

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DE DIFERENTES LÁMINAS DE RIEGO SOBRE ALGUNOS DE LOS
PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL RIEGO POR MELGAS

por

Maximiliano CORCOLL

Marcelo MALVASIO

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2020

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Pablo Morales

Ing. Agr. Roberto Martínez

Ing. Agr. Joaquin Grasso

Fecha: 11 de junio de 2020

Autores:

Maximiliano Corcoll

Marcelo Malvasio

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al apoyo recibido por el personal de campo del Establecimiento El Junco de la Empresa Donistar S.C..

A los Ingenieros Agrónomos Bernardo Böcking y Santiago Bandeira por estar siempre a disposición y por la ayuda brindada para la realización de este trabajo.

A nuestros compañeros y amigos Andrés Bourdin, Matías Franco Fraguas y Mauricio Burgos.

A nuestros tutores Mario García Petillo (In memoria) y Claudio García por hacer posible la realización de esta tesis.

A nuestras familias y amigos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. RIEGO EN EL MUNDO.....	3
2.2. EL RIEGO EN EL URUGUAY.....	4
2.3. LOS MÉTODOS DE RIEGO EN LA AGRICULTURA.....	6
2.3.1. <u>Riego por superficie o gravedad</u>	7
2.3.2. <u>Riego por melgas o fajas</u>	8
2.3.3. <u>Curvas de avance y de receso</u>	9
2.3.4. <u>Parámetros de riego</u>	10
2.3.4.1. Caudales.....	10
2.3.4.2. Tiempo de oportunidad.....	11
2.3.4.3. Uniformidad de distribución	12
2.3.4.4. Infiltración.....	12
2.4. NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS.....	14
2.5. PROGRAMACIÓN Y MANEJO DEL RIEGO.....	14
2.6. MODELOS DE SIMULACIÓN.....	16
2.7. EVALUACIÓN DEL RIEGO.....	17
2.8. EFICIENCIA DE APLICACIÓN.....	17
2.9. RESPUESTA AL RIEGO DE PASTURA SEMBRADA.....	17
2.10. HIPÓTESIS DEL TRABAJO.....	19
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	20
3.1. MARCO DEL ESTUDIO.....	20
3.1.1. <u>Sitio experimental</u>	20
3.1.2. <u>Suelo</u>	20
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS.....	21
3.3. MANEJO.....	22
3.3.1. <u>Manejo de la chacra</u>	22
3.3.2. <u>Manejo del riego</u>	22
3.4. DETERMINACIONES Y CÁLCULOS.....	23
3.4.1 <u>Determinaciones y cálculos del riego</u>	23
3.4.2 <u>Determinaciones de producción de pasturas</u>	24
3.5. SIMULACIÓN.....	25
3.6. MATERIALES UTILIZADOS.....	25

3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	26
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	27
4.1. DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO.....	27
4.2. APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS.....	29
4.3. EVALUACIÓN DE LA LÁMINA DE RIEGO.....	33
4.4. CORRELACIONES ENTRE VARIABLES DE RIEGO CALCULADAS Y SIMULADAS.....	37
5. <u>CONCLUSIONES</u>	39
6. <u>RESUMEN</u>	40
7. <u>SUMMARY</u>	41
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	42
9. <u>ANEXO</u>	48

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.		Página
1.	Resultados de la aplicación de láminas de riego sobre caudal, lámina aplicada y requerida y volumen total acumulado de cada evento de riego.....	30
2.	Resultados de la aplicación de láminas de riego sobre caudal, lámina aplicada y requerida y volumen acumulado promedio de cada tratamiento.....	31
3.	Parámetros de riego: eficiencia de aplicación, uniformidad de distribución y tiempo de oportunidad de tres riegos bajo los tratamientos de 20, 40 y 60 mm de evapotranspiración.....	34
Figura No.		
1.	Velocidad de infiltración (cm/h), tasa de infiltración (cm/h) e infiltración acumulada (cm) determinados en las parcelas de estudio.....	20
2.	Esquema del diseño experimental de bloques completos al azar.....	21
3.	Promedio mensual de precipitación acumulada (mm) y evapotranspiración (mm) en base a la ecuación de Penman-Monteith durante el período experimental comparado con la serie histórica.....	28
4.	Temperatura promedio diario (°C) durante el período experimental comparado con la serie histórica	29
5.	Producción de pasturas (kg MS/ha) al inicio y al final del experimento.....	32

6. Correlación entre la diferencia de lámina aplicada – lámina requerida y la uniformidad de distribución y la eficiencia de aplicación	33
7. Tiempo de avance y receso y tiempo de oportunidad de los riegos bajo los tratamientos de 20, 40 y 60 mm de evapotranspiración.....	36
8. Correlaciones simples entre eficiencia de aplicación calculada y simulada y uniformidad de distribución calculada y simulada con el Modelo WinSRFR de la base de datos de riegos del ensayo y con 8 eventos de riego	38

1. INTRODUCCIÓN

El rol del agua como elemento estabilizador es fundamental en los sistemas agropecuarios. Aquellos sistemas de producción que han incorporado al riego de forma sistemática han mejorado sustancialmente la productividad y han logrado estabilizar los niveles de producción. Estudios a nivel nacional han constatado un déficit hídrico acumulado entre los meses de octubre a marzo entre 180 y 240 mm (García Petillo, 2012). Dicha problemática se presenta en las praderas perennes sembradas durante las estaciones de primavera y verano, período en el cual la demanda atmosférica genera desbalances hídricos afectando la estabilidad de estas. El déficit hídrico estival, explica gran parte de la baja productividad de las especies forrajeras de origen templado que conforman mayoritariamente las praderas artificiales del país. La investigación nacional en riego suplementario de pasturas ha sido en general muy escasa y no ha presentado la continuidad y profundidad necesaria como para generar una respuesta al riego para producción de forraje. En el terreno aplicado, el riego como herramienta para dicha producción en sistemas agropecuarios es prácticamente inexistente, salvo algunas excepciones enmarcadas en situaciones particulares o específicas que carecen de significación en el ámbito general del país.

Estudios previos mencionan dos factores que podrían explicar los motivos por los cuales el uso del riego se ve limitado. Uno de ellos es el ya nombrado comportamiento climático de la región, el cual está caracterizado por variaciones importantes de difícil predicción, lo cual dificulta la planificación y desarrollo de estrategias para la aplicación del riego. Juntamente con la influencia directa del factor mencionado anteriormente, los costos económicos y financieros provenientes de obtener y manejar el agua con los fines propuestos, muestran resultados que usualmente generan cierta incertidumbre en el sector productivo, lo cual impide la adopción masiva de tecnologías de riego (Mas, 2004).

Una opción apropiada para regar en sistemas de producción extensivos es el método de riego por gravedad. Esto no implica que otros métodos de riego no se adapten a determinadas situaciones productivas, sin embargo, el riego por gravedad presenta costos más bajos por milímetros (mm) de agua aplicado y menores inversiones con respecto a las otras metodologías. Para que el riego por gravedad sea viable en forma masiva, se debe generar tecnología que permita adecuar el método de riego al sistema de preparación de suelos con siembra directa, actualmente dominante y con grandes ventajas en la conservación del suelo con relación al laboreo convencional. En este caso, se deben ajustar parámetros del método tales como: caudales, longitudes de melgas y pendientes para diferentes tipos de suelos.

El objetivo del presente trabajo fue la evaluación del efecto de la aplicación de distintas láminas de riego por superficie sobre los parámetros hidráulicos: eficiencia de aplicación, uniformidad de distribución; y sobre la producción de materia seca.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. RIEGO EN EL MUNDO

El método de riego de mayor importancia a nivel mundial es el riego por superficie, este corresponde al 80 % de las áreas regadas ya que es el más apropiado técnicamente para suelos llanos y pesados, también es el más viable económicamente para muchos cultivos y sistemas de producción. El más utilizado es el riego por canteros, en Estados Unidos el método que más se utiliza es el riego por surcos y el riego por melgas se reduce gradualmente, la nivelación por láser permite que los campos regados por melgas sean fácilmente manejados como canteros (Trout y Kincaid 2007, Pereira et al. 2010). A su vez muchos campos se han pasado al riego por aspersión y en la fruticultura al micro riego (Trout y Kincaid, 2007).

Durante las décadas recientes la agricultura bajo riego ha sido una fuente de producción de alimentos muy importante. Estudios realizados por Lathan (2002), afirman que los mayores rendimientos de los cultivos que pueden obtenerse en regadío son más del doble que los mayores que pueden obtenerse en secano. El control, con bastante precisión, de la absorción del agua por las raíces de las plantas tiene estas ventajas. Aun así, el regadío contribuye menos a la producción agrícola que el secano. Globalmente, la agricultura de secano se practica en el 83 % de las tierras cultivadas y produce más del 60 % de los alimentos del mundo. En regiones tropicales con escasez de agua, como los países de la región del Sahel, la agricultura de secano se practica en más del 95 por ciento de las tierras cultivadas, porque en estas zonas el riego convencional de cultivos para la producción de alimentos puede ser muy costosos y apenas justificable en términos económicos (Lathan, 2002).

Hay otras razones que justifican por qué el riego convencional no puede continuar creciendo tan rápidamente como en las últimas décadas. Los costos ambientales de las zonas regables convencionales son también altos y no repercuten en los precios de los alimentos, y a menudo el riego intensivo produce anegamiento y salinización, alrededor del 30 % de las tierras regadas están moderada o severamente afectadas. Anualmente, el área regada se está reduciendo aproximadamente en el 1-2 % a causa de la salinización de las tierras (Lathan, 2002). Según Clemmens (2000), muchos proyectos de riego en todo el mundo coinciden en que el rendimiento está muy por debajo de los niveles esperados. La agricultura bajo riego es un proceso que está influenciado por el clima, la mano de obra, el riego y otros factores prácticos, de disponibilidad y gestión de insumos (por ejemplo, semillas, fertilizantes, agua, etc.). En áreas irrigadas, la disponibilidad de agua, distribución y aplicación, son a menudo los principales factores limitantes para la producción. Además, estos

factores son con frecuencia una mezcla de problemas técnicos, sociales y políticos que se pueden dividir en dos subsistemas o componentes; los asociados con el sistema hortícola y aquellos asociados con el apoyo al sistema agrícola como, por ejemplo: proyectos de riego, cooperativas, disponibilidad de crédito agrícola, etc. (Clemmens, 2000).

2.2. EL RIEGO EN EL URUGUAY

El potencial de los sistemas de producción agropecuarios en Uruguay es altamente dependiente del régimen de precipitaciones y su variabilidad. Durante el verano y en condiciones promedio, el contenido de agua de los suelos no satisface la demanda hídrica de los cultivos y las pasturas. De esta forma se verifican frecuentemente impactos negativos en la producción de forrajes anuales y perennes (Sawchik et al., 2010). Siendo que la capacidad de almacenaje de los suelos oscila entre 60-180 mm de agua disponible (Molfino y Califra, 2001), esto representa en el mejor de los casos el 50% del aporte para la persistencia y/o producción de materia seca en cantidad y calidad de algunas forrajeras utilizadas en los sistemas de producción nacionales (Sawchik et al., 2010). Por tanto, se puede decir que existe una alta dependencia de la recarga hídrica por precipitaciones y/o riego para satisfacer las demandas de cultivos y pasturas (Sawchik, 2012). Los déficits hídricos que se manifiestan en el período estival se ven magnificados en suelos de basalto, por un lado, por la gran variación de profundidad que presentan y por otro por su textura pesada o arcillosa en los suelos profundos, que determina una mayor retención del agua en el suelo a tensiones no disponibles para las plantas (Pérez, 2004).

La temperatura media anual sobre Uruguay es de 17,7 °C, variando desde 19,8 °C en la zona Noroeste (Bella Unión), hasta 16,6 °C en la costa Sur del país. Las temperaturas medias más altas se presentan en los meses de enero y febrero y las más bajas en junio y julio, de acuerdo con la región. Los promedios nacionales de las temperaturas extremas anuales del aire se caracterizan por una temperatura máxima media de 22,6 °C y una mínima media de 12,9 °C. Los valores medios de precipitación acumulada anual sobre el país se sitúan entre 1.200 y 1.600 milímetros, presentando una gran variabilidad interanual. Esta variabilidad se constata en todos los meses del año aproximadamente en la misma magnitud, registrándose en los años extremos valores mínimos inferiores a 20 mm/mes y máximos superiores en todos los meses a los 250 mm/mes. Se registran precipitaciones medias mensuales entre 60 mm/mes (litoral Oeste en invierno) y 140 mm/mes (Noroeste en abril y octubre). Considerando los valores acumulados de la lluvia a través del año, no existe ni una estación seca ni una estación lluviosa definida (Castaño et al., 2011).

La producción forrajera anual es muy variable entre los años, debido a las variaciones de los regímenes hídricos (Berretta y Bemhaja, 1998). A su vez existe una importante variación mensual de la producción forrajera, con los mínimos de producción en invierno, consecuencia de las menores temperaturas y bajos niveles de radiación, y los máximos en primavera. En los meses de verano es posible alcanzar importantes niveles de producción de forraje si los regímenes hídricos superan a la evapotranspiración, mientras que, en condiciones de sequía extrema, dicha producción puede ser muy baja o nula (Pérez, 2004).

El riego suplementario aplicado a especies forrajeras debe ser considerado como una herramienta tecnológica, no sólo para atenuar las faltas de lluvias en períodos breves, pero críticos en cuanto a sus efectos sobre la estabilidad, sino también como un elemento de planificación e incorporación al área total en producción, ya que permite dar estabilidad e incrementar la productividad del sistema (Pérez, 2004). Según Tarjuelo (2005), el objetivo del riego es suministrar a los cultivos y pasturas, de forma eficiente y sin alterar la fertilidad del suelo, el agua adicional a la precipitación que necesitan para su crecimiento óptimo y cubrir las necesidades de lavado de sales, en caso de que se requiera, de forma que evite su acumulación en el perfil del suelo, asegurando la sostenibilidad del regadío. Hansen (1962), define al riego como *“la aplicación artificial de agua al terreno, con el fin de suministrar a las especies vegetativas la humedad necesaria para su desarrollo”*. Nugteren (1970), amplía dicha definición al considerar que el riego comprende *“las provisiones, medidas o actividades, de naturaleza temporaria o permanente, con el propósito de suministrar agua, en algunos casos juntamente con otras materias, al suelo y por consiguiente a la planta, con el fin de mantener o promover su crecimiento”*.

La facilidad de llevar a cabo las obras y prácticas de riego necesarias depende del/los lapsos en que el mismo se extienda y de su significación económica y social. A tal fin se distingue entre el riego integral, complementario y suplementario. Se considera riego integral cuando el período y la magnitud del déficit es significativo, y el aporte de la lluvia al proceso evapotranspiratorio es de escasa magnitud, de manera que puede despreciarse. Este es el caso de los sistemas de riego en las zonas áridas. Se considera riego complementario cuando el aporte de la lluvia al proceso evapotranspiratorio durante un lapso ininterrumpido resulta significativo (mayor del 30% y menor del 60% de la evapotranspiración). En este caso lo importante no es la distribución, sino la cantidad de la precipitación. Se trata, por lo tanto, de un recurso que debe ser aprovechado para disminuir así la necesidad de riego. Se considera riego suplementario cuando la lluvia representa la casi totalidad de la evapotranspiración, pudiendo incluso superarla en algún punto del ciclo. Sin embargo, una distribución irregular a lo largo del ciclo del cultivo hace que se

presenten lapsos breves, de una a tres semanas, de escasa o nula precipitación que afecten a la producción con las consiguientes consecuencias desde el punto de vista económico en los que se hace necesario regar. Regar implica aportes de agua adicionales a los que resultan de la lluvia y de las inundaciones a una superficie determinada. Tomando estos conceptos citados por Morábito et al. (2008), como base se puede decir que el riego suplementario es el que mejor se adapta a las condiciones de Uruguay y particularmente a las condiciones del presente ensayo.

La utilización del riego de forma estratégica puede contribuir a una mayor estabilidad de la producción y persistencia de los mejoramientos, dependiendo su adopción, de la relación costo-beneficio que implique la realización de esta. La magnitud de las inversiones, así como la probabilidad de retorno inmediato de dichas inversiones en los mejoramientos de campo, han determinado su importancia en la región, mientras que la utilización del riego en pasturas prácticamente no ha tenido desarrollo. Sin embargo, existe algún interés o emprendimiento asociado a algunos sistemas de producción arroceros y concretamente a la rotación arroz-pasturas, puesto que estos sistemas ya cuentan con la infraestructura y la tecnología que esta práctica requiere (Pérez, 2004).

2.3. LOS MÉTODOS DE RIEGO EN LA AGRICULTURA

Cuando se planifica la introducción del riego en un sistema de producción, la elección del método a utilizar es una decisión crucial, que puede significar por sí misma el éxito o el fracaso futuro del emprendimiento. En el Uruguay, este tipo de decisiones se suele tomar sin tener toda la información objetiva necesaria para poder optar por la mejor alternativa. No existe el mejor método de riego, sino que existe un método de riego que es el más apropiado para una situación particular dada. El análisis de cada situación debe tomar en consideración aspectos relativos a: el suelo, la topografía, la fuente de agua, el cultivo, la mano de obra, la energía y el productor (García, 2010).

Se entiende por método de riego al conjunto de aspectos que determinan el modo de aplicar el agua a las parcelas regadas, y se entiende por sistemas de riego al conjunto de equipamientos y técnicas que proporcionan esa aplicación siguiendo un método dado. El término "sistemas de riego" es también utilizado para referirse al conjunto de equipamientos y técnicas de gestión que aseguran la captación del agua, su almacenamiento, transporte y distribución a los regantes (García, 2012). Según Paananen y Trout (1999), los métodos de riego pueden clasificarse del siguiente modo: riego por superficie o por gravedad, riego por aspersión, riego localizado o micro riego y riego

subterráneo. A continuación, se detallará el riego por superficie en el cual está enfocado el presente trabajo.

2.3.1. Riego por superficie o gravedad

Este método de riego se usa en más del 85% de las tierras regadías del mundo (± 300 millones ha), en todo tipo de cultivos y en la mayoría de los suelos y de las condiciones topográficas. El 15% restante se divide en 10% para aspersión y el resto para riego por goteo (Morábito et al., 2008). En línea con estos autores, Pereira et al. (2010), sostienen que este método corresponde al 80% de las áreas regadas en el mundo, además de que continúa siendo el método más apropiado técnicamente para suelos llanos y pesados, y, económicamente viable para muchos cultivos y sistemas de producción.

Es el método por el cual el agua se aplica sobre la superficie del suelo de la parcela a regar para luego infiltrarse hasta alcanzar las raíces del cultivo. En riego por superficie, el agua fluye sobre el terreno en láminas por cauces de diferente ancho y forma, y, por lo tanto, con diferente área efectiva para la infiltración. Este tipo de riego es particularmente apropiado cuando se cuenta con: buena disponibilidad de agua, pendientes uniformes (comprendidas entre el 0% y 1%), suelos profundos, de texturas medias a finas y cultivos de raíz profunda. Las principales ventajas de estos métodos son: costos de inversión, de operación y mantenimiento medios y bajos requerimientos de energía. Las desventajas son, en general, grandes pérdidas de agua, disminución del espacio cultivable, necesidad de una adecuada nivelación del terreno y alto requerimiento de mano de obra especializada (Morábito et al., 2008). Por otra parte, este método ha continuado siendo objeto de investigación para la mejora de los procesos y prácticas de riego. Se han desarrollado métodos de evaluación para permitir la obtención de indicadores de funcionamiento de los sistemas y, sobre todo, para fundamentar los cambios a introducir para mejorar el uso y la productividad del agua en los regadíos (Pereira et al., 2010). Según Paananen y Trout (1999), el riego por superficie es el que mejor se adapta cuando se dan los siguientes factores: bajo precio del agua, abundante disponibilidad de agua sin importar mayormente su calidad, baja a media velocidad de infiltración del suelo, alta capacidad de almacenamiento de agua del suelo, topografía plana y uniforme, cultivos de bajo valor y poco sensibles al déficit hídrico, bajo valor de la mano de obra, alto valor de la energía, baja disponibilidad de capital y limitada exigencia en tecnología. Con condiciones climáticas como las que se presentan en Uruguay, un mismo cultivo requiere un 40 % más del volumen total de agua de riego neto si se riega por goteo que si se regara por un método “tradicional” (riego por superficie). La mayor necesidad de riego se debe a un menor aprovechamiento del agua de lluvia. Se afirma, además, que aun regando con un método de riego con eficiencia de aplicación

menor a la del goteo, el volumen bruto total aún seguiría siendo menor (García, 2012). Existen varios sistemas de riego por gravedad en el mundo, pero los tres más usados son: por surcos, canteros y melgas (Pereira et al., 2010).

2.3.2. Riego por melgas o fajas

En el riego por melgas el agua avanza por una faja de terreno de varios metros de ancho, limitada por bordos. El campo se divide en melgas, o sea en parcelas rectangulares estrechas y largas, la pendiente es suave, lo que permite que el agua aplicada se escurra a lo largo de su recorrido al mismo tiempo que se va infiltrando (García, 2012).

Este método es idóneo para regar superficies chicas medianas y grandes y se adapta tanto a cultivos en línea como cultivos densos (pasturas y cultivos de verano en siembras directa). Se adapta bien a terrenos de pendientes suaves menor o igual al 0,5% y con una infiltración media a baja, altas tasas de aplicación de agua, de forma que permita melgas largas, de 100 a 200 m, las que son más prácticas en el campo. La pendiente puede ser mayor si la infiltración es moderadamente alta y en cultivos densos, pero para el establecimiento de nuevos cultivos en melgas empinadas es dificultoso porque el agua fluye rápidamente y puede causar erosión y canaletas, además de no dispersarse el flujo de forma pareja. El ancho de las melgas es limitado por pendientes transversales y por el caudal disponible. La diferencia de nivel entre ambos lados debe ser menor a 30% de la altura de la lámina de escurrimiento para que el agua se esparza bien a través de la faja. También es limitado por la pendiente transversal del campo o por la cantidad de movimiento de tierra requerido para eliminar la pendiente transversal. Es importante que el ancho de las melgas sea múltiplo del ancho de la maquinaria de laboreo o cosecha para que las operaciones de campo sean más eficientes. Típicamente las anchuras varían de 5 a 60 metros. La longitud de las melgas depende de la capacidad de infiltración del suelo, de la pendiente y del caudal disponible (Pereira et al., 2010), debido a que afecta el tiempo de avance y así como el tiempo de corte del riego. Las melgas largas requieren un mayor tiempo de riego y una aplicación de riego más grande. Las melgas con más de 400 m de longitud se usan donde la tasa de infiltración es moderadamente baja y la lámina de riego deseada es grande.

El riego por melgas ideal es aquel que la curva de recesión es paralela a la curva de avance teniendo igual tiempo de oportunidad a lo largo de toda la melga. Si la infiltración o la rugosidad cambian, el caudal debe cambiar para mantener ese balance, sin embargo, los regantes a menudo no cambian la tasa de aplicación excepto que se cambie el número de melgas que se está regando simultáneamente. En el riego por melgas, como el riego por canteros, requiere gran caudal por unidad de ancho para que el agua avance rápidamente campo

abajo. Esto a menudo requiere que el corte de entrada de agua y aún la recesión en la parte más alta del campo ocurran antes de completarse el avance en el final de la melga.

Una forma práctica para cortar el riego en la melga es cuando el agua ha recorrido gran porcentaje de esta por ejemplo 80 a 90% de la longitud. El extremo final de las melgas aguas abajo puede estar cerrado o abierto. El riego por melgas es difícil de manejar debido a que la distribución del agua es sensible al suelo, a las características del cultivo y al caudal. En EE. UU. el uso del riego por melgas se reduce gradualmente, la nivelación por láser permite que los campos regados por melgas sean fácilmente manejados como canteros (Trout y Kincaid, 2007).

Según García (2012) entre sus ventajas destaca el bajo costo de inversión y bajo costo operativo, sin embargo, un mal diseño puede repercutir en una mala eficiencia en el uso del agua y un elevado uso de mano de obra.

2.3.3. Curvas de avance y de receso

En el riego por melgas se distinguen las siguientes fases (Fernández Gómez et al., 2010):

- 1) Tiempo de avance es el tiempo, medido desde que comienza el riego, que el agua tarda en llegar a todos y cada uno de los puntos de la parcela. Es muy variable dependiendo del manejo que se haga del riego.
- 2) Tiempo de receso, medido desde el inicio del riego, es el tiempo en que todo el agua desaparece de la superficie del suelo.

La velocidad de avance del frente de agua sobre la superficie del suelo depende, principalmente, del tiempo, caudal unitario, pendiente, velocidad de infiltración del suelo (textura y estructura del suelo), rugosidad o aspereza de la superficie por la que circula el agua (n de Manning) y geometría del surco o melga. Se representa mediante la ecuación:

$$x(m)=p*t (min)^r$$

donde;

x: distancia alcanzada por el frente del agua a tiempo (metros)

t: tiempo de avance (minutos)

p: coeficiente empírico que representa la distancia que avanza el frente de agua en el primer minuto

r: exponente empírico cuyo valor es menor que 1

Foroud et al. (1995), obtienen como resultados de ensayos a campo, variaciones en las tasas de avance significativas entre parcelas. El ritmo de avance por flujo de entrada constante está influenciado principalmente por propiedades de infiltración y humedad inicial del suelo. Por lo tanto, hay que ajustar una curva de avance a cada parcela. En contraposición la tasa de recesión fue similar para todas las parcelas y una sola curva se ajusta a los datos de velocidad de las 9 parcelas o melgas evaluadas. La velocidad de infiltración necesaria para el diseño de sistemas de riego se determina convencionalmente por pruebas a campo, o por anillos de infiltración (o infiltrómetros).

En melgas largas o con suelos de elevada infiltración, o con la superficie irregular y/o con caudales pequeños, la fase de avance se alarga, tanto que, en los sistemas tradicionales, el corte de la entrada de agua coincide con el fin del avance. En estas condiciones de tiempo de avance alargado, el tiempo de oportunidad de infiltración, T (tiempo comprendido entre el avance y el receso, durante el que existe una lámina de agua sobre la superficie del suelo), será muy diferente a largo de la melga, siendo mucho mayor en la parte inicial que en la del extremo aguas abajo, resultando una curva de infiltración (z) no uniforme, con mucha mayor infiltración al inicio que en el extremo (Pereira et al., 2010). En el caso de que fueran cortos, o con pendientes exagerada, también proporcionan un riego poco uniforme, pero, ahora, con mayor cantidad de agua infiltrada en el extremo aguas abajo que al inicio. Por este motivo, los modernos sistemas de canteros utilizan nivelación de precisión, con pendiente nula y con caudales elevados para producir un avance rápido y mejor equilibrados de tiempos de oportunidad de infiltración (T) y de alturas infiltradas (z).

2.3.4. Parámetros de riego

2.3.4.1. Caudales

Se define caudal como el volumen de agua que atraviesa una superficie en un tiempo determinado, $Q = V/t$, donde Q = caudal, V = volumen y t = tiempo.

Los caudales para utilizar deben permitir el avance normal del agua; generalmente, se recomiendan caudales mayores a 2 l/s por metro de ancho, preferiblemente mayor a 4 l/s por metro, fáciles de implementar en los sistemas modernos. Es posible reducir los tiempos de avance y aplicar cantidades de

agua controladas, además de que esta se distribuye más uniformemente a lo largo de la parcela bien nivelada, asegurando, también, mejores eficiencias. Los caudales aplicados en riego por melgas deben permitir que le agua avance lentamente para irse infiltrando y, por tanto, se va esparciendo uniformemente en todo lo ancho de la melga; pero, escurriendo en forma de lámina sobre la superficie del suelo debe ser capaz de vencer el rozamiento provocado por el suelo y las plantas que en el crecen. Además de eso, los caudales no deben ser erosivos, sobre todo cuando el riego se hace en suelo desnudo. Al ser los caudales relativamente elevados, y las melgas abiertas en el extremo, los caudales drenados son relativamente importantes, lo que los obliga a la existencia de una red de drenaje superficial, y aconseja la reutilización de los caudales de retorno.

Como alternativa, las melgas pueden ser cerradas aguas abajo; pero en este caso, requieren que el corte de alimentación se efectúe con precisión, de forma que se evite el encharcamiento excesivo aguas abajo. El ancho de las melgas puede que dependa del cultivo. En viñas y frutales, las melgas tienen anchos correspondientes a la distancia entre las líneas de plantas. En el caso del riego de cereales, forrajes y praderas, este parámetro varía entre 5 y 60 m, dependiendo de los caudales disponibles y de la pendiente transversal. La diferencia de nivel entre ambos lados debe ser menor a 30% de la altura de la lámina de escurrimiento para que el agua se esparza bien a través de la melga. La pendiente transversal está limitada por los costes de nivelación. Consideradas estas restricciones, la anchura de las melgas debe ser un múltiplo de la anchura de trabajos de los aperos y maquinaria más importantes en el sistema de cultivo utilizado. La longitud de las melgas, como la de los surcos, depende de la capacidad de infiltración del suelo, de la pendiente y del caudal disponible. Los caudales demasiado fuertes, la baja infiltración, o las longitudes demasiado cortas, dan lugar a avances muy rápidos, con escurrimiento también rápido en la fase de llenado, con el consiguiente exceso de infiltración aguas abajo y, sobre todo, fuerte escorrentía en el extremo aguas abajo. De ahí, la necesidad de realizar nivelaciones de precisión y de ajustar los caudales a la longitud y a la capacidad de infiltración (Pereira et al., 2010).

2.3.4.2. Tiempo de oportunidad

Es el tiempo que tiene el agua de infiltrarse en el suelo. Es la diferencia entre el tiempo de receso y el tiempo de avance (Villalobos, 2005).

Tiempo de oportunidad = T. de recesión – T. de avance

En el caso de un tiempo de avance alargado, el tiempo de oportunidad de infiltración, τ (tiempo comprendido entre el avance y el retroceso, durante el que existe una lámina de agua sobre la superficie del suelo), será muy diferente

a largo de la melga, siendo mucho mayor en la parte inicial que en la del extremo aguas abajo, resultando una curva de infiltración (z) no uniforme, con mucha mayor infiltración al inicio que en el extremo (Pereira et al., 2010).

2.3.4.3. Uniformidad de distribución

Este parámetro se calcula para el cuarto inferior de la melga ya que es la zona más distante de la fuente de ingreso de agua y por ende la que presenta mayores problemas para lograr buenos niveles de uniformidad del riego.

La uniformidad de rendimiento del cultivo, cuando el agua es el único factor limitante, depende de la uniformidad del agua disponible en la zona radicular. Ésta es condicionada por los efectos de los riegos acumulados recibidos, la intercepción del agua por la canopia y su redistribución, la dinámica del agua en el suelo y del desarrollo del sistema radicular del cultivo. Para obtener la lámina bruta de aplicación para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo, debería considerarse la uniformidad de agua del suelo más que la uniformidad de aplicación de eventos individuales de riego. Una buena aproximación a la uniformidad de agua del suelo es el valor correspondiente al conjunto de eventos de riego, al menos cuando el intervalo entre riegos es menor que tres o cuatro días (López-Mata et al., 2010).

2.3.4.4. Infiltración

La infiltración es quizás el proceso más crucial, afectando la uniformidad y la eficiencia del riego por superficie, así como el mecanismo de transferencia y distribución del agua desde la superficie al perfil del suelo. La infiltración también afecta a los procesos de avance y recesión, así como es importante en la estimación de la aplicación de agua óptima que se debe hacer a la parcela (Walker et al., 2006). La infiltración instantánea definida como velocidad de penetración del agua en suelo no saturado, desde la superficie del suelo (Kostiakov, 1932) es un parámetro muy importante vinculado al riego. Se utiliza tanto para el diseño como para la evaluación de los métodos de riego. Los parámetros de la velocidad de infiltración están vinculados a la textura y a la estructura del suelo y permiten caracterizarlo. El fenómeno ha sido descrito por distintos autores (Hansen 1962, Roscher 1985) y hay varios modelos que intentan representarlo. No obstante, la metodología más difundida y fácil de implementar, a pesar de sus limitaciones, es la del infiltrómetro de doble anillo, que permite aproximar (a campo) el valor de infiltración básica del suelo y con ello obtener los valores de los parámetros de los otros modelos conocidos (Morábito et al., 2008).

La infiltración del agua en el suelo constituye un proceso de directo interés en riego y drenaje. Puede decirse que la infiltración es unidimensional en riego por aspersión y por melgas, bidimensional en riego por surco, tridimensional en riego por goteo. Cada uno de tales métodos de aplicación de agua define un patrón de humedecimiento que se aproxima a la distribución de las raíces del cultivo (Morábito et al., 2008). La intensidad de aplicación de agua puede ser superior a lo que el suelo permite: capacidad de infiltración o infiltrabilidad o, contrariamente, inferior a la misma. La capacidad del suelo para recibir el agua define el tiempo de infiltración en sí; además, tiene directa relación con las pérdidas de agua por escurrimiento y percolación. La velocidad de infiltración, o su sinónimo, la velocidad de entrada al suelo, se puede definir como la velocidad de penetración del agua en el perfil del suelo, cuando la superficie del terreno está cubierta por una capa de agua de reducido espesor. La infiltración tiene dimensión de velocidad (LT), como la lámina de agua (L) admitida por el suelo en una unidad de tiempo (T) o, como la cantidad de agua absorbida por la unidad de superficie del terreno en la unidad de tiempo (L³T⁻¹ L⁻³). Cuando se administra agua a un área de terreno, con el fin de restituir el contenido de agua al suelo, puede ocurrir que la cantidad absorbida aumente con el tiempo menos que proporcionalmente.

El proceso de infiltración depende de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Walker et al., 2006). Como ya se mencionó en otro capítulo, la tasa de infiltración del suelo es el factor más importante en la relación entre el caudal y la performance del riego (Trout y Kincaid, 2007). Linderman y Stegman, citados por Clemmens (1981), discuten el efecto de la magnitud de la infiltración acumulada en la eficiencia de aplicación. Ellos sugieren que la máxima eficiencia alcanzada no es muy diferente para diferentes magnitudes de infiltración, pero esa máxima eficiencia ocurre a caudales bastantes diferentes. Según Elliot y Walker (1982), para mejorar la eficiencia en el caso del riego por surcos, la tasa de infiltración debe ser una función predecible de las propiedades del suelo, de la descarga del surco y de la historia del cultivo. En suelos con gran infiltración, el agua tiende a infiltrarse al principio del cantero, resultando esta zona sobre regada, mientras que la del extremo opuesto se queda sub-humedecida. Para conseguir un buen funcionamiento en el riego por melgas (para que la infiltración sea uniforme a lo largo y ancho), es necesario que el agua avance suficientemente rápido. Puede ser necesario regar con caudales diferentes, mayores cuando la vegetación crece y aumenta la rugosidad y el rozamiento con la superficie. De lo contrario, al disminuir la velocidad, la infiltración al inicio aumenta perjudicando la uniformidad y la infiltración que ocurre aguas abajo, en el extremo opuesto (Pereira et al., 2010).

2.4. NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS

La necesidad de agua de los cultivos es la cantidad de agua que se requiere para satisfacer la tasa de evapotranspiración, de modo que los cultivos puedan prosperar. Uno de los aspectos básicos para tener en cuenta para la realización del riego es el desarrollo del cultivo. Básicamente, éste presenta ciertos momentos en el cual se vuelve más exigente. Una deficiencia de agua en alguno de estos momentos trae como consecuencia daños en el cultivo y posterior merma de rendimientos. Además, influye en la disponibilidad y absorción de nutrientes, así como en la prevención de plagas y malezas en el cultivo. La evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua que se pierde en la atmósfera a través de la planta, así como de la superficie del suelo. Por lo tanto, con el fin de estimar las necesidades de agua, primero se debe medir la tasa de evapotranspiración ETo (Sawchik, 2012). En cuanto a las variables climáticas se pueden mencionar, la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y velocidad del viento; teniendo un orden de mayor a menor influencia sobre los valores de la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ETo son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ETo está determinado en principio por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de éste, lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua por la inhibición de la respiración. La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de ETo. Por lo tanto, mientras ETo representa un indicador de la demanda climática, el valor de Kc varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas (Allen et al., 2006).

Según Roel (1999), la cantidad de agua requerida por un cultivo depende de la capacidad de almacenamiento del suelo. Esto varía en función de algunos factores como el tipo de suelo, manejo del agua de riego y precipitaciones durante el período de riego, ya que el agua que recibe el cultivo es aportada tanto por el riego como de las lluvias que en Uruguay se caracterizan por ser muy irregulares, motivo por el cual el riego adquiere relevancia.

2.5. PROGRAMACIÓN Y MANEJO DEL RIEGO

Tal como lo menciona Clemmens (1981), el manejo programado del riego es uno de los factores más importantes para la mejora en la eficiencia de

este. Al mismo tiempo, el manejo inadecuado puede generar algunos problemas tales como; diferencias importantes entre el rendimiento potencial esperado bajo riego y el real (tanto entre chacras como dentro de la misma); alta variabilidad espacial del rendimiento esperado (mayor variabilidad evidenciada bajo riego que en seco).

La utilización del riego como medida para mejorar los rendimientos en suelos agrícolas marginales ha ocasionado respuestas económicas por debajo de lo esperado y el aumento de problemas de erosión. También se perciben errores en la gestión y en la planificación del riego, los mismos pueden ser debido a desajustes en la toma de decisiones de la cantidad y el momento de aplicación del mismo, ya sea por carencia de datos correctos durante la evolución del cultivo, o carencia de herramientas apropiadas para esta gestión. Por otra parte, la decisión de implementar un sistema de riego conlleva a un aumento de los costos operativos (electricidad o combustibles) del riego. Y la gran escala de algunas explotaciones con riego requiere de la reducción del tiempo y costo entre la toma y el procesamiento de los datos del cultivo y del suelo, por lo cual contar con herramientas para programar el manejo del riego permitirían optimizarlo (Otero et al., 2015).

Hay ciertos factores que deben ser tenidos en cuenta ya que inciden directamente en la mejora de la eficiencia de aplicación del riego para lograr el éxito en los cultivos bajo riego, se deben tener en cuenta otros factores dentro del sistema de riego tales como, el tipo de suelo, el clima, el tipo de cultivo y el método de riego (Clemmens, 1981). Al mismo tiempo, deben implementarse medidas de control de la operación de riego asociadas a la programación, teniendo en cuenta la evapotranspiración, las precipitaciones, la necesidad de agua de los cultivos en función de la fenología, el control del caudal, velocidad de avance y receso, tiempo de oportunidad, entre otros. Para la programación diaria del riego se consideran diferentes métodos: balance hídrico, indicadores de suelo, indicadores de planta. El más práctico es el método de balance hídrico. Para ello se debe conocer los parámetros del suelo ya expuestos, los registros diarios de precipitación y la evapotranspiración diaria del cultivo (utilizando los valores de K_c). Se puede corregir además este balance con medidas ocasionales de agua en el suelo (Sawchik, 2000a).

Pereira et al. (2010), toman como ejemplo dos casos estudiados, uno de riego de maíz en suelos ligeros, recurriendo a tensiómetros para identificar la oportunidad del riego, y otro también de riego en maíz en suelos pesados, recurriendo a mediciones mediante el sistema de sonda de neutrones. Los tensiómetros demostraron ser adecuados para la programación del riego en suelos ligeros y riego frecuente. Son por eso también apropiados para conducir el riego en frutales por aspersión o micro riego, también mencionan como

alternativa otros instrumentos cuya respuesta es rápida y eficaz para riego poco frecuentes, como es el caso de los bloques de yeso o de los modelos sensores dieléctricos del suelo. En el caso de un suelo pesado, con elevada capacidad útil de almacenamiento de agua, los intervalos entre riegos pueden ser grandes, como cuando se utiliza el riego por superficie y se aplican grandes láminas, las mediciones de los contenidos de agua con sonda de neutrones parece ser una herramienta que permite una programación eficaz del riego, no obstante, no existen o son raras las entidades que prestan este tipo de servicios a los agricultores.

2.6. MODELOS DE SIMULACIÓN

Los modelos de simulación tienen numerosas opciones de configuración como son: pendiente, sección transversal, geometría, rugosidad, características de infiltración y tasa de caudal de entrada (Bautista et al., 2009). La investigación en el desarrollo de modelos de simulación de riego por superficie es amplia siendo numerosos los autores que han investigado al respecto realizando experimentos a nivel de campo (Walker y Skogerboe, citados por Pereira et al., 2010).

Se trata de un software moderno para el análisis de sistemas de riego por superficie el cual se caracteriza por tener como funciones el análisis de eventos, análisis de operación, diseño físico y simulación (Bautista et al., 2009). Además, se es de uso sencillo y es un software libre. Las funciones y organización de WinSRFR están apoyadas en el típico proceso analítico asesorando y mejorando la performance de sistemas de riego por superficie (Bautista et al., 2009). El programa posee tres evaluaciones:

- post-riego un balance del volumen basado en una medida de infiltración del perfil que requiere de datos de penetración, retención de agua según características del suelo y estimaciones de contenido de agua del perfil;
- un balance de volumen post-riego que se basa en medidas de avance y receso, y;
- una fase de avance de volumen de agua basada en el método de dos puntos de Elliott y Walker (1982).

El software permite analizar el rendimiento del riego, eventos y parámetros de infiltración promedio a campo, estimación basada en datos de campos medidos, diseño y formulación de alternativas operativas y estudio de simulación utilizando una conducta unidimensional de modelo de flujo. Se trata de una herramienta práctica pero también puede ser útil como base para futuras técnicas de análisis para el riego por superficie y desarrollo de modelos hidráulicos (Bautista et al., 2009). El primer paso en el proceso analítico

consiste en evaluar el rendimiento de los datos medidos o recabados en el campo. Esto se realiza mediante el módulo de análisis que resume, gráfica y analiza los datos recabados del campo.

2.7. EVALUACIÓN DEL RIEGO

La evaluación del riego por superficie es fundamental para poder recurrir a cambios en las prácticas de riego que mejoren el funcionamiento de los sistemas de aplicación del agua a la parcela. Permite estimar indicadores que caracterizan el riego en cada zona, para, así, identificar posibles medidas a tomar para su mejora y para obtener los valores de los parámetros de los modelos de simulación a utilizar en la búsqueda de nuevas soluciones, o en el proyecto de los nuevos sistemas (Pereira et al., 2010). Los procedimientos de evaluación de Merriam y Keller (1978), incluyen las siguientes medidas: caudales y volúmenes aplicados, y en los casos de los surcos y melgas, abiertos aguas abajo, los caudales y volúmenes de escorrentía, lo que permite efectuar el balance de volumen. Además, según Walker y Skogerboe (1987), Clemmens et al. (2001), en surcos y melgas, es conveniente medir el calado del flujo entrante en las secciones hidráulicas de inicio. Para tal objetivo, se utilizan medidores portátiles de caudal o aforadores portátiles colocados en las secciones de entrada, de salida y en los tercios cuartos de la longitud total

2.8. EFICIENCIA DE APLICACIÓN

En general, cuando se aplica un riego, no toda el agua queda almacenada en la zona del suelo explorada por las raíces, sino que parte se pierde por evaporación, escorrentía y percolación profunda, siendo muy diferente la cuantía de cada tipo de pérdida según el tipo de suelo y sistema de riego empleado. En consecuencia, la falta de uniformidad puede afectar al rendimiento de la cosecha y a la eficiencia en el uso del agua (López-Mata et al., 2010).

García (2012), define a la eficiencia de aplicación como la relación entre la lámina de agua que queda almacenada en el suelo y que está disponible para el cultivo y la lámina total aplicada en el riego.

2.9. RESPUESTA AL RIEGO DE PASTURA SEMBRADA

La investigación en riego en Uruguay para cultivos extensivos se desarrolló principalmente en las décadas de los 70 y 80, de todas maneras, es de destacar que la misma para el área agrícola – ganadera tradicional es escasa. Pritsch, Hofstadter y Gonnet en el período de 1974 a 1976 fueron los primeros en intentar obtener estudios preliminares buscando generar información de una especie de leguminosa forrajera, trébol rojo (*Trifolium*

pratense L.) sobre su respuesta forrajera y producción de semilla, así como su comportamiento a las condiciones con riego. Pritsch et al. (1976), ya hacían menciones sobre las buenas condiciones del país para realizar el cultivo de importancia agronómica como el maíz con riego y la necesidad de realizar éste en rotaciones con pasturas en un sistema también bajo riego. Además, se llevaron a cabo experimentos con el fin de obtener y seleccionar niveles de riego óptimos para diferentes especies forrajeras como el de Hofstadter, citado por Cardelino et al. (1982), Sawchik y Formoso (2000b). Los estudios científicos para este tema en la región Litoral Sur fue retomada a fines de los 90' luego de un largo período sin investigaciones al respecto (Sawchick et al., 2010). Desde el año 1997 se han efectuados diversos ensayos a fin de definir umbrales de riego óptimos para distintas leguminosas, potenciales de rendimiento de forraje alcanzables, así como el conocimiento de la capacidad de exploración radicular de las diferentes especies (Sawchick y Formoso, 2000). El coeficiente de regresión de respuesta al agua promedio fue de 8,5 kg MS/ha por mm de agua agregada, siendo altamente significativo. La respuesta del mejoramiento de trébol blanco fue en promedio 7,2 kg MS/ha/mm de agua agregada, mientras que la del trébol rojo fue de 9,52 kg MS/ha/mm de agua agregada, resultando ser una diferencia significativa. La respuesta fue aún más relevante en los casos en el que el pastoreo fue excluido. Sin embargo, bajo dos intensidades de pastoreo, el trébol blanco tuvo la misma respuesta; mientras que el trébol rojo disminuyó su respuesta a mayor presión de pastoreo (Pérez, 2004).

A su vez, otro componente que va en detrimento de la producción de MS de ambas leguminosas es el incremento de la resistencia a la penetración (RP). Por lo cual es probable que la menor producción de forraje en casos donde aumenta la resistencia a la penetración se asocie por poseer menor disponibilidad de agua para las plantas. Los déficits hídricos que a menudo se manifiestan en la estación de verano, se ven magnificados en suelos de basalto, lo cual es dado por la variación de profundidad que estos presentan, además de la textura pesada o arcillosa en las zonas profundas de estos suelos, que determinan una mayor retención del agua a tensiones no disponibles para las plantas (Pérez, 2004).

La producción anual de forraje es muy variable entre los años, debido a las variaciones de los regímenes hídricos (Berretta y Bemhaja, 1998). A su vez existe una importante variación mensual de la producción forrajera, con los mínimos de producción en invierno, consecuencia de las menores temperaturas y bajos niveles de radiación, y los máximos en primavera. En los meses de verano es posible alcanzar importantes niveles de producción de forraje, pero para que esto se logre, los regímenes hídricos deben ser favorables de manera tal, que los mismos superen la evapotranspiración. Como contrapartida, en

condiciones de sequía extrema, dicha producción puede ser muy baja o nula (Pérez, 2004).

2.10. HIPÓTESIS DEL TRABAJO

Las hipótesis del presente trabajo se describen a continuación.

H: los parámetros hidráulicos del sistema de riego, podrán ser evaluados por el modelo WinSRFR para los suelos de basalto profundo.

H: la producción de materia seca de la pastura responderá a la disponibilidad de agua durante el período de mayor demanda atmosférica.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MARCO DEL ESTUDIO

3.1.1. Sitio experimental

El presente trabajo se llevó a cabo en el establecimiento “El Junco” a 75 km de la Ciudad de Salto, paraje Colonia Itapebí (Latitud 31°11'23.74"S, Longitud 57°22'39.15"O). El periodo de estudio se extendió desde octubre de 2011 a marzo de 2012.

3.1.2. Suelo

Los tratamientos se realizaron sobre suelos de tipo Vertisol Háptico de la Unidad Itapebí - Tres Árboles (MAP. DSF, 1976). El suelo dominante se caracterizó por tener hasta 0,75 - 0,80 m de profundidad con una textura dominante arcillo limoso. Las propiedades físicas del suelo; textura, estructura, densidad; la tasa de infiltración e infiltración acumulada fueron determinados para las parcelas del estudio, a través del método de doble anillo, utilizándose dos anillos metálicos de diferente diámetro, uno dentro del otro. El anillo exterior se mantenía con agua a altura constante, mientras que el anillo interior el cual en su centro tenía una regla (cm), se observaba el descenso del agua cada cierto tiempo y se medía en la regla cuantos centímetros descendía entre un registro y otro. Al mismo tiempo de haber registrado el descenso se reponía con agua y así sucesivamente hasta la estabilización del agua en el suelo (Figura No. 1). Para el cálculo de la tasa de infiltración se utilizó la siguiente ecuación: tasa de infiltración $I = KT^{a-1}$, donde I = tasa de infiltración en mm/h, K = constante en unidades de milímetros por hora elevada al exponente a (mm/h), T = tiempo en hora, $a - 1$ = sin unidades.

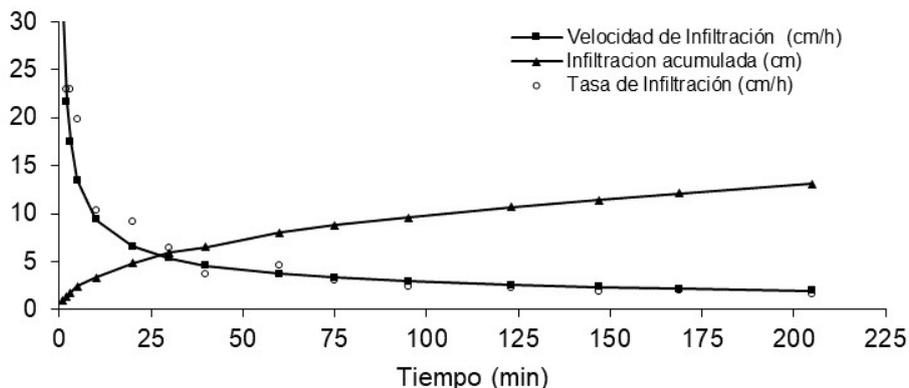
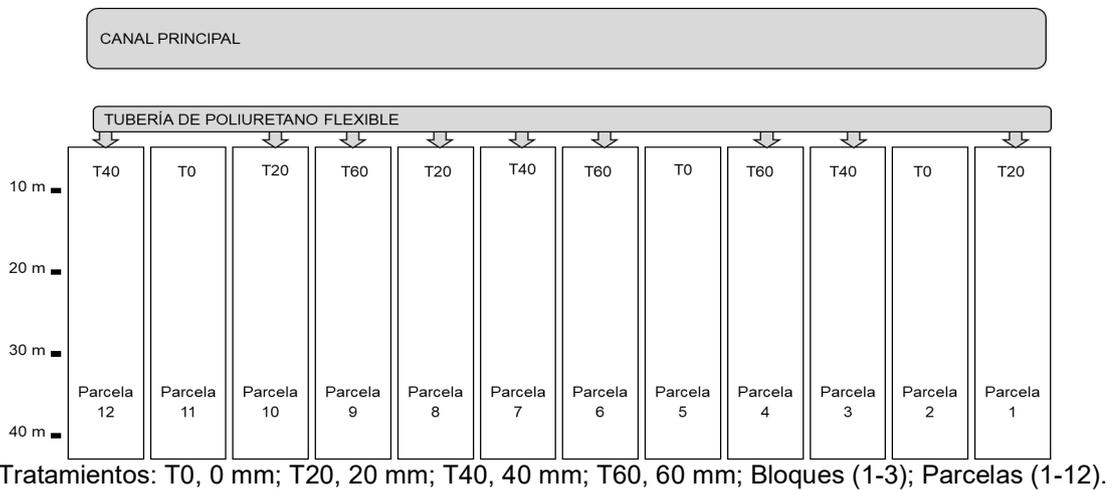


Figura No. 1. Velocidad de infiltración (cm/h), tasa de infiltración (cm/h) e infiltración acumulada (cm) determinados en las parcelas de estudio

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

El diseño experimental consistió en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones (bloques) por tratamiento. Los tratamientos fueron diferentes láminas de riego: 0 (control), 20, 40 y 60 mm de riego aplicados mediante riego por melgas (T0, T20, T40, T60, respectivamente), habiendo un total de 12 parcelas (Figura No. 2). Las parcelas experimentales o fajas (9 m ancho x 45 m largo) se ubicaron en una ladera media larga, con una pendiente de 2% y orientación SO – NE. El área total que ocupó el ensayo fue de 4.760 m² (108 m x 45 m).



Tratamientos: T0, 0 mm; T20, 20 mm; T40, 40 mm; T60, 60 mm; Bloques (1-3); Parcelas (1-12).

Figura No. 2. Esquema del diseño experimental de bloques completos al azar

Al inicio del experimento se realizó un riego uniformizador, llevando a todas las fajas a capacidad de campo. Cada vez que la evapotranspiración máxima estimada por la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 2006) alcanzaba el valor de 20, 40 y 60 mm (T20, T40 y T60, respectivamente) se realizaba el evento de riego. Los eventos de riego se llevaban a cabo para cada tratamiento mediante el monitoreo diario de la evapotranspiración potencial (ET_o; mm), registrada en la estación meteorológica ubicada a 2 km del sitio del ensayo, y las precipitaciones.

3.3. MANEJO

3.3.1. Manejo de la chacra

El diseño experimental se realizó sobre una pradera de tercer año compuesta de trébol blanco (*Trifolium repens*; Cv. Zapicán), lotus (*Lotus corniculatus*; Cv. San Gabriel) y raigrás (*Lolium multiflorum*; Cv. E284). La misma fue sembrada en la primera quincena de mayo del 2009 sobre un rastrojo de sorgo forrajero. La densidad de siembra fue de 2, 5, 6 y 20 kg/ha respectivamente. El raigrás se sembró en línea por método de chorrillo y el trébol blanco y lotus al voleo. La pradera se fertilizó al momento de la siembra con 120 kg/ha de 7-40-0 (N-P-K). Durante el periodo experimental la pradera no se re-fertilizó ni tampoco se aplicó control de malezas, plagas y enfermedades en los ensayos. La pradera se encontraba en su tercer año de producción con un buen número de plantas y vigor en general. Para la preparación del suelo, se realizaron tareas de mantenimiento en las melgas de riego con un tractor y una taipera.

3.3.2. Manejo del riego

Se utilizó el método de riego por melgas. La fuente de agua proveniente de una represa era conducida por un canal primario al área experimental. De este canal, el agua se transportaba hacia las parcelas experimentales mediante una tubería de poliuretano flexible ubicada de forma paralela a la cabecera de las mismas. La tubería contaba con dos compuertas por faja, las cuales se abrían manualmente para activar el riego.

Como se mencionó, el objetivo de los sucesivos riegos fue reponer una lámina correspondiente a 20, 40 y/o 60 mm de evapotranspiración, según el tratamiento que fuere. Durante el verano 2011-2012 se obtuvieron valores que rondaban los 5-7 mm de evapotranspiración diaria, por lo cual cada tres-cuatro días fue necesario un evento de riego en las parcelas que se regaban cada 20 mm de evapotranspiración, el mismo procedimiento para saber cuándo regar, se realizaba para las parcelas de 40 y 60 mm. El tratamiento T0 fue el testigo, es decir, el único que no se regó siendo el agua recibida únicamente de precipitaciones. En cambio, los tratamientos T1, T2, T3 recibieron agua de precipitaciones más el aporte del riego. El riego propiamente dicho comenzaba con la apertura de las compuertas ubicadas en las cabeceras de cada una de las melgas que estaban bajo tratamiento de riego. Una vez estabilizado el caudal dentro de la manga se midió (con un balde de 20 l) el caudal (l/s) que salía por cada compuerta, para así poder determinar el tiempo que dicha compuerta debería estar abierta para poder completar con los mm a reponer en cada melga.

Si bien los tratamientos poseen la misma superficie cada uno de ellos tienen diferentes láminas de riego, por lo tanto, el tiempo de riego y los litros totales a aplicar fueron también diferentes para cada caso. Los litros totales para aplicar en cada melga se calculaban multiplicando del valor de la superficie (m^2) de cada melga por el volumen a aplicar dependiendo del tratamiento (20, 40, 60 mm), partiendo del supuesto de que 1 mm corresponde a 1 l/m^2 . Una vez obtenidos el volumen total a aplicar (l) y el caudal (l/s) que estaba ingresando por la cabecera de la parcela, se obtenía como resultado, el tiempo que debería estar abierta la compuerta para que se aplique el volumen requerido en cada melga o cada tratamiento. De esta forma la aplicación de los riegos se realizó cuando la evapotranspiración máxima (E_{tm}) diaria acumulada alcanzó valores de 20, 40 y 60 mm para el tratamiento T1, T2 y T3 respectivamente.

3.4. DETERMINACIONES Y CÁLCULOS

3.4.1 Determinaciones y cálculos del riego

Las determinaciones que se realizaron del riego en cada melga fueron las siguientes: caudal (Q), tiempo de riego, tiempo de avance y tiempo de recesión. La medición del caudal (l/s) se llevó a cabo en cada melga una vez comenzada la sesión de riego y habiendo esperado previamente un tiempo suficiente para que el mismo se estabilizara. Una vez estabilizado el caudal de entrada a cada melga se realizaron 5 mediciones espaciadas en el tiempo en cada compuerta. La medición se realizó determinando el tiempo de llenado de un balde de 20 litros. El tiempo de riego se contabilizó como el tiempo transcurrido (min) entre la apertura y el cierre de la compuerta. El tiempo de avance se contabilizó como el tiempo transcurrido desde el comienzo del riego (apertura de la compuerta) hasta el avance del agua a los 10, 20, 30, y 40 m los cuales habían sido marcados previamente con estacas. El tiempo de recesión se contabilizó como el tiempo que tardó en desaparecer el agua de la superficie del suelo una vez cerrado el riego y el mismo fue medido cada 10 m. Una vez medido el tiempo de avance y de recesión del agua se calculó el tiempo de oportunidad de infiltración cada 10 m (T . de oportunidad = T . de recesión – T . de avance). El tiempo de oportunidad marca el tiempo de riego en el cual se aplica una lámina determinada, se ingresa a la ecuación de infiltración de Kostiakov y se obtiene la lámina infiltrada.

Con los datos obtenido a campo se calcularon los siguientes parámetros del riego según Walker y Skogerboe (1987), Brut et al. (1997), Morábito (2003).

- Eficiencia de aplicación (EAP).

$$EAP = \frac{\text{Volumen de agua infiltrada y almacenada}}{\text{Volumen de agua aplicada}} * 100$$

- Uniformidad de distribución (UD).

$$UD = \frac{\text{Lámina infiltrada promedio del cuarto mas perjudicado}}{\text{Lámina infiltrada promedio}} * 100$$

- Eficiencia de almacenaje (EAL).

$$EAL = \frac{\text{Volumen de agua infiltrada y almacenada}}{\text{Volumen de agua requerida (o almacenable)}} * 100$$

- Percolación (P).

$$P = 100 - EAP - E$$

- El escurrimiento (E) se asumió que fue cero ya que el riego se cortaba al final de la melga.

3.4.2 Determinaciones de producción de pasturas

En cada uno de los tratamientos se determinó la producción de materia seca total de la pastura (kg MS/ha) en dos instancias: al inicio (20 de octubre de 2011) y al final del periodo experimental (20 de febrero de 2012) momento en que se culminó con la serie de eventos de riego, utilizando el método comparativo para estimar rendimiento de materia seca de pasturas propuesto por Haydock y Shaw (1975).

En primer lugar, se seleccionaron cinco cuadrículas de referencia, que constituyeron la escala de rendimiento contra la que se valoraron los rendimientos de los cuadrantes de la muestra, colocando por apreciación visual los cuadrantes (desde más bajo hasta más alto rendimiento, del 1 al 5). Una vez que todas las parcelas fueron calificadas, los cuadrantes de referencia se cosecharon, secando y pesando el forraje para calcular por la ecuación de regresión la producción de MS en la calificación de la escala. En el momento del muestreo se generaron valores de una escala de apreciación visual que representaba diferentes niveles de forraje de la pastura en ese momento; dicha escala iba del 1 al 5 en el caso de los cortes realizados del “disponible” y del 1

al 3 en caso de cortes realizados en “remanente”. La metodología del muestreo consistió en tirar 20 veces por cada melga un cuadrado de varilla de 30 x 30 cm y asignarle el valor de escala visual que le corresponda dependiendo de la altura de la pastura. El cuadro se tiró mientras se atravesaba cada melga de forma diagonal. Para cada valor de la escala, se realizaron 3 cortes al azar en todas las parcelas, y se secaron en estufa a 65° C durante 48 h para obtener los kg de MS de cada punto de la escala.

Tras la medición de MS al inicio del experimento, el forraje disponible en todas las parcelas fue cosechado mediante pastoreo con ovinos. Los ovinos permanecieron en el área experimental hasta dejar un remanente homogéneo de aprox. 5 cm en todas las parcelas de riego. Una vez alcanzado dicho remanente los animales fueron retirados y no volvieron a pastorear durante el periodo experimental.

3.5. SIMULACIÓN

Además de realizar la evaluación del riego para la obtención de los parámetros de riego: eficiencia de aplicación (EAP), uniformidad de distribución (UD), eficiencia de almacenaje (EAL) y percolación (P), se realizó una evaluación del modelo de simulación WinSRFR v.5.0.58 (Bautista et al., 2009) mediante el análisis de los valores predichos por el modelo y los medidos. En el módulo de análisis de evento se ingresaron los datos de campo requeridos por el software como: largo de melga, ancho de melga, lámina máxima, pendiente, caudal, tiempo de corte, tiempo de avance acumulado cada 10 m, tiempo de receso acumulado cada 10 m, coeficiente de rugosidad de Manning, parámetro “a” de la función de Kostiakov. Con los datos ingresados, el software de simulación calculó: el tiempo de oportunidad y el parámetro K de la función de infiltración. Los resultados arrojados por el modelo fueron los siguientes: eficiencia de aplicación (EAP), uniformidad de distribución del cuarto menor (UDcm), percolación profunda (P), escurrimiento superficial (E) expresados en porcentaje (%) como en mm de lámina de agua según el caso. Otros resultados arrojados fueron: tiempo de avance medido y predicho, tiempo de receso medido y predicho, tiempo de oportunidad medido y predicho.

3.6. MATERIALES UTILIZADOS

Se describen a continuación algunos de materiales utilizados en el experimento: tractor con taípera y rolo, retro excavadora, estación agro meteorológica automática, manga de polietileno, compuertas plásticas regulables, saca bocado, 2 taladros de tipo holandés, 2 palas arroceras, 2 azadas, un machete, balde de 20 litros, gomas de atar, cuchillo, varillas plásticas para electro-piolín, electro-piolín, estacas, cinta métrica, maceta, dos tanques “chimeneas”, un caño T de mental para unión, cronómetro, piques de

madera, alambre eléctrico, etiquetas, bolsas de nylon, balanza de laboratorio, regla y nivel.

3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El experimento consistió en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones por tratamiento. Los datos de caudal (Q) (l/s), lámina requerida (mm) y volumen acumulado (mm), fueron analizados mediante un modelo mixto, utilizando el procedimiento MIXED del SAS (SAS Institute, versión 9.0V), según el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + FR_i + B_j + \varepsilon_{ij},$$

donde Y_{ijk} es la variable dependiente, μ es la media global, FR_i es el efecto fijo del tratamiento de lámina de riego ($i = 4$ tratamientos), B_j es el efecto aleatorio del bloque ($j = 3$ bloques), y ε_{ij} es el error residual.

Los datos de producción de pasturas (kg MS/ha), fueron analizados según el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + FR_i + M_j + (FR*M)_{ij} + B_k + \varepsilon_{ijk},$$

donde Y_{ijk} es la variable dependiente, μ es la media global, FR_i es el efecto fijo del tratamiento de frecuencia de riego ($i = 4$ tratamientos), M_j es el efecto fijo del momento ($i = 2$ momentos; inicio y fin experimento), $FR*M_{ij}$ es el efecto fijo de la interacción entre tratamiento y momento, B_k es el efecto aleatorio del bloque ($k = 3$ bloques), y ε_{ijk} es el error residual.

Las diferencias fueron consideradas significativas cuando $P < 0,05$ y se consideró una tendencia cuando $0,05 < P \leq 0,10$.

La relación entre EAP y UD predicho por el modelo WinSRFR (simulado) y real (calculado), fue analizada mediante correlación lineal simple mediante la prueba de Pearson (r), utilizando el procedimiento PROC CORR del SAS (SAS Institute, versión 9.0V) y mediante análisis de regresión (R^2).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO

Las condiciones meteorológicas durante el periodo experimental y el promedio de los 10 últimos años se detallan en las Figuras No. 3 y No. 4. En la Figura No. 3 se presentan los resultados de precipitación y ETo de los meses del ensayo en comparación con la serie histórica (1971- 2016). El promedio mensual de la serie histórica de 45 años muestra que durante los meses de mayor demanda atmosférica (noviembre a febrero), la ETo supera a las precipitaciones, resultando en un déficit hídrico durante el verano y excesos hídricos durante los meses de menor demanda atmosférica (mayo a agosto). Estos desbalances a lo largo del año están explicados por la variabilidad que presenta la demanda atmosférica más que por el régimen de precipitaciones, que se ajusta a un régimen isohigro. La ETo en los meses de mayor demanda atmosférica es más de cuatro veces su valor presentado en los meses de invierno. Un régimen de precipitaciones isohigro indica que la distribución de precipitaciones a lo largo del año es similar para las cuatro estaciones, sin embargo, en Uruguay existe una gran variabilidad interanual. Tal es así que para el año en el que se realizó el ensayo se presentó un déficit hídrico muy marcado en los meses de noviembre, diciembre y enero, dado por las escasas precipitaciones en la estación estival y a la evapotranspiración del cultivo que en esos meses presenta los máximos valores del año. Por el contrario, en el mes de febrero, se acumularon 363 mm totales (en un periodo de 8 días), efectuándose un único evento de riego, resultando en un balance hídrico positivo. Esto coincide con lo que mencionan Sawchik et al. (2010), en cuanto a que últimamente se constatan una mayor frecuencia de eventos extremos, tanto por la incidencia del cambio climático, así como por la identificación de variaciones interdecádicas en las precipitaciones. Como se mencionó, la variabilidad interanual de las precipitaciones es característica en Uruguay, presentando meses con valores máximos cercanos a los 500 mm y mínimos a 10 mm, por lo que sería cuestionable hablar de años promedios. Por otra parte, se evidencian descensos de estas para los meses de junio, julio y agosto, pero el balance hídrico no se ve afectado, puesto que también disminuye la evapotranspiración en dichos meses por tratarse de invierno.

Los valores medios de evapotranspiración acumulada anual, estimada por el método de Penman-Monteith, se sitúan entre 1.000 y 1.200 milímetros (mm), con los valores más cercanos a 1.000 mm en la región Sureste del país y valores cercanos a 1.200 mm en la zona Noroeste del país. La evapotranspiración (Penman-Monteith) presenta un claro comportamiento estacional registrándose los valores más altos durante el verano (150-190 mm/mes), seguido de la primavera (90-150 mm/mes), el otoño (65-80 mm/mes)

y el invierno con 25-35 mm/mes. En cuanto al comportamiento histórico se destaca una baja variabilidad interanual, la cual es un poco más alta durante el verano, con 40 a 50 mm de diferencia entre los extremos y baja en invierno, con 10 mm de diferencia entre los extremos (Castaño et al., 2011). Como se mencionó anteriormente para el año tratado se presenta un balance hídrico negativo en los meses de noviembre, diciembre y enero por las altas demandas atmosféricas y falta de lluvias, lo cual no escapa a la realidad de la mayoría de los veranos en la región Norte del país. Lo contrario ocurre en el mes de febrero donde las precipitaciones superan el valor de la ETo en más de doble. Por lo tanto, el riego suplementario en los periodos de balance hídrico negativo podría ser una buena alternativa para asegurar una buena producción de forraje, de buena calidad, sino que además ayuda en la persistencia de las especies que componen la pastura. En cuanto a temperatura (Figura No. 4) se observó que los valores del período del ensayo fueron muy similares a la temperatura de la serie histórica (1970-2016).

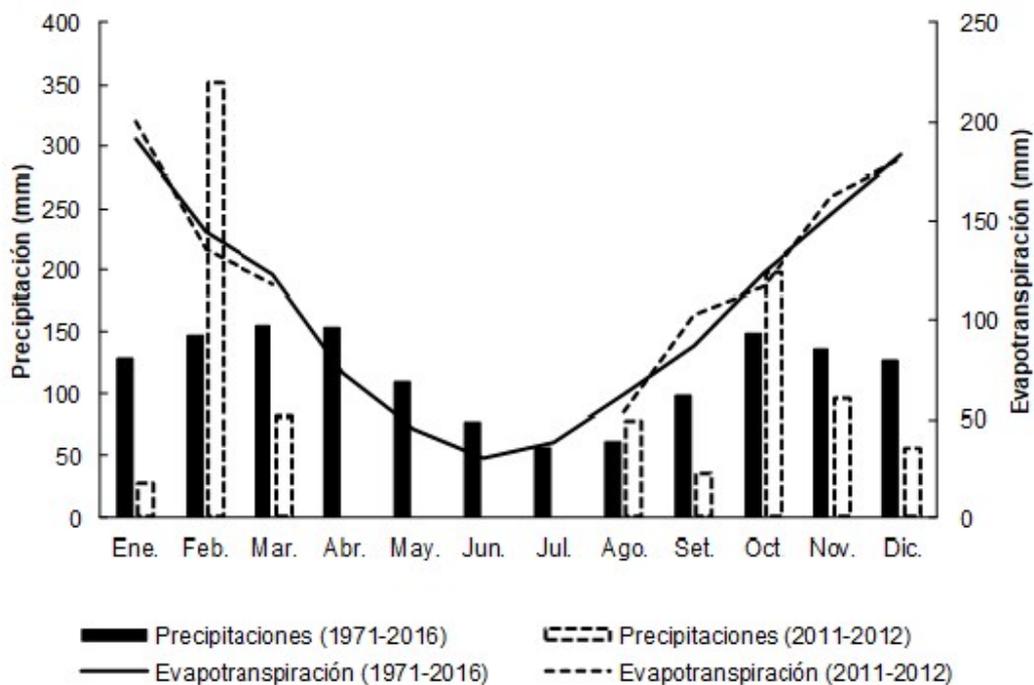


Figura No. 3. Promedio mensual de precipitación acumulada (mm) (barras) y evapotranspiración (líneas) en base a la ecuación de Penman-Monteith (mm) durante el período experimental (agosto 2011 – marzo 2012) comparado con la serie histórica (1971 - 2016)

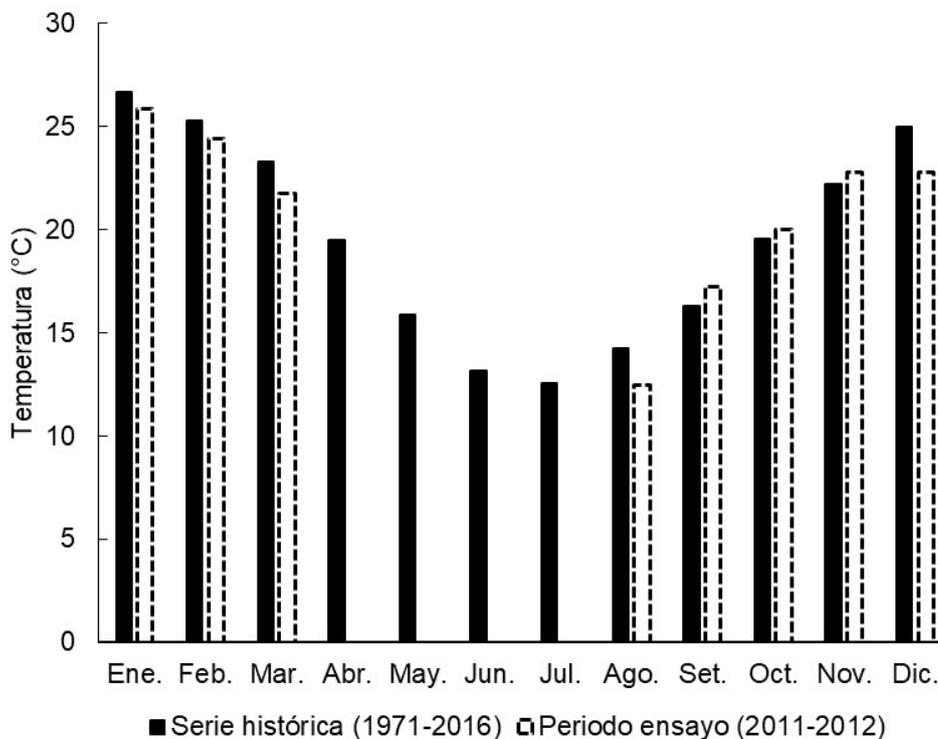


Figura No. 4. Temperatura promedio diario (°C) durante el período experimental (agosto 2011 – marzo 2012) comparado con la serie histórica (1971 - 2016)

4.2. APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

En Cuadro No. 1 se presentan todos los eventos de riego realizados, en cada tratamiento. Como se observa hubo importantes diferencias entre la lámina aplicada y requerida. El análisis estadístico de los datos permite evaluar resultados de la aplicación de los tratamientos de lámina de riego sobre las parcelas (Cuadro No. 2). Como era de esperar, los eventos de riego difirieron entre los tratamientos, disminuyendo a medida que aumentó la lámina requerida. Al tratarse de un periodo delimitado de aplicación de riego (diciembre – marzo), el número de instancias de riego fue menor cuanto mayor fue la lámina requerida y por ende más espaciados en el tiempo fueron los eventos de riego. Por otro lado, se observa que el caudal de riego no difirió entre los tratamientos ($P = 0.205$), lo cual se encuentra dentro de lo esperado, ya que se buscó que el caudal fuera similar en todas las parcelas debido a que no era

objeto de estudio. Cabe mencionar, que, si bien no se estableció un caudal fijo, se trabajó con caudales no erosivos.

Cuadro No. 1. Resultados de la aplicación de láminas de riego sobre caudal, lámina aplicada y requerida y volumen total acumulado de cada evento de riego

Riego	No. repeticiones	Fecha	Caudal (l/seg)	Lámina requerida (mm)	Lámina aplicada (mm)	Volumen acumulado (l)
T20						
1	3	2/01/2012	3,9	64,9	89,2	32.112
2	3	6/01/2012	5,6	31,0	46,6	16.793
3	3	9/01/2012	6,4	24,8	29,2	10.527
4	3	13/01/2012	3,4	12,0	29,9	10.779
5	3	16/01/2012	2,5	20,2	33,0	11.893
6	3	19/01/2012	3,1	21,9	33,4	12.022
7	3	23/01/2012	3,2	8,5	36,5	13.158
8	3	27/01/2012	3,0	21,3	28,0	10.095
9	3	30/01/2012	3,2	21,7	26,2	9.448
10	3	16/02/2012	2,8	46,3	26,2	9.426
T40						
1	3	6/01/2012	6,8	95,9	123,7	44.532
2	2	13/01/2012	5,3	36,8	46,5	16.755
3	3	19/01/2012	3,4	42,0	37,5	13.488
4	3	16/02/2012	3,2	46,3	36,5	13.142
T60						
1	3	9/01/2012	5,0	120,6	76,8	27.657
2	3	16/01/2012	2,7	32,1	31,7	11.330
3	3	23/01/2012	3,9	30,4	44,9	16.174

Tratamientos: T20, 20 mm; T40, 40 mm; T6, 60 mm.

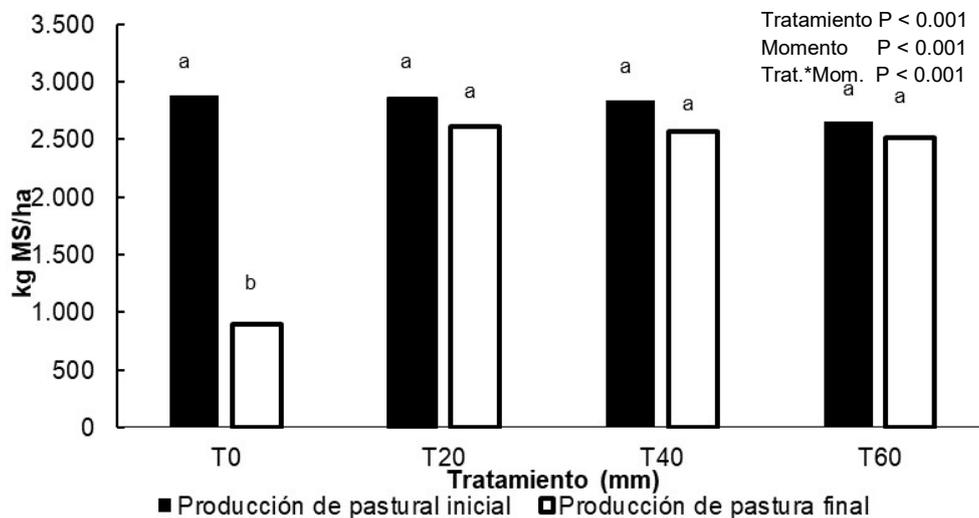
Por otro lado, para evaluar la efectividad de aplicación de los tratamientos, se midió la lámina requerida en cada tratamiento. Como se puede observar en el Cuadro No. 2, se logró una lámina requerida diferente a la deseada en cada tratamiento. La diferencia se encuentra únicamente entre T20 y el resto ($P < 0.001$), sin observarse diferencias entre la lámina requerida de T40 y T60.

Cuadro No. 2. Resultados de la aplicación de láminas de riego sobre caudal, lámina aplicada y requerida y volumen acumulado promedio de cada tratamiento

	Tratamientos			EEM	P	
	T20	T40	T60		Tratamiento	Bloque
No. eventos riego/ parcela	10	4	3			
Caudal (Q) (l/s)	3,7	4,6	3,9	0,47	0,205	0,990
Lámina requerida (mm)	27,2 ^b	57,0 ^a	61,0 ^a	8,59	<0,001	0,987
Lámina acumulada (mm)	378,5 ^a	228,7 ^b	153,4 ^b	28,06	0,011	0,700

^{a-b} Letras distintas indican diferencias ($P < 0.001$). Tratamientos: T20, 20 mm; T40, 40 mm; T6, 60 mm. EEM, error estándar de la media.

Los resultados de producción de MS de la pastura se encuentran en línea con la aplicación de la lámina requerida en cada tratamiento (Figura No. 5). Los kg de MS al inicio del experimento fueron iguales para todos los tratamientos (promedio 2.807 kg MS/ha), lo cual era de esperar ya que los parcelas recibieron el mismo manejo previo al experimento. Tras la aplicación de los tratamientos de riego, la producción de pastura no presentó diferencias entre los tratamientos de riego (promedio 2.566 kg MS/ha) ni tampoco respecto a la producción de MS inicial. El único efecto que se observa es que la producción de MS de la pastura en el tratamiento control difirió ($P < 0,001$) de los tratamientos bajo riego.



Tratamientos: T0, control; T20, 20 mm; T40, 40 mm; T6, 60 mm. ^{a-b} letras distintas indican diferencias ($P < 0.001$).

Figura No. 5. Producción de pasturas (kg MS/ha) al inicio (negro) y al final (blanco) del experimento

En la Figura No. 6 (A), se presenta la relación entre la diferencia de lámina aplicada y requerida y la UD. Como puede observarse, la uniformidad de distribución no presenta correlación ($r = -0,230$, $P = 0,258$), con la diferencia entre lámina aplicada y requerida, para los eventos de riego evaluados en el presente trabajo. A su vez, estos valores se ajustan a una regresión cuadrática con un R^2 bajo (0,05). La UD es un concepto que cuantifica que tan homogéneo es el riego en toda la parcela. García Petillo (2012) plantea que, si la UD es baja, significa que hay zonas de la parcela que reciben una cierta cantidad de agua y otras que reciben mucho menos, lo que implica que para una misma lámina neta y lámina bruta a aplicar deberá ser mayor. En este sentido, hubiera sido de esperar, que el riego en exceso aumentara la UD.

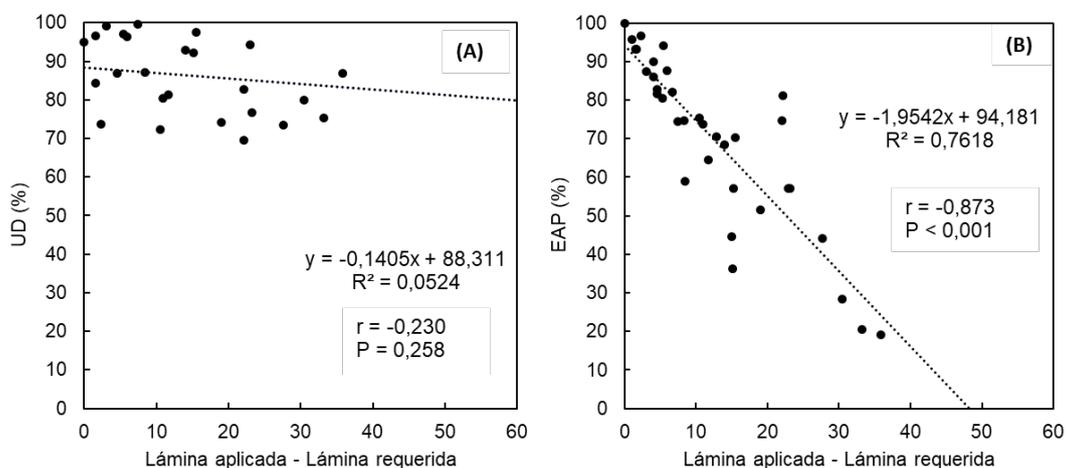


Figura No. 6. Correlación entre la diferencia de lámina aplicada – lámina requerida y la uniformidad de distribución (A) y la eficiencia de aplicación (B)

En cuanto a la EAP en la Figura No. 6 (B) puede observarse una fuerte correlación negativa con la diferencia entre lámina aplicada y requerida ($r = -0,873$; $P < 0,001$), así como un R^2 alto en la regresión lineal (0,76).

4.3. EVALUACIÓN DE LA LÁMINA DE RIEGO

Para evaluar el efecto de la aplicación de láminas de riego se seleccionaron eventos de riego a los cuales se les aplicaron correctamente los tratamientos de 20, 40, y 60 mm de evapotranspiración, los mismos son seleccionados sobre el total de 50 eventos de riego que se presentan en el Cuadro No. 1. Se compararon los parámetros del riego calculados: EAP y UD de cada uno de estos eventos de riego. Para la evaluación de los tiempos de avance y de receso, el tiempo de oportunidad se seleccionó un riego para cada tratamiento. El criterio para la selección de los riegos fue que la lámina requerida fuera la del tratamiento objetivo, y al mismo tiempo que la lámina aplicada fuera similar a la lámina requerida.

Los resultados se presentan en el Cuadro No. 3. Se observó que a medida que disminuye la frecuencia de riego mejora la EAP, y, por lo tanto, disminuyen las pérdidas por percolación. Según García (2012), la frecuencia de riego (FR) es el período que pasa entre dos riegos y es lo que demora el cultivo en consumir la lámina neta (LN). Cabe destacar que el promedio de EAP para las 3 frecuencias de riego fue 91,2%, valor satisfactorio cuando se compara con

datos reportados por otros investigadores (Trout y Kincaid 2007, Pereira et al. 2010). A la hora de interpretar estos resultados es importante tener en cuenta que la eficiencia de aplicación caracteriza la gestión del riego en dependencia de las limitaciones impuestas por el sistema (Pereira, 1999). En este caso una lámina de riego de 60 mm alcanzó una mayor eficiencia de aplicación que cuando se regó cada 40 o cada 20 mm. Son varios los factores que pueden afectar a la EAP, entre los que destacan: disponibilidad de agua, factores económicos, habilidad del regante, diseño de las melgas entre otros (García, 2012).

Por otra parte, en referencia al tiempo de oportunidad, se observa que en los eventos de riego de los tratamientos T20 y T40 se obtienen valores similares mientras que en el evento del T60 en comparación, muestra un mayor tiempo de oportunidad. Posiblemente esto se explique por tener un caudal similar a la mayoría de los demás tratamientos, pero con una frecuencia de riego menor.

Cuadro No. 3. Evaluación de la aplicación de distintas láminas de riego sobre los parámetros hidráulicos del sistema de riego, eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución

Tratamientos	Lámina aplicada (mm)	Lámina requerida (mm)	Q (l/s)	EAP (%)	UD (%)	Tiempo de oportunidad (L/1)
T20						
Riego 1	24,7	20,2	2,0	81,7	86,8	61,0
Riego 2	23,3	21,7	2,8	93,1	97,0	58,0
Riego 3	23,5	21,9	2,7	93,1	84,0	58,0
Riego 4	24,4	21,3	3,1	87,4	99,0	56,0
T40						
Riego 1	40,8	36,8	5,0	90,0	100,0	47,0
Riego 2	48,0	42,0	3,6	87,5	94,9	85,0
Riego 3	40,2	46,2	3,3	100,0	97,0	63,0
T60						
Riego 1	67,2	64,90	3,2	96,6	73,8	90,0

Tratamientos: T20, 20 mm; T40, 40 mm; T6, 60 mm. Q, caudal; EAP, eficiencia de aplicación; UD, uniformidad de distribución; L/1, cuartil superior.

En la Figura No. 7 (A) se presentan los resultados de tiempo de avance y receso para un riego en cada tratamiento. La diferencia en el tiempo de avance entre los distintos eventos de riego se explica principalmente por los diferentes caudales los cuales fueron 2,0, 5,0 y 3,2 l/s para los riegos bajo los

tratamientos T20, T40 y T60 respectivamente. Sin embargo, tal y como se observa en la Figura No. 7 (A), el evento de riego bajo el tratamiento T60 fue el que tuvo mayor tiempo de avance y por lo tanto un mayor tiempo de oportunidad, ambos parámetros posiblemente estén explicados por menor frecuencia de riego para este tratamiento. Por otro lado, las curvas de receso presentan un patrón similar para los tres tratamientos, independientemente del caudal aplicado. Es lógico suponer que esta variable está determinada en gran parte por características intrínsecas del propio suelo como: profundidad del perfil, textura y pendiente homogénea para todo el ensayo. Otro factor que determinan que las curvas de receso sean similares es que las pasturas tenían un desarrollo vegetal muy similar en todos los tratamientos.

En la Figura No. 7 (B) se presentan los resultados de tiempo de oportunidad para los 3 riegos evaluados. El tiempo de oportunidad de infiltración de agua en la parcela, surge de la diferencia entre el tiempo de avance y el tiempo de receso del agua en superficie. En este caso se observa un mayor tiempo de oportunidad en el tratamiento T60, lo cual se explica por una combinación entre la baja frecuencia de riego en este tratamiento y en términos relativos un menor caudal de agua en la cabecera de la parcela en comparación con los demás tratamientos, que generó una velocidad de avance menor y por ende un mayor tiempo de riego. También se explica por un mayor volumen de agua que podía infiltrar ya que requería una lámina de 67 mm que fue la mayor de los tres. Teniendo en cuenta estos factores, posiblemente en los primeros metros de la parcela se dé una mayor infiltración de agua. Bourdin et al. (2015), obtienen resultados similares, en un ensayo de riego por superficie con diferentes anchos de fajas (6 metros, 9 metros y 12 metros), en este trabajo observan un mayor tiempo de oportunidad en el tratamiento de 9 metros de ancho de faja, y su explicación se basa en un menor caudal de agua en la cabecera, por ende, una velocidad de avance menor y un mayor tiempo de riego para ese tratamiento con respecto a los demás. También mencionan una posible mayor infiltración de volumen de agua en profundidad en los primeros 25-30 m de la melga.

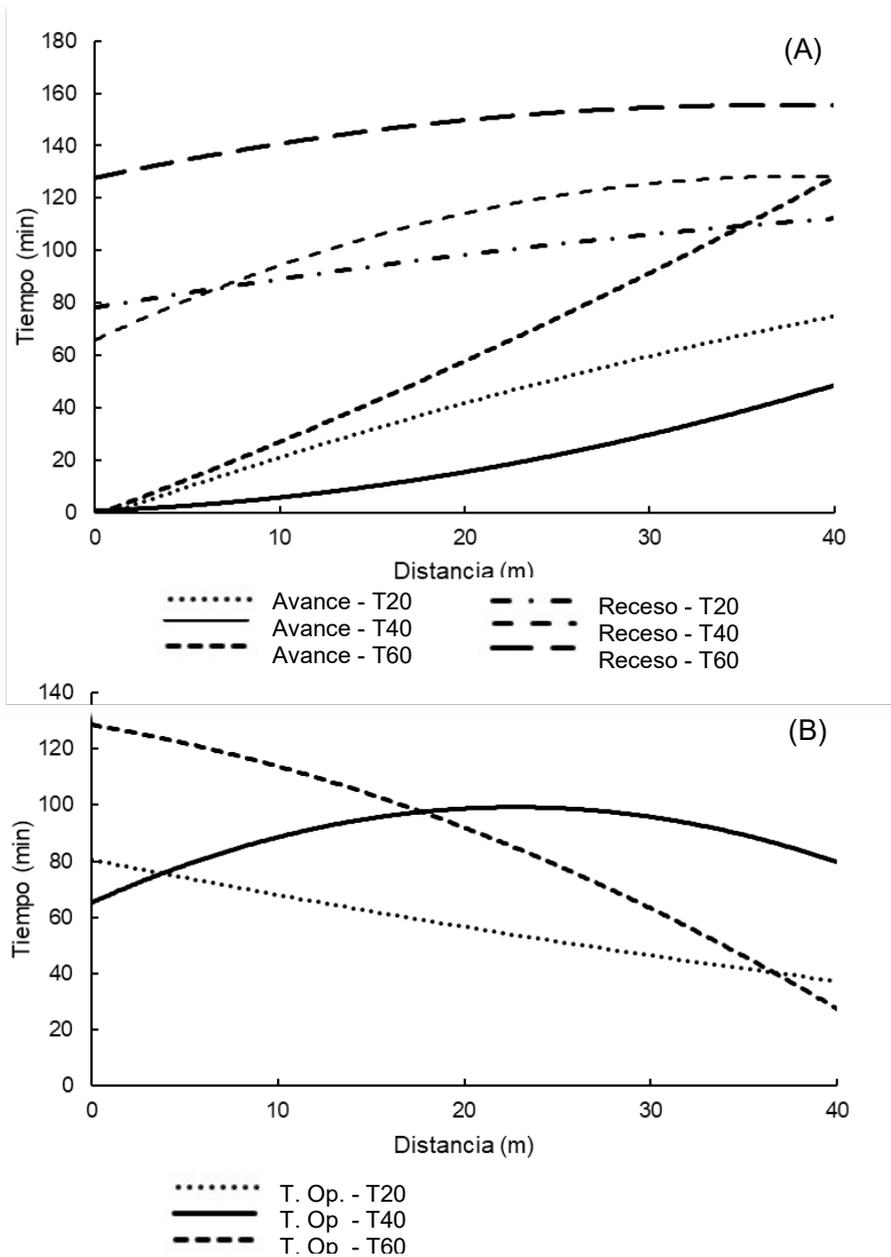


Figura No. 7. Tiempo de avance y receso (A) y tiempo de oportunidad (B) de los riegos bajo los tratamientos de 20, 40 y 60 mm de evapotranspiración (T20, T40 y T60, respectivamente)

4.4. CORRELACIONES ENTRE VARIABLES DE RIEGO CALCULADAS Y SIMULADAS

Para la evaluación del modelo de simulación, se tomaron todos los datos del experimento de los riegos que fueron efectuados correctamente, lo cuales se presentan en anexo, en el Cuadro No. 4. En la Figura No. 8 se presentan los resultados de la correlación entre las variables de riego calculadas y simuladas con el WinSRFR. La EAP (A) presenta una correlación alta ($r = 0,964$; $P < 0,001$) entre calculado y simulado. Esto demuestra que el modelo presenta un buen ajuste en lo que refiere al cálculo de esta variable. En cuanto a la UD (B), los resultados de la correlación muestran que el modelo no presenta un buen ajuste en esta variable ($r = 0,096$; $P = 0,568$). Se puede observar que la UD simulada fue menor que la calculada. Respecto a la percolación, la correlación entre calculado y simulado es elevada ($r = 0,947$; $P < 0,001$). Esto estaría indicando una buena estimación de la infiltración total hecha por el modelo mediante balance de volúmenes. La EAP se ajusta a la regresión lineal con un R^2 de 0,923.

De acuerdo con Puppo et al. (2018), se deben usar aquellos eventos que tengan un buen ajuste entre los datos medidos y simulados por el modelo, de lo contrario los resultados a la hora de realizar simulaciones serán erráticos. Esto indica que los eventos de riego evaluados en este ensayo podrían usarse para simular escenarios de optimización para identificar estrategias de manejo.

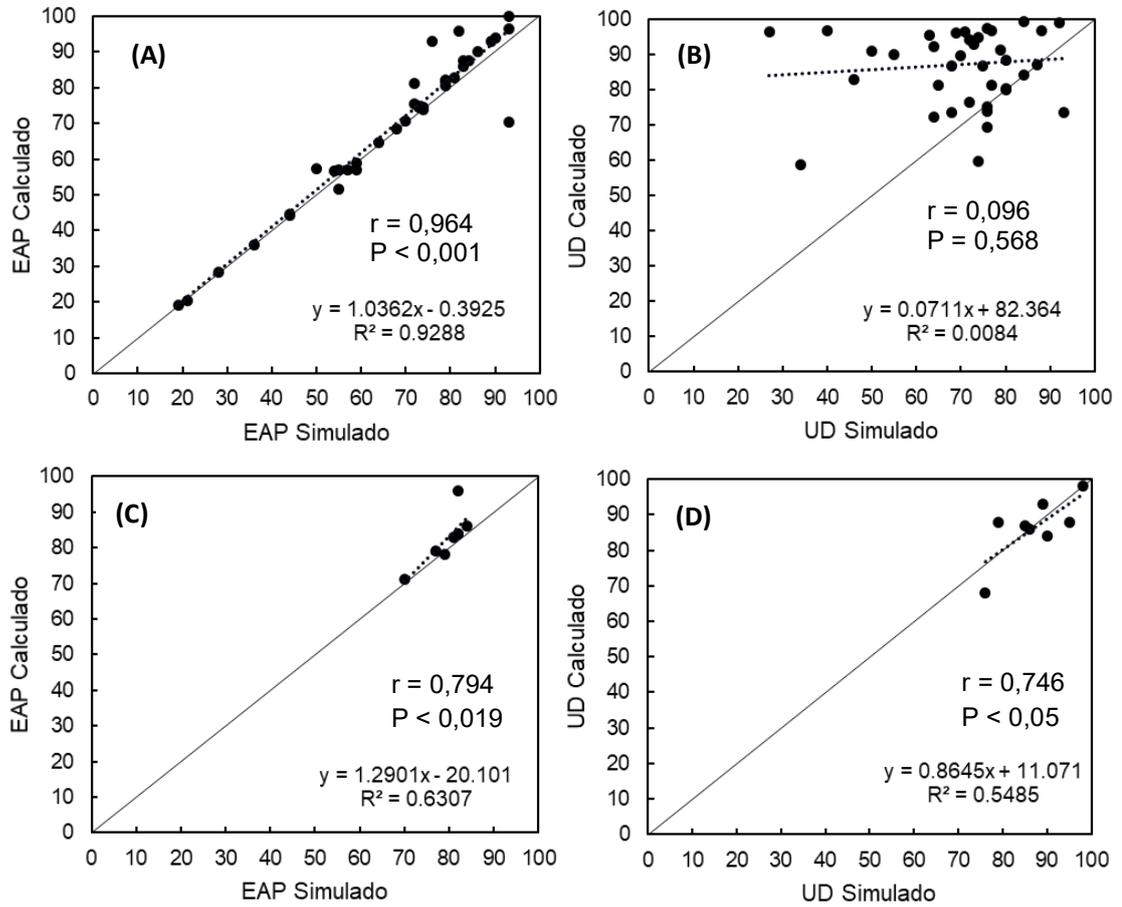


Figura No. 8. Correlaciones simples y regresiones lineales entre eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución calculada y simulada con el modelo WinSRFR de la base de datos de riegos del ensayo (A y B) y con 8 eventos de riego seleccionados (C y D)

5. CONCLUSIONES

Fueron aplicadas tres láminas de riego utilizando como criterio la reposición de la evapotranspiración de referencia (20, 40 y 60 mm).

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten concluir que cualquiera fuera la lámina aplicada se alcanzaron resultados satisfactorios en cuanto a la eficiencia de aplicación (EAP) y de uniformidad de distribución (UD) del agua. El promedio de EAP y UD para las tres láminas de riego aplicadas fue de 91,2% y 91,6%, respectivamente.

Los tiempos de oportunidad resultantes en los diferentes eventos de riego evaluados fueron iguales o menores a 61 minutos para los tratamientos de reposición de lámina de 20, iguales o menores a 85 minutos para los tratamientos de 40 mm y menos de 90 minutos en el tratamiento de 60 mm.

El modelo de simulación WinSRFR presentó un buen ajuste en los datos observados a campo y los simulados por el modelo para eficiencia de aplicación de agua (EAP), y no así en la medida de uniformidad de distribución (UD). Esto indicaría que se trata de una herramienta útil para simular no solamente medidas de rendimiento de los sistemas de riego por superficie sino también trabajar con escenarios de optimización de aplicación de riego, aunque serán necesarios futuros trabajos para una mejor evaluación del modelo.

Durante el período de evaluación (octubre 2011 a marzo 2012), la producción de forraje tuvo un aumento significativo de casi 2000 kg ha⁻¹ en las parcelas regadas en relación al testigo que recibió solamente agua proveniente de las precipitaciones.

Si bien la mano de obra no fue objeto de estudio, de acuerdo a los resultados obtenidos en relación a la eficiencia de aplicación (EAP) con el tratamiento de reposición de 60 mm de lámina de riego, se tendría menor costo de mano de obra con los mismos indicadores de eficiencia y sin disminución en la producción de materia seca. De todas maneras, se considera necesario futuras investigaciones para confirmar estos resultados y evaluar alternativas de caudal de entrada para otras condiciones productivas.

6. RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue la evaluación del efecto de la lámina de riego por superficie sobre la eficiencia de aplicación, tiempo de oportunidad, uniformidad de distribución y sobre la producción de materia seca. El diseño experimental consistió en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones (bloques) por tratamiento. Los tratamientos fueron diferentes láminas de riego: 0 (control), 20, 40 y 60 mm de riego aplicados mediante riego por melgas (T0, T20, T40, T60, respectivamente). A medida que disminuye la frecuencia de riego mejora la EAP, y, por lo tanto, disminuyen las pérdidas por percolación. Por otro lado, la producción de pastura no presentó diferencias entre los tratamientos de riego ni tampoco respecto a la producción de MS inicial. La frecuencia de riego tuvo un efecto positivo sobre los parámetros del riego, mejorando la eficiencia de aplicación, la uniformidad de distribución y disminuyendo las pérdidas por percolación. El modelo de simulación WinSRFR presentó un buen ajuste en los parámetros de EAP y uniformidad de distribución, sugiriendo que podría ser una herramienta útil para simular escenarios de optimización.

Palabras clave: Eficiencia de aplicación; Uniformidad de aplicación;
Tiempo de oportunidad; Riego por gravedad; Modelo de riego.

7. SUMMARY

The objective of the present study was to evaluate the effect of irrigation frequency on surface irrigation on the on the application efficiency, opportunity time, the distribution uniformity, and pasture dry matter production. The experimental design consisted in a randomized complete block design with three replicates (blocks) per treatment. Treatments consisted in different border irrigation depth: 0 (control), 20, 40 y 60 mm of irrigation (T0, T20, T40, T60, respectively). The decrease of irrigation frequency lead to an increase in application efficiency, and therefore a decrease in percolation loses. There were no differences in dry matter pasture production between treatments, and regarding initial production. Irrigation frequency had a positive effect on irrigation performance indicators, improving the application efficiency and decreasing percolation loses. WinSRFR simulation accurately predicted application efficiency suggesting it could be used to simulate optimization scenarios.

Key words: Application efficiency; Distribution uniformity; Cut off time; Surface irrigation; Irrigation model.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. 298 p.
2. Bautista, E.; Clemmens, A. J.; Strelkoff, T. S.; Niblack, M. 2009. Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR—Example application. *Agricultural Water Management*. 96(7):1162-1169.
3. Berretta, E. J.; Bemhaja, M. 1998. Producción estacional de comunidades naturales sobre suelos de Basalto de la Unidad Queguay Chico. In: Seminario de Actualización en Tecnologías de Basalto (1998, Tacuarembó). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 11-22 (Serie Técnica no. 102).
4. Bourdin Medici, A.; Franco Fraguas Souto, J.; Burgos Valiente, M. 2015. Respuesta física al riego suplementario y desarrollo de tecnologías de riego por melgas en pasturas artificiales. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 41 p.
5. Burt, C. M.; Clemmens, A. J.; Strelkoff, T. S.; Solomon, K. H.; R. D.; Hardy, L. A.; Howell, T. A.; Eisenhauer, D. E. 1997. Medidas de rendimiento del riego: eficiencia y uniformidad. *Revista de Ingeniería de Riego y Drenaje*. 123(6):423-442.
6. Castaño, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J.; Aunchayna, R.; Bidegain, M. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Montevideo, INIA. 34 p. (Serie Técnica no. 193)
7. Clemmens, A. J. 1981. Evaluation of infiltration measurements for border irrigation. *Agricultural Water Management*. 3(4):251-267.
8. _____. 2000. Level-basin irrigation systems: adoption, practices, and the resulting performance. In: National Irrigation Symposium (4th., 2000, Phoenix, Arizona). Proceedings. Phoenix, American Society of Agricultural Engineers. pp. 273-282.
9. _____.; Wahl, T. L.; Bos, M. G.; Replogle, J. A. 2001. Water measurement with flumes and weirs. (en línea). Wageningen, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). s.p. Consultado ene. 2019. Disponible en <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/82325>

10. Elliott, R. L.; Walker, W. R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE*. 25(2):396-400.
11. _____.; _____.; Skogerboe, G. V. 1983. Infiltration parameters from furrow irrigation advance data. *Transactions of the ASAE*. 26(6):1726-1731.
12. Failde, A.; Peixoto, C.; Estol, E.; Preve, A. 2013. Estudio sobre riego agropecuario en Uruguay. *Anuario OPYPA 2013*:449-465.
13. Fernández Gómez, R.; Ávila Alabarces, R.; López Rodríguez, M.; Gavilán Zafra, P.; Oyonarte Gutiérrez, N. 2010. Manual de riego para agricultores, módulo I. Fundamentos de riego. Andalucía, España, Consejería de Agricultura y Pesca. Servicio de Publicaciones y Divulgación. pp. 15-20.
14. Foroud, N.; George, E. S.; Entz, T. 1995. Determination of infiltration rate from border irrigation advance and recession trajectories. *Agricultural Water Management*. 30(2):133-142.
15. García, C. 2010. Estrategias para la incorporación del riego en sistemas de producción extensivos. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 135-140.
16. García, M. 2010. Análisis crítico del método de riego por goteo en las condiciones del Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 14(1):36-43.
17. García Petillo, M. 2012. Conceptos básicos para el diseño y manejo del riego. In: Seminario Internacional sobre Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 25-32.
18. Hansen, V. E. 1962. *Irrigation: principles and practice*. 3rd. ed. New York, Wiley. 447 p.
19. Haydock, K. P.; Shaw, N. H. 1975. El método de rendimiento comparativo para estimar el rendimiento de materia seca del pasto. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 15(76):663-670.
20. Hofstadter, R. 1983. Producción de maíz, alfalfa y trébol blanco en condiciones de riego. *Agua en la Agricultura*. 1:7-13.

21. Kostiakov, A. N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration. In: Congress International Society of Soil Science (6th., 1932, Moscow). Transactions. Moscú, s.e. pt.1, pp.17-21.
22. Lathan, M. C. 2002. Nutrición humana en el mundo en desarrollo. (en línea). Roma, FAO. cap. 2, s.p. (Colección FAO. Alimentación y Nutrición no. 29). Consultado mar. 2018. Disponible en http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/06/W0073S/W0073S00.HTM
23. Linderman, C. L.; Stegman, E. C. 1971. Seasonal variation of hydraulic parameters and their influence upon surface irrigation application efficiency. Transactions of the ASAE. 14(5):914-918.
24. López-Mata, E.; Tarjuelo, J. M.; De Juan, J. A.; Ballesteros, R.; Domínguez, A. 2010. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. Agricultural Water Management. 98(1):190-198.
25. Mas, C. 2004. Algunos resultados de riego de pasturas en el Este. In: Jornada Clima y Respuesta Hídrica de Pasturas en Zonas Ganaderas (2004, Tacuarembó, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 31-46 (Actividades de Difusión no. 364).
26. Merriam, J. L.; Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Logan, Utah, Utah State University. Department of Agricultural and Irrigation Engineering. 285 p.
27. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible de las tierras de Uruguay: segunda aproximación. (en línea). Montevideo, MGAP. DIRENARE. 12 p. Consultado dic. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219220807174344.pdf>
28. Morábito, J. 2003. Desempeño del riego por superficie en el área de riego del río Mendoza. Tesis de Maestría. Mendoza, Argentina. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. 91 p.

29. _____.; Salatino, S.; Angella, G.; Prieto, D. 2008. Evaluación de campo al riego de los agricultores: casos prácticos y ventajas para la difusión de la tecnología apropiada, asesoramiento a los regantes para la modernización de los regadíos y su ambientalidad. (en línea). In: Jornadas sobre Ambiente y Riegos: Modernización y Ambientalidad (2008, La Antigua, Guatemala). Memorias. La Antigua, Guatemala, Red Riegos/ CYTED/AECID. s.p. Consultado jul. 2018. Disponible en <http://ceer.isa.utl.pt/cyted/>
30. Nugteren, J. 1970. Introduction to irrigation. Wageningen, The Netherlands, Agricultural University. Civil and Irrigation Engineering Department. 89 p.
31. Otero, A.; García, C.; Sawchik, J.; Cota, S.; Capurro, C.; Goñi, C.; Berger, A. 2015. Manejo del agua y toma de decisiones en la planificación y programación del riego 2013-2017. (en línea). In: Jornada de Riego (2015, Salto). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 11-12. Consultado nov. 2019. Disponible en http://www.inia.uy/Documentos/P%C3%BAblicos/INIA%20Salto%20Grande/2015/2015_01_30_Jornada_Riego/Guia_Campo_Jornada_Riego_2014-2015.pdf
32. Paananen, P.; Trout, T. J. 1999. Irrigation Methods. In: van Leir, H. N. ed. Handbook of agricultural engineering. St. Joseph, MI, ASAE. pp. 297-380.
33. _____. 2009. Sistematización de programas de desarrollo territorial realizados por la Comisión Nacional de Riego en el territorio Río Claro de Rengo VI Región: informe final de práctica. (en línea). Santiago de Chile, Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Administración y Economía. 41 p. Consultado feb. Disponible en <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/9762/CNR-0205.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
34. Pereira, L. S. 1999. Higher performances through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. Agricultural Water Management. 40:153-169.
35. _____.; Valero J. A.; Picornell, M. R.; Tarjuelo, J. M. 2010. El riego y sus tecnologías. (en línea). Albacete, ES, CREA. UCLM. 296 p. Consultado ago. 2018. Disponible en http://crea.uclm.es/crea/descargas/files/El_Riego_y_sus_Tecnologias.pdf

36. Pérez Gomar, E. 2004. Respuesta al agua en un mejoramiento forrajero en suelos profundos de basalto bajo diferentes condiciones de pastoreo. In: Jornada Clima y Respuesta Hídrica de Pasturas en Zonas Ganaderas (2004, Tacuarembó, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 23-30 (Actividades de Difusión no. 364).
37. Pritsch, O.; Hofstadter, R.; Gonnet, M. 1976. Estudios preliminares sobre el comportamiento de trébol rojo bajo riego. La Estanzuela, Colonia, CIAAB. pp. 19-24.
38. _____; Hofstadter, R.; Gonnet, M. 1979. Estudios preliminares sobre el comportamiento de trébol rojo bajo riego. Revista de la Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay. Segunda época. no. 12:19-24.
39. Puppo, L.; Aguerre, M.; Camio, G.; Hayashi, R.; Morales, P. 2018. Evaluación del riego por melgas en los suelos del Sur del Uruguay. Agrociencia (Uruguay). 22(2):1-14.
40. Roel, A. 1999. Riego en arroz: manejo eficiente de la inundación. (en línea). Montevideo, INIA. 16 p. (Boletín de Divulgación no. 61). Consultado oct. 2018. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2766/1/111219240807160631.pdf>
41. Roscher, K. 1985. Surface irrigation: characteristics, design and performance. Wageningen, The Netherlands, Agricultural University. Civil and Irrigation Engineering Department. 45 p.
42. Sawchik, J. 2000a. Algunos conceptos básicos para el manejo del riego. In: Jornada de Cultivos de Verano (2000, La Estanzuela). Tecnología de producción de cultivos y pasturas bajo riego. Montevideo, INIA. pp. 1- 7 (Actividades de Difusión no. 227).
43. _____; Formoso, F. 2000b. Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. In: Jornada de Cultivos de Verano (2000, La Estanzuela). Tecnología de producción de cultivos y pasturas bajo riego. Montevideo, INIA. pp. 13-25 (Actividades de Difusión no. 227).
44. _____; Mas, C.; Pérez Gomar, E.; Bermúdez, R.; Pravia, V.; Giorello, D.; Ayala, W. 2010. Riego suplementario en pasturas: antecedentes de investigación nacional. In: Seminario Internacional sobre Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y

Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. pp. 141-153.

45. _____. 2012. Necesidades de riego en cultivos y pasturas. In: Seminario Internacional sobre Riego y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Riego en cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. pp. 55-68.
46. Sousa, P. L. 1990. Modelação e gestão em rego por canteiros de nivel. Tese de Doutoramento. Lisboa, Portugal. Instituto Superior de Agronomia. s.p.
47. Tarjuelo Martín- Benito, J. M. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. 3ª. ed. Madrid, España, Mundi-Prensa. 581 p.
48. Trout, T. J. 1996. Furrow irrigation erosion and sedimentation: on-field distribution. Transactions of the ASAE. 39:1717-1723.
49. _____.; Kinckaid, .C. 2007. On farm system design and operation and land management. In: Lascano, R. J. ed. Irrigation of agricultural crops. 2nd. ed. Madison, WI, ASA. pp. 133-180 (Monograph no. 30).
50. Villalobos, A. M. 2005. Diseño de drenaje superficial. Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica. pp. 28-32.
51. Walker, W. R.; Skogerboe, G. V. 1987. Surface Irrigation: theory and Practice. (en línea). Englewood Cliffs, NJ, USA, Prentice-Hall. 386 p. Consultado nov. 2018. Disponible en <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19872432240>
52. _____.; Prestwich, B.; Spofford, T. 2006. Development of therevised USDA–NRCS intake families for surface irrigation. Agricultural Water Management. 85 (1-2):157-164

9. ANEXO

Cuadro No. 1. Base de datos de la eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución calculado y simulado para los distintos eventos de riego realizados en el periodo experimental

Riego	Repetición	Fecha	Calculado		Simulado	
			EAP	UD	EAP	UD
T20						
1	1	2/01/2012	96,6	73,7	93,0	93,0
2	1	6/01/2012	57,0	76,6	59,0	72,0
3	1	9/01/2012	74,7	.	73,0	72,0
4	1	13/01/2012	28,3	80,0	28,0	80,0
5	1	16/01/2012	51,5	74,1	55,0	76,00
6	1	19/01/2012	93,1	84,3	89,0	84,0
7	1	23/01/2012	20,4	75,3	21,0	76,0
8	1	27/01/2012	94,0	97,0	90,0	88,0
9	1	30/01/2012	93,1	96,6	76,0	27,0
1	8	2/01/2012	74,6	69,4	73,0	76,0
2	8	6/01/2012	73,8	80,4	74,0	80,0
3	8	9/01/2012	95,8	.	82,0	91,0
4	8	13/01/2012	58,8	87,1	59,0	87,0
5	8	16/01/2012	57,0	92,9	55,0	64,0
6	8	19/01/2012	44,2	73,7	44,0	68,0
7	8	23/01/2012	19,2	86,9	19,0	68,0
8	8	27/01/2012	64,5	81,4	64,0	77,0
9	8	30/01/2012	74,5	99,5	74,0	84,0
1	10	2/01/2012	57,3	58,6	50,0	34,0
2	10	6/01/2012	70,6	.	70,0	82,0
3	10	9/01/2012	86,0	.	83,0	90,0
4	10	13/01/2012	44,6	.	44,0	81,0
5	10	16/01/2012	81,7	86,8	79,0	75,0
6	10	19/01/2012	80,4	.	79,0	81,0
7	10	23/01/2012	36,1	.	36,0	76,0
8	10	27/01/2012	87,4	99,1	84,0	92,0
9	10	30/01/2012	82,8	.	81,0	88,0
T40						
1	3	6/01/2012	81,2	82,8	72,0	46,0
2	3	13/01/2012	70,4	97,4	93,0	76,0
1	12	6/01/2012	56,7	90,1	54,0	55,0
2	12	13/01/2012	90,0	.	86,0	80,0
3	12	19/01/2012	87,5	96,3	83,0	69,0
2	4	9/01/2012	100,0	94,9	93,0	74,0
T60						
3	4	16/01/2012	82,0	.	79,0	73,0
2	6	9/01/2012	75,4	72,4	72,0	64,0
3	6	16/01/2012	57,0	94,3	57,0	72,0
3	9	16/01/2012	68,4	92,9	68,0	73,0