorar el manejo a futuro del riego.

En la evaluación de estrategias de riego, la lámina neta de riego máxima con 3 mm diarios logró altos rendimientos —en promedio, de 15,3 t ha⁻¹— en las condiciones de simulación mencionadas anteriormente, sin fallas en el manejo del riego, en un suelo que permite una exploración radical de 82 cm y con ADT de 109 mm. El suelo es uno de los aspectos clave que determinan los rendimientos logrados, tanto en los ensayos a campo de este trabajo como en las simulaciones, ya que, como se mencionó anteriormente, es el que suministra el agua cuando el riego no cubre la demanda hídrica diaria del cultivo. En situaciones de producción comercial, en una superficie grande de cultivo como la que cubre un pívot de riego (40, 50, 70 ha o más), difícilmente toda esa superficie corresponda a un solo tipo de suelo. Esto también afecta los rendimientos promedios logrados en chacra y aumenta las diferencias respecto a los rendimientos logrados en condiciones experimentales.

Teniendo en cuenta lo anterior y la alta variación de los rendimientos logrados en las simulaciones, posiblemente el diseño de un equipo de riego con una lámina de 3 mm neto (3,5 mm bruto) sea un cuello de botella para la alta producción, como lo perciben los productores encuestados, ya que requiere un manejo estricto del riego, el cual muchas veces a nivel comercial no puede lograrse por diversas fallas, como lo indican las encuestas a los productores regantes (INIA et al., 2017).

Otro tema que hasta ahora no se ha mencionado y que afecta los resultados productivos hace referencia a la eficiencia de aplicación (Ea) de los equipos de riego tipo pívot central. Se asumió una Ea del 85 a 90 % (Tarjuelo 2005, Morales et al., 2022); sin

embargo, la E_a se ve afectada por la operación incorrecta de los pívot, por ejemplo, cuando se utilizan presiones por debajo de las requeridas y/o hay un mal mantenimiento de los aspersores. Esto afecta a todas las láminas de riego, pero resultará más perjudicial en aquellas láminas más bajas donde casi no existe margen para el manejo del riego.

Con láminas netas de 5 y 8 mm, el modelo simula rendimientos promedios mayores a los de 3 mm y con menor variación (más estables en el tiempo). Entre 5 mm y 8 mm, las diferencias en rendimiento son mínimas (0,4 y 1 % más con 8 mm, Colonia y Paysandú, respectivamente) y los márgenes de ingresos parciales son mayores en 6 mm, debido a que 8 mm tiene mayor costo del mm de riego aplicado a causa del mayor requerimiento de potencia del equipo (Anexo, tabla 2 y 3).

6.6. ANÁLISIS DE LOS MÁRGENES DE INGRESOS

Del análisis realizado en el capítulo 5, la estrategia de 5 mm, en promedio, genera ingresos parciales de 12,1 % mayores a la estrategia de 3 mm y de -3,2 % respecto a 8 mm, teniendo en cuenta los precios actuales del maíz (323 USD t^{-1}), los cuales, por una coyuntura internacional favorable, se encuentran en niveles récords. Si consideramos el precio promedio de los últimos 6 años (187 USD t^{-1}), las diferencias aumentan y 5 mm genera 15,4 % más de ingresos que 3 mm y de -5,3 % de diferencias con 8 mm (6 mm genera mayor margen de ingreso que 8 mm).

Teniendo en cuenta el análisis previo, la estrategia con una lámina neta de 5 mm (aproximadamente, 6 mm bruto) resulta más conveniente que 3 mm y 8 mm netos por diferentes razones. Como fue mencionado anteriormente, la estrategia de 3 mm si bien da muy buenos rendimientos, es riesgosa, ya que genera variabilidad en los rendimientos y que da muy poco margen a imprevistos operativos del riego. La estrategia de 8 mm da rendimientos altos similares a 5 mm, pero su costo operativo es mayor, ya que requiere un equipo de bombeo con mayor potencia.

Si bien los costos de amortización y mantenimiento de toda la infraestructura relacionada al riego son importantes en un análisis de ingresos económicos, implican un análisis con muchas variables más a considerar. En este trabajo, el análisis de ingresos parciales fue un complemento que permite visualizar los costos directos asociados al consumo eléctrico del riego y que dan al diseñador, productor o inversor otra información

para apoyar su elección por una u otra estrategia de manejo del riego, más allá del análisis basado en variables productivas y de productividad del agua de los cultivos.

7. CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES

En las condiciones climáticas del Uruguay, con precipitaciones en la estación de crecimiento de los cultivos, existe respuesta a diferentes niveles de riego deficitario. Cuando las precipitaciones promedio son superiores a la media histórica, su mala distribución temporal genera déficit hídrico en momentos puntuales, afectando el rendimiento tanto en maíz como en soja.

En maíz, los tratamientos de secano y 3 mm no cubrieron la ETc durante el PC y llenado de grano en las tres temporadas de evaluación, lo que determinó diferencias significativas en el rendimiento promedio de los tres años.

Los tratamientos de 6 y 9 mm fueron adecuados para maíz, con rendimientos mayores, y en el promedio de los tres años fueron significativamente diferentes.

El tratamiento de 9mm en el promedio de los 3 años de evaluación dio mayores valores en los indicadores de eficiencia de uso del agua de riego, sin embargo 6 mm fue más eficiente en el uso del agua del suelo y de las PP, ahorrando agua de riego.

En soja, el tratamiento de 9 mm fue el de mejor rendimiento en ambos años, pero en el año 1 no se diferenció significativamente de 6 mm. En este último tratamiento, la cantidad de agua de riego aplicada fue menor y el aprovechamiento del agua de lluvia fue mayor que en el de 9 mm en ambos años.

En los suelos del Uruguay, similares al del presente ensayo, con alta y muy alta capacidad de retención de agua los equipos diseñados con una capacidad de reponer, como máximo, 6 mm por día, serían una buena opción de acuerdo a los resultados del estudio experimental. Por otra parte, la opción de 3 mm debe ser analizada económicamente para estimar si el aumento del rendimiento logrado aplicando 6 mm justifica la mayor inversión y costo operativo respecto a aplicar 3 mm.

El modelo AquaCrop calibrado para maíz simuló aceptablemente el rendimiento y la producción de biomasa de los tratamientos de riego (3, 6 y 9 mm) y en el secano cuando la profundidad de enraizamiento se fijó en 90 cm.

El modelo AquaCrop simuló muy bien la evolución del contenido de agua en el suelo en los tratamientos de riego y de secano.

Es un modelo simple y los resultados de este estudio permiten pensar que puede ser utilizado en nuestro país para evaluar estrategias de riego deficitario en maíz.

Es necesario ajustar los coeficientes de estrés del cultivo para que las simulaciones logren un adecuado ajuste.

El uso del modelo calibrado para evaluar estrategias de riego para dos localidades del Uruguay (Paysandú y Colonia) indican que:

— El secano da rendimientos promedios bajos, en torno a los 6 t ha⁻¹ en Paysandú y 8,5 t ha⁻¹ en Colonia, con gran variabilidad de los rendimientos, en ambas localidades.

— La mayor profundidad del suelo en Colonia determinó mayores rendimientos promedios en todos los tratamientos respecto a los obtenidos en Paysandú.

— La lámina neta de 3 mm, si bien las simulaciones dan rendimientos elevados (promedio de 13,7 y 15,3 t ha⁻¹ en Paysandú y Colonia, respectivamente), estos tienen una gran variación entre años, la productividad del agua es menor respecto a 5 y 8 mm netos y tiene márgenes de ingresos parciales menores a 5 mm. Esta lámina no permitiría fallas en la operativa del riego (roturas), debido a que no es capaz de cubrir las necesidades hídricas diarias en etapas avanzadas del cultivo y en pocos días puede agotar la reserva de agua del suelo, lo cual resulta riesgoso si no ocurren precipitaciones previo al inicio de la etapa crítica.

— Las láminas netas de 5 y 8 mm simulan rendimientos similares, en promedio de 15,6 y 16,8 t ha⁻¹ en Paysandú y Colonia, respectivamente, con poca variabilidad de los rendimientos entre años y alta productividad del agua. Sin embargo 5 mm tiene menor lámina de riego por ciclo y menor demanda energética por riego respecto a la estrategia de 8 mm.

— El análisis de los márgenes de ingreso, teniendo en cuenta los costos de producción (incluyendo manejo poscosecha y renta de la tierra) y los costos energéticos de aplicación del riego indicarían que la estrategia de 5 mm es la más conveniente.

— La estrategia de 5 mm en promedio, genera ingresos parciales de 12 % mayores a la estrategia de 3 mm (aproximadamente, 30 mil dólares más) y 3,2 % mayores a 8 mm, teniendo en cuenta los precios actuales del maíz (323 USD t⁻¹); en cambio, si consideramos el precio promedio de los últimos 6 años (187 USD t⁻¹), las diferencias

porcentuales aumentan y 5 mm genera 15,4 % más de ingresos que 3 mm (aproximadamente, 16 mil dólares más) y 5,3 % más que 8 mm.

Para descartar la estrategia de 3 mm, será necesario un análisis que contemple la amortización, el mantenimiento del pivot central durante la temporada de riego y de la infraestructura de riego, así como también un análisis estadístico de la variabilidad de sus resultados, que no se tuvieron en cuenta en este trabajo.

En lo referente al manejo de la lámina de riego, las simulaciones indican que dejar descender el 100 % del AFD y reponer 3, 5 u 8 mm es la opción con menor lámina de riego aplicada y menor consumo de potencia por ciclo de cultivo; sin embargo, no es el manejo con mayor margen de ingreso. El manejo dejando agotar el 50 % del AFD da un margen levemente superior porque los rendimientos son mayores.

En este trabajo de investigación se evaluaron variables productivas del cultivo y del agua, variables asociadas a los costos energéticos para aplicar el riego que dejan ver los márgenes parciales de ingreso económico, con la finalidad de aportar información al tomador de decisiones, al proyectista, al inversionista o al productor, que le permita definir el manejo del riego y el caudal de diseño del equipo (definido por la lámina máxima a aplicar por día) en función de los riesgos que esté dispuesto a asumir.

Si bien se evalúan 3 láminas netas máximas y 3 estrategias de riego, las posibilidades de simulación de estrategias de riego con AquaCrop son muy amplias. La posibilidad de evaluar el efecto del cambio climático (cambios en la distribución y volúmenes de PP, cambios en la temperatura, etc.) sobre el rendimiento de los cultivos permitirá realizar modificaciones en el manejo de los cultivos, por ejemplo, en las fechas de siembra o en la previsión de los volúmenes de agua a embalsar.

8. BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Andriani JM. 2000. Consumo de agua de los cultivos en el Sur de Santa Fe. Para Mejorar la Producción, 13: 27 - 30.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56. FAO, Rome, Italy. 300 p.
- Andrade FH, Cirilo A, Uhart S, Otegui ME. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce: La Barrosa, INTA Balcarce, FCA UNMP, Dekalpress. 292 p.
- Andrade FH, Sadras VO. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Andrade FH, Sadras VO. [Eds.]. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana. 173-206.
- Cabré MF, Soloman S, Núñez M. 2016. Regional climate change scenarios over southern South America for future climate (2080-2099) using the MM5 Mode: mean, interannual variability and uncertainties. *Atmósfera*. 29(1):35-60.
- Cámara G, Cazzuli F, Arbeletche P, De Hegedus P. 2019. The Livestock farmers who adopt irrigation. *Agrociencia Uruguay*, 23(2), e82. <https://doi.org/10.31285/AGRO.23.82>
- Comas LH, Trout TJ, DeJonge KC, Zhang H, Gleason SM. 2019. Water productivity under strategic growth stage-based deficit irrigation in maize. *Agricultural Water Management*. 212: 433-440.
- DACC-MGAP (Desarrollo y Adaptación al Cambio Climático-Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2012. Proyecto Desarrollo y Adaptación al Cambio Climático (BIRF 8099-UY) [En línea] Último acceso: 17 de junio 2022. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/proyectos/proyecto-desarrollo-adaptacion-cambio-climatico>.
- Djaman K, Irmak S, Rathje WR, Martin DL, Eisenhauer DE. 2013. Maize evapotranspiration, yield production functions, biomass, grain yield, harvest index, and yield response factors under full and limited irrigation. *Transaction of American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 56(2): 273-293.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2021. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe

- de síntesis 2021. Rome. [En línea]. Último acceso: 25 de mayo 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/3/cb7654es/cb7654es.pdf>
- FAO-AQUASTAT (Food and Agriculture Organization). 2022. Base de datos central de AQUASTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [En línea]. Último acceso: 9 febrero 2022. <https://www.fao.org/aquastat/statistics/query/index.html?jsessionid=CC7831C02D6B731966AAC9A1A76C2255>
- Giménez L. 2019. AquaCrop model evaluation in maize under different water availabilities in the western of Uruguay. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*. 9(2), 103- 117. [En línea]. Último acceso: 20 noviembre 2021. <http://dx.doi.org/10.21276/ijpaes>
- Giménez L. 2014. Effect of Water Deficiencies at Different Stages of Development on Soybean Yield. *Agrociencia Uruguay*. 18(1):53-64 [En línea]. Último acceso: 23 octubre 2020. Disponible en: <http://agrocienciauruguay.uy/ojs/index.php/agrociencia/article/view/439>
- Giménez L. 2012. Production of Corn with Water Stress at Different Stages of Development. *Agrociencia Uruguay*. 16(2): 92-102. [En línea]. Último acceso: 11 febrero 2021. Disponible en: <http://agrocienciauruguay.uy/ojs/index.php/agrociencia/article/view/544>
- Giménez L, García Petillo M. 2011. Summer Crops Evapotranspiration for Two Climatically Constrating Regions of Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 15(2):100-18. [En línea]. Último acceso: 18 junio 2022. Disponible en: <http://agrocienciauruguay.uy/ojs/index.php/agrociencia/article/view/598>.
- Heermann DF, Haise HR, Mickleison RH. 1976. Scheduling center pivot sprinkler irrigation for corn production in eastern Colorado. *Transaction of the ASAE*, 19(1). 284-287.
- Hsiao TC, Fereres E. 2012. Maíz. En Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. *Crop yield response to water*. Rome: FAO; 2012. 500 p. (Irrigation and drainage; Paper 66). 119-126
- Hsiao TC, Heng L, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D, Fereres E. 2009. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101, 448-459. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>

- INIA, FAGRO, OPYPA, DIEA, DGRN (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria-Facultad de Agronomía-Oficina de Programación y Política Agropecuaria-Oficina de Estadísticas Agropecuarias-Dirección Nacional de Recursos Naturales) 2017. Análisis Encuestas de Riego. [En línea] Último acceso: 2 marzo 2022. Disponible en:
<http://www.inia.uy/Documentos/P%C3%BAblicos/INIA%20La%20Estanzuela/riego%20set%202017/Finozzi%20-%20MGAP%20-%20riego%20set%202017.pdf>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 688 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Cambio Climático 2007. Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Equipo de redacción principal: Pachauri R, Reisinger A. IPCC, Ginebra, Suiza. 104p
- Israelsen OW. 1950. Irrigation Principles the Practices. Wiley, New York. 471 p.
- Kresović B, Tapanarova A, Tomić Z, Životić L, Vujović D, Sredojević Z, Gajić B. 2016. Grain yield and water use efficiency of maize as influenced by different irrigation regimes through sprinkler irrigation under temperate climate. Agricultural Water Management. 169:34-43.
- Meerhoff M. 2018. Sobre la Ley de Riego, los efectos sobre el ambiente y una discusión necesaria. [En línea]. Último acceso: 15 mayo 2022. Disponible en:
<https://www.hemisferioizquierdo.uy/single-post/2018/09/07/sobre-la-ley-de-riego-los-efectos-sobre-el-ambiente-y-una-discusi%C3%B3n-necesaria>
- MGAP-SNRCC (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático y Variabilidad). 2019. PNA AGRO, Plan Nacional de adaptación a la variabilidad y el cambio climático para el sector agropecuario. 128pp. [En línea]. Último acceso: 18 de junio de 2022. Disponible en:

<https://www.undp.org/es/uruguay/publications/plan-nacional-de-adaptaci%C3%B3n-la-variabilidad-y-el-cambio-clim%C3%A1tico-para-el-sector-agropecuario-pna-agro>.

MVOTMA-SNRCC (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente- Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático y Variabilidad). 2016. Cuarta comunicación nacional a la conferencia de las partes en la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Uruguay 2016. [En línea]. Último Acceso: 18 junio 2022. Disponible en: [https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Cuarta Comunicacion Nacional Uruguay y Resumen Ejecutivo 2.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Cuarta%20Comunicacion%20Nacional%20Uruguay%20y%20Resumen%20Ejecutivo%202.pdf)

Molfino JH, Califra A. 2001. Agua disponible de las Tierras del Uruguay: 2.^{da} Aproximación. 13 p. [En línea]. Último acceso: 30 agosto 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3DtUJsm>.

Morales P, Beretta A, García-Prechac F, García C, Tarjuelo JM. 2022. Avaliação do desenho e funcionamento dos pivôs centrais instalados no Uruguai. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research. 5(1): 279-294. [En línea]. Último acceso: 18 mayo 2022. Disponible en: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BJAER/article/view/43083/32406>

NU-CEPAL (Naciones Unidas-Comisión Económica para América Latina y el Caribe) 2016. Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe. Serie Recursos naturales e infraestructura N° 178. 57 p. [En Línea] Último acceso: 18 junio 2022. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40074/S1600566_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Otero A, Montoya F, García C. 2017. Programación del riego. Montevideo: INIA. Serie Técnica 232; 68 p.

Pereira LS, de Juan JA, Picornell MR, Tarjuelo JM. 2010. El riego y sus tecnologías. Albacete, España. CREA (Centro Regional de Estudios del Agua), Universidad de Castilla La Mancha. 296 p.

Pereira LS, Teodoro PR, Rodrigues PN, Texeira JL. 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. En Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Dordrecht: Kluwer;161-80.

- Pereira LS, Allen RG. 1999. Irrigation and Drainage. En: van Lier HN, Pereira LS, Steiner FR. CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Volume I. Land and Water Engineering. Editorial CIGR – The International Commission of Agricultural Engineering. American Society of Agricultural Engineers (ASAE)
- Piedrabuena L. 2014. Evaluación económica del riego suplementario en cultivos y pasturas. In: Giménez L, editor. Riego suplementario en cultivos y pasturas. Montevideo: INIA; Serie FPTA 55. 59-66.
- Presidencia de la República Oriental del Uruguay-Oficina de Planeamiento y Presupuesto (OPP). 2021 Informe Nacional Voluntario-Uruguay 2021. Objetivos de Desarrollo Sostenible. [En línea]. Último acceso: 18 junio 2022. Disponible en: <https://www.gub.uy/agencia-uruguay-cooperacion-internacional/comunicacion/publicaciones/informe-nacional-voluntario-2021>
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. 2012. Crop Water Productivity. Calculation Procedures and Calibration Guidance. AquaCrop version 4.0. FAO Land and Water Development Division, Rome. Italy.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. Agronomy Journal. 101 (3): 438-447
- Rudnick D, Irmak S, West C, Chavez J, Kisekka I, Marek T, Schneekloth J, Mitchell Mcallister D, Sharma V, Djaman K, Aguilar J, Schipanski ME, Rogers DH, Schlegel A. 2019. Deficit irrigation management of maize in the High Aquifer Region: a review. Journal of the American Water Resources Association. [En línea]. Último acceso: 30 agosto 2021. 55(1):38-55. Disponible en: <https://bit.ly/3gMgPN7>
- Salgado C, Yiansens A. 2017. Evaluación económica de los sistemas de pasturas con riego en CIEDAG. En: Serie Técnica 231, INIA, Producción intensiva de carne en pasturas regadas con pívot central. 31- 38. [En línea]. Último acceso: 30 mayo 2022. Disponible en: <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7410/1/st-231-2017.-p.31-38.pdf>
- Salman M, García-Vila M, Fereres E, Raes D, Steduto P. 2021. The AquaCrop model – Enhancing crop water productivity. Ten years of development, dissemination and implementation 2009–2019. FAO Water Report No. 47. Rome, FAO. [En línea].

Último acceso: 18 junio 2022. Disponible en:

<https://www.fao.org/publications/card/es/c/CB7392EN/>

- Sawchik J, Mas C, Pérez Gomar E, Bermúdez R, Pravia V, Giorello D, Ayala W. 2010. Riego suplementario en pasturas; antecedentes de investigación nacional. In: Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas. 1.º Seminario Internacional; 2010 Agosto; Paysandú, Uruguay. Montevideo: INIA. 141-53
- Sawchik J, Cereta S. 2005. Consumo de agua por sojas de distinto grupo de madurez en diferentes ambientes de producción. En: Jornada Técnica de cultivos: Trabajos presentados. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión; 417). 41 - 45.
- Serraj R, Sinclair T, Purcell L. 1999. Symbiotic N₂ fixation response to drought. *Journal Experimental Botany*, 50(331): 143 – 155.
- Sinclair TR, Serraj R. 1995. Dinitrogen fixation sensitivity to drought among grain legume species. *Nature*, 378: 344
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. 2012. Crop yield response to water. Rome. FAO. (Irrigation and drainage serie 66). 500 p
- Steduto P, Raes D, Hsiao TS. 2009. Concepts and applications of AquaCrop: the FAO crop water productivity model. *Crop Modelling and Decision Support*. 175–191.
- Tarjuelo JM. 2005. El riego por aspersión y su tecnología (3a ed. rev. y ampl.) Ed. Mundi-Prensa. España. 581 p
- Valley Irrigation. 2019. Center Pivot 7000, 8000, 8120 Series Owner's Manual 0994464_M. 109 p. [En línea]. Último acceso: 18 junio 2022. Disponible en: <https://www.valleyirrigation.com/manuals>
- Wani SP, Heng LK. 2012. Soja. En Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. Crop yield response to water. Rome: FAO; 2012. 500 p. (Irrigation and drainage serie 66). 130-138
- WM (Water Monographies) 2015. Agua y desarrollo sostenible. El agua, fuente de vida: 2005-2015. [En línea]. Último acceso: 22 junio 2022. Disponible en: https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/WM_IIIESP.pdf. 104 p.

9. ANEXOS

Tabla 1: probabilidad de ocurrencia (%) de las láminas netas de riego para las distintas estrategias de riego, obtenidas en 41 años de simulaciones con AquaCrop para el departamento de Colonia.

	%	E3_10	E3_50 %	E3_100 %	E5_10	E5_50 %	E5_100 %	E8_10	E8_50 %	E8_100 %
1	2	387	390	333	550	540	470	568	560	488
2	5	375	372	306	545	535	445	568	544	472
3	7	372	354	300	545	530	435	568	544	456
4	10	354	351	294	520	510	420	568	544	456
5	12	345	339	288	515	490	410	544	528	448
6	14	342	333	273	510	475	405	536	504	424
7	17	336	330	270	470	455	400	488	448	408
8	19	333	330	270	465	435	370	488	440	384
9	21	327	309	252	440	410	345	472	432	352
10	24	318	309	231	435	405	335	472	424	344
11	26	315	303	225	430	405	320	464	424	336
12	29	315	300	222	430	405	320	464	424	336
13	31	315	297	222	400	380	310	440	408	336
14	33	312	294	219	400	375	295	432	400	304
15	36	309	288	213	395	360	275	432	400	304
16	38	306	285	210	395	355	260	424	384	296
17	40	291	267	204	390	355	255	424	384	280
18	43	288	264	183	380	340	250	416	368	272
19	45	288	264	177	375	330	235	416	368	272
20	48	285	261	174	375	330	230	408	368	264
21	50	285	252	171	370	330	225	400	352	248
22	52	282	252	171	365	310	225	392	344	248
23	55	282	249	168	350	305	215	384	328	216
24	57	276	243	165	350	300	200	384	320	216
25	60	270	243	159	340	295	200	384	320	216
26	62	264	234	156	340	295	200	376	320	216
27	64	261	234	147	340	295	195	376	312	208
28	67	258	234	141	340	290	195	360	312	208
29	69	258	234	141	330	280	190	360	312	200
30	71	255	231	138	325	275	185	360	312	200
31	74	249	216	132	320	270	180	352	296	200
32	76	249	210	126	310	265	160	352	288	184
33	79	243	210	120	295	250	155	344	280	176
34	81	237	210	120	295	250	155	328	280	168
35	83	234	207	117	280	240	150	320	264	160
36	86	231	192	108	275	225	140	304	240	160
37	88	228	183	93	265	215	115	288	232	136
38	90	216	174	93	260	215	115	288	232	128
39	93	195	168	93	255	205	115	280	224	120
40	95	189	162	87	250	205	110	280	224	120
41	98	186	153	81	245	200	90	272	224	104
	\bar{x}	284	262	185	377	340	251	409	364	270

Tarifario UTE, enero 2022

Medianos consumidores

TARIFAS MEDIANOS CONSUMIDORES

Con carácter opcional para los servicios que presenten una potencia contratada mínima igual o mayor que 10 kW.

1. Cargos por consumo de energía, por potencia y cargo fijo:

Tarifa	Nivel de tensión kV	Precio de energía \$/kWh			Potencia máxima medida \$/kW		Cargo Fijo mensual \$
		Valle	Llano	Punta	Valle**	Punta-Llano	
MC1	0,230 - 0,400	2,225	4,897	11,141	-	380,1	705,9
MC2 *	6,4 - 15 - 22	2,158	4,491	7,565	12	297,0	784,4
MC3 *	31,5	2,145	4,479	6,745	10	191,6	784,4

* Opción tarifaria solo con potencia contratada máxima inferior a 250 kW.

** Este valor, en el caso de las tarifas MC2 y MC3, registrará a partir del 01/07/2022.

2. Períodos horarios.

Los cargos por energía se distribuyen en tres períodos horarios, durante todos los días que integran la factura mensual, de acuerdo al siguiente detalle.

- horas Punta: de 18:00 a 22:00 hrs.
- horas Llano: de 07:00 a 18:00 y de 22:00 a 24:00 hrs.
- horas Valle: de 00:00 a 07:00 hrs.

Tabla 2: análisis del consumo eléctrico promedio por estrategia, para determinar el costo anual de la potencia contratada

Tipo de cambio 1USD a 42\$U

Estrategia	Caudal (m ³ /h)	Potencia motobomba (Eb: 80 %, Em 85 %) kw/h	Consumo por riego (20 h de riego) Kw	Vol. agua bombeado ⁽¹⁾ (m ³ /año)	Horas totales riego	Costo potencia contratada 380,1 \$U				Costo anual contratado USD ⁽⁴⁾
						Potencia contratada (Kw) ⁽²⁾	Por mes USD	Meses de riego	Meses sin riego ⁽³⁾	
E3_10	122	29	585	230878	1896	35	9,05	5	7	2692
E3_50%	122	29	585	212465	1745	35	9,05	5	7	2692
E3_100%	122	29	585	150335	1235	35	9,05	5	7	2692
E5_10	203	49	975	306194	1509	55	9,05	5	7	4231
E5_50%	203	49	975	275901	1360	55	9,05	5	7	4231
E5_100%	203	49	975	203931	1005	55	9,05	5	7	4231
E8_10	325	78	1560	332150	1023	85	9,05	5	7	6539
E8_50%	325	78	1560	295245	909	85	9,05	5	7	6539
E8_100%	325	78	1560	219058	675	85	9,05	5	7	6539

⁽¹⁾ Corresponde a la lámina promedio anual corregida para una superficie de 69 ha y una eficiencia de aplicación de 85 % (pivot central)

⁽²⁾ Es mayor a la potencia de la moto bomba porque se considera la potencia pico requerida por el motor en el arranque.

⁽³⁾ Según el tipo de tarifa, en este caso los meses sin riego tienen un costo de la potencia contratada del 50 %

⁽⁴⁾ Se aplica la fórmula: costo anual contratado = PC x costo PC x 5 + PC x costo PC x 0,5 x 7

Tabla 3: análisis de costos eléctricos de riego, cargo fijo por mes, costos variables y costo del mm de riego aplicado
 Tipo de cambio 1USD a 42\$U

Estrategia	Cargo fijo (705,9 \$U)		Subtotal (fijo + contratado)	Distribución de horas de riego ⁽¹⁾		Costo eléctrico Variable			TOTAL (fijo + variable) USD	Costo por mm aplicado ⁽²⁾ USD
	Mensual	Anual		Valle (35 %)	Llano (65 %)	Valle USD/h	Llano USD/h	Total Costo variable USD		
E3_10	16,8	202	2894	664	1232	0,053	0,117	6260	9154	0,396
E3_50 %	16,8	202	2894	611	1134	0,053	0,117	5761	8655	0,407
E3_100 %	16,8	202	2894	432	803	0,053	0,117	4076	6970	0,464
E5_10	16,8	202	4433	528	981	0,053	0,117	7828	12260	0,400
E5_50 %	16,8	202	4433	476	884	0,053	0,117	7053	11486	0,416
E5_100 %	16,8	202	4433	352	653	0,053	0,117	5213	9646	0,473
E8_10	16,8	202	6740	358	665	0,053	0,117	8202	14942	0,450
E8_50 %	16,8	202	6740	318	591	0,053	0,117	7290	14031	0,475
E8_100 %	16,8	202	6740	236	439	0,053	0,117	5409	12149	0,555

⁽¹⁾El total de horas de riego figura en la tabla anterior. El tipo de tarifa utilizada (mediano consumidor) contempla una tercera franja horaria de mayor costo que no será utilizada, razón por la cual la jornada de riego máxima es de 20 h.

⁽²⁾Es el costo total dividido entre la superficie regada y la lámina media aplicada en cada estrategia.



Presupuestación de MAIZ 1ª - 2021-2022					
Siembra Directa sin renta					
Insumos	Precio	Presentación	Dosis/ha	Aplicaciones	Costo/ha
Semilla NK 897 Víptera 3 (65 mil plantas/ha)	209	80000,0	68000,0	1,0	177,7
Fertilizante 10-18-20+6S+2Ca+1Zn	737	1000,0	150,0	1,0	110,6
Surestar (Pre o Post Emergente)	113	10,0	3,0	1,0	33,9
Urea Verde + S	656	1000,0	125,0	2,0	163,9
Glifos.Sal Dimetil 480 (Barbecho y post emergente)	117	20,0	3,5	2,0	40,9
Glifos. Post emergente (sal amonica)	57	10,0	1,5	1,0	8,5
Coadyuvante siliconado	40	1,0	0,025	2,0	2,0
24-AD Amina ENLIST (Barbecho)	129	20,0	1,0	1,0	6,4
Total Insumos					544
Seguro (Granizo e Incendio + Resiembra)					12
Labores:					
Siembra neumática (+ 6 lts Gas Oil)	74			1	74,0
Herbicida (Pre y Post Emergente)	8			3	24,0
Fungicida	0			1	0,0
Aplicación de UREA	9			2	18,0
Cosecha (+ 15 lts de Gas Oil)	86			1	86,0
Total labores					202
Gastos Post Cosecha US\$/tt					
Flete a planta (30-35 km)	10,3		1	5	51,5
Gastos de planta (Entrada+Salida)	6		1	5	30,0
Secado (15-16 % Hum)	3,5		1	5	17,5
Asesoramiento técnico	2 % PB		20	1	20,0
Comisión venta de granos	1 % PB		10	1	10,0
Impuestos	0,6 % PB		6	1	6,0
Total Cos Pos cosecha					135
Renta					0,0
Sub Total Costos (US\$)					893
Imprevistos	5%				50
COSTO TOTAL (US\$/há)					943
Precio (US\$/ton)	200		200		200
Rinde - Ton/ha:	5		6		8
Producto Bruto US\$/ha:	1000		1200		1600
Margen Neto	57,2		240,0		605,0
Rend Equilibrio (ton/ha)	4,7		4,8		5,0
Precios Contado Agosto 2021	Relacion Lts Gas Oil/US\$				
Fuente : Equipo Técnico Sofoval	\$/lts Gas Oil	50,7			
	\$/US\$	43,7			
	US\$/lt	1,16			

SOFOVAL, DESDE COLONIA VALDENSE Y MIGUELETE, OPORTUNIDADES PARA COSECHAR RESULTADOS