

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RESPUESTA FÍSICA AL RIEGO SUPLEMENTARIO Y DESARROLLO
DE TECNOLOGÍAS DE RIEGO POR MELGAS EN PASTURAS
ARTIFICIALES**

por

Andrés Domingo BOURDIN MEDICI

Juan Matías FRANCO FRAGUAS SOUTO

Mauricio José BURGOS VALIENTE

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2015**

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Claudio García Gallareta

Ing. Agr. Lucía Puppo

Ing. Agr. Sylvia Saldanha

Fecha: 27 de marzo del 2015

Autores:

Andrés Domingo Bourdin Médici

Juan Matías Franco Fraguas Souto

Mauricio José Burgos Valiente

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Agr. Mario García por la guía y el apoyo brindado para este trabajo.

A nuestro Director Ing. Agr. Claudio García, por su disposición de tiempo y gran ayuda brindada tanto en trabajo de campo como en análisis.

A la Ing. Agr. Sylvia Saldanha, por su disposición, aporte y colaboración al momento de análisis y proceso tanto de muestras como de datos de la pastura.

A la empresa Donistar S. en C. por permitirnos realizar los ensayos en su establecimiento y brindarnos materiales e insumos y mano de obra necesarios para llevar adelante este proyecto, así como también el usufructo de sus instalaciones.

A Ph. D Bautista por brindarnos dedicación y tiempo, con el fin de explicar y hacer un uso adecuado de su software.

A nuestras familias, y amigos por el apoyo en estos años de carrera.

**A NUESTRA FAMILIA Y AMIGOS
EN ESPECIAL A MARIO GARCÍA PETILLO**

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	IX
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. INTRODUCCIÓN.....	2
2.2. MÉTODOS DE RIEGO.....	3
2.2.1. <u>Riego por superficie</u>	5
2.2.1.1. Riego por canteros.....	6
2.2.1.2. Riego por surcos.....	6
2.2.1.3. Riego por melgas.....	8
2.3. TECNOLOGÍA DE RIEGO POR MELGAS.....	10
2.3.1. <u>Curvas de avance y de receso</u>	10
2.3.2. <u>Parámetros de riego: caudales, tiempo de oportunidad, uniformidad de distribución e infiltración</u>	11
2.3.3. <u>Modelos de simulación</u>	14
2.3.4. <u>Evaluación del riego</u>	15
2.4. RESPUESTA DE LAS PASTURAS SEMBRADAS AL RIEGO ...	17
2.4.1. <u>Leguminosas anuales y perenes</u>	18
2.4.2. <u>Gramíneas anuales y perenes</u>	23

3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	24
3.1. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO.....	24
3.1.1. <u>Ubicación</u>	24
3.1.2. <u>Antecedentes de la chacra</u>	24
3.1.3. <u>Siembra</u>	24
3.1.4. <u>Fertilización</u>	24
3.1.5. <u>Control de malezas, enfermedades y plagas</u>	24
3.1.6. <u>Preparación del suelo</u>	25
3.1.7. <u>Características del ensayo</u>	25
3.1.8. <u>Materiales utilizados</u>	25
3.1.9. <u>Descripción del método de riego</u>	26
3.1.10. <u>Recomendación de riego</u>	28
3.1.11. <u>Diseño experimental</u>	28
3.2. DETERMINACIONES.....	28
3.2.1. <u>Pasturas</u>	28
3.2.2. <u>Riego y precipitaciones</u>	30
3.2.3. <u>Suelo</u>	31
3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	33
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	34
4.1. DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO.....	34
4.1.1. <u>Precipitaciones</u>	36
4.1.2. <u>Temperaturas</u>	37

4.1.3. <u>Evapotranspiración y balance hídrico</u>	38
4.2. PARÁMETROS DEL RIEGO POR MELGAS.....	40
4.2.1. <u>Curvas de avance y receso</u>	40
4.2.2. <u>Tiempo de oportunidad</u>	41
4.2.3. <u>Uniformidad de distribución</u>	42
4.2.4. <u>Eficiencia de aplicación y cuantificación de pérdidas</u>	43
4.2.5. <u>Caudales</u>	44
4.2.6. <u>Lámina de riego</u>	45
4.2.7. <u>Resultados de riego con Winsfr 4.13</u>	46
4.3. PASTURA.....	48
4.3.1. <u>Evapotranspiración del cultivo</u>	48
4.3.2. <u>Biomasa de forraje pre y post pastoreo</u>	50
4.3.3. <u>Tasa de crecimiento</u>	51
4.3.4. <u>Respuesta al riego</u>	52
4.3.5. <u>Eficiencia en uso de agua</u>	53
4.4. SUELO.....	54
4.4.1. <u>Curvas de infiltración</u>	54
4.4.2. <u>Evolución de la humedad en perfil</u>	55
5. <u>CONCLUSIONES</u>	59
6. <u>RESUMEN</u>	60
7. <u>SUMMARY</u>	62
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	64

9. <u>ANEXOS</u>	68
------------------------	----

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Factores que favorecen la elección del método de riego.....	4
2. Producción de forraje ($t\ MS.ha^{-1}$) para 1º año de trébol rojo cultivar LE 116 en tres regímenes hídricos y lámina neta.....	20
3. Producción acumulada de forraje (primavera – verano) para tres especies en su 2º año para el año 1999/2000.....	21
4. Producción de semilla para dos especies bajo dos régimen hídricos.....	22
5. Largo, ancho y superficie de cada franja y litros totales a aplicar en cada riego para reponer 40 mm evapotranspirados...	27
6. ETo, mm totales, números de riegos y mm promedios aplicados en los 9 riegos.....	27
7. Calculo de uniformidad de distribución para riego del 31/12/10.....	43
8. Eficiencia de aplicación, pérdidas por percolación y escurrimiento.....	43
9. Caudales en $L.s^{-1}.m^{-1}$ obtenidos en cada evento de riego, con sus respectivos promedios y calculado el promedio para todos los eventos de riego.....	44
10. Lámina total aplicada (mm) a cada tratamiento, caudal promedio ($L.s^{-1}$) y número de riegos realizados para cada tratamiento durante la zafra 2010-11, Salto 2011.....	46
11. Resultados simulados de EA, UD, P y E promedio por tratamiento para los cuatro eventos mencionados	

arriba tomados al azar de un total de 9 eventos para todo el período del ensayo de riego.....	46
12. Comparación de datos obtenidos de EA (%) y cuantificación de pérdidas por percolación, calculados vs. obtenidos por el software WinSRFR.....	47
13. Rangos de kg de MS acumulada y su respectivo Kc.....	48

Figura No.

1. Representación esquemática de vista aérea y con frente de avance y de receso del agua en la melga al momento del riego.....	32
2. Precipitación y evapotranspiración media mensual (1984-2011).....	35
3. Precipitación y ETo promedios mensuales con máximos y mínimos (1984-2011).....	36
4. Comparación de precipitaciones del promedio de la serie histórica vs. período de evaluaciones en ensayo.....	37
5. Comparación de temperaturas del promedio de la serie histórica vs. período del ensayo.....	38
6. Comparación de evapotranspiración del promedio de la serie histórica vs. período del ensayo.....	39

7. Evapotranspiración (ET _o) vs. precipitaciones (PP) en mm presentadas durante el período del ensayo.....	40
8. Curvas de tiempos de avance y receso del agua para tratamientos de 6, 9 y 12 m de ancho de melga.....	41
9. Tiempos de oportunidad promedio para los tres tratamientos de anchos 6 m, 9 m y 12 m regados.....	42
10. Caudal de entrada a los distintos tratamientos (6, 9 y 12m) “Q”, expresada en L.s ⁻¹ .m ⁻¹ de ancho para los tratamientos regados.....	45
11. Evolución de la ET _o y la ET _c durante el período del ensayo.....	49
12. Milímetros acumulados mensuales de ET _c , ET _o , riego y precipitaciones.....	50
13. Cantidad de forraje KgMS.ha ⁻¹ en 5 momentos (1 Inicial, 2 de Disponibles y 2 Remanentes); con la cantidad de agua acumulada precipitación + riego en los distintos momentos para cada uno de los tratamientos.....	51
14. Tasa de crecimiento medida en 2 etapas, en KgMS.ha ⁻¹ .d ⁻¹	52
15. Producción de materia seca para los tratamientos, en KgMS.ha ⁻¹	53
16. Eficiencia de uso del agua en Kg MS.ha ⁻¹ .mm ⁻¹ de riego + precipitación.....	54
17. Curvas de infiltración obtenidas para el suelo del ensayo.....	55

18. Evolución de la humedad (% Vol) para tres profundidades (10,30 y 50 cm) en el tratamiento de 6 m de ancho de melga.....	56
19. Evolución de la humedad (% Vol) para tres profundidades (10,30 y 50 cm) en el tratamiento de 9 m de ancho de melga.....	57
20. Evolución de la humedad (% Vol) para tres profundidades (10,30 y 50 cm) en el tratamiento de 12 m de ancho de melga.....	58

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la base de datos existentes en el país, se constata un déficit hídrico acumulado entre los meses de octubre a marzo en el promedio de los años (1973-2005) entre 180 a 240 mm según García (2010). La persistencia y productividad de las praderas sembradas se ve afectada por la ocurrencia de déficits hídricos cuando estos ocurren en primavera (máximas tasas de crecimiento) y/o verano (período en que presentan el mínimo número de meristemas).

La superficie bajo riego en Uruguay ha aumentado en las últimas décadas. Si se considera el período 1970-2000, la superficie bajo riego en Uruguay muestra una evolución creciente significativa. Durante ese período las hectáreas regadas se cuadruplicaron pasando de 52.000 hectáreas en 1970 a 218.000 hectáreas regadas en el año 2000. El crecimiento de la demanda de agua para riego entre 1970 y 2000 se vincula fundamentalmente al crecimiento del sector arrocero. Sin embargo a partir del año 2000 las hectáreas de arroz disminuyeron levemente, por lo que el aumento de riego en otros cultivos habría cobrado mayor relevancia en el total de la superficie regada (Failde, 2013, ver anexo 1).

El riego suplementario aplicado a especies forrajeras debe ser concebido como una herramienta tecnológica, no sólo para atenuar las faltas de lluvias en períodos breves, pero críticos en cuanto a sus efectos sobre la productividad y persistencia, 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. Para que el riego por superficie sea viable en forma masiva, se deben generar tecnologías que permitan adecuar el método de riego al sistema de preparación de suelos y su conservación. En este caso, se deben ajustar parámetros del método tales como: caudales, longitudes de melgas y pendientes, para diferentes tipos de suelos.

La generación de conocimientos sobre el método de riego por superficie permitirá desarrollar tecnologías adaptadas a las condiciones económicas, culturales y agronómicas del país. Estas tecnologías deberán maximizar la eficiencia del uso del agua, optimizar los rendimientos de los sistemas de producción, conservar los recursos suelo y agua, ser de fácil operación, de reducidos costos de inversión y bajo consumo energético.

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar tecnologías de riego por melgas (también llamadas bordos) tendientes al aumento de la eficiencia de uso tanto del agua como de la mano de obra y de la uniformidad del riego.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUCCIÓN

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. 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% de aporte para la persistencia y/o producción de materia seca en cantidad y calidad de algunas forrajeras utilizadas en nuestros sistemas de producción (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 et al., 2010).

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, que determina una mayor retención del agua en el suelo a tensiones no disponibles para las plantas (Pérez Gomar, 2004).

La temperatura media anual en 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. 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 (Castaño et al., 2011).

Los valores medios de precipitación acumulada anual sobre el país se sitúan entre 1200 y 1600 mm con los menores valores situados al suroeste (departamento de Colonia) y los máximos al noreste (departamentos de Rivera y Artigas). Considerando los valores acumulados de la lluvia través del año, no existe ni una estación seca ni una estación lluviosa definida (régimen isohigro), registrándose acumulados medios mensuales entre 60 mm.mes⁻¹ (litoral oeste en invierno) y 140 mm.mes⁻¹ (noroeste en abril y octubre). Los valores mensuales de precipitación registrados en un año particular, se pueden apartar considerablemente de estos promedios dada la 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⁻¹ y máximos superiores en todos los meses a los 250 mm/mes (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). 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 Gomar, 2004).

La utilización del riego con un criterio estratégico, puede permitir una mayor estabilidad de la producción y persistencia de los mejoramientos. Su adopción depende de la relación costo-beneficio que implique la realización de la misma. La magnitud de las inversiones así como la probabilidad de retorno inmediato de dichas inversiones en los mejoramientos de campo, han determinado 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 en la rotación arroz-pasturas. Esto justifica conocer las relaciones físicas entre el régimen hídrico y producción de forraje en los suelos de mayor potencial de la región ya que no existe información. En zonas agrícolas-ganaderas Sawchick y Formoso (2000), Formoso y Sawchick (2000), presentan resultados de respuesta a riego en producción de forraje y de semillas de diferentes especies de leguminosas (Pérez Gomar, 2004).

2.2. MÉTODOS DE RIEGO

Se suele referir tanto a los métodos de riego como a los sistemas de riego como sinónimos, por eso creemos conveniente hacer una distinción; se entiende por método de riego al conjunto de aspectos que caracterizan 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.

Los métodos de riego pueden clasificarse del siguiente modo (Pereira y Trout, citados por Pereira et al., 2010):

- Riego de superficie, o por gravedad, comprendiendo el riego por inundación, en canteros tradicionales y surcos cortos o en canteros con nivelado de precisión, el riego por sumersión en canteros para arroz, el riego por infiltración en surcos o en melgas y el riego por escorrentía libre.
- Riego por aspersión, con sistemas estáticos y disposición en cuadrícula, fija o móvil, con sistemas móviles de cañón o ala sobre carro tirada por enrollador o por cable, y sistemas de lateral móvil, pivotante o de desplazamiento lineal.
- Riego localizado, o microriego, comprendiendo el riego por goteo, por difusores o borboteadores (“bubblers”), por tubos perforados o porosos, la micro-aspersión y el riego sub-superficial por tubos perforados y tubos porosos.
- Riego subterráneo, realizado por control de la profundidad de la capa freática.

Cuadro No. 1. Factores que favorecen la elección del método de riego

Factores	Riego por superficie	Aspersión	Riego localizado
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro del agua	Irregular	regular	continuo
Disponibilidad del agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza del agua	No limitante	Sin sólidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad al déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de la producción	Bajo	Medio	Alto
Costo de la mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Costo de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad de capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Fuente: Pereira y Trout (1999)

2.2.1. Riego por superficie

El riego por superficie o por gravedad continúa teniendo una importancia relevante en el desarrollo de los regadíos, no solo porque corresponde al 80 % de las áreas regadas en el mundo, sino porque continúa siendo el método más apropiado técnicamente para suelos llanos y pesados y es económicamente viable para muchos cultivos y sistemas de producción (Pereira et al., 2010).

El desarrollo del riego por superficie en el transcurrir del tiempo se ha visto afectado por la evolución de los costos de la energía. Cuando éstos disminuyen provocan el desarrollo de equipos de alta presión como los de aspersión, en detrimento del desarrollo del riego por gravedad. Sin embargo cuando la energía se vuelve cara, se desarrolla nuevamente el riego por gravedad. Existen mejoras en las redes de distribución (Pereira et al., citados por Pereira et al., 2010), en la nivelación de precisión por láser que permite regar con uniformidad grandes áreas, con equipamientos de automatización del riego que han resuelto problemas asociados a los altos consumos de mano de obra. Es el caso del desarrollo y modernización del riego por superficie en EE.UU, Canadá y Australia (Pereira et al., 2010).

El riego por superficie ha continuado siendo objeto de investigación para la mejora de los procesos y prácticas de riego. Se han desarrollado métodos de evaluación (Merriam y Keller, Walker y Skogerboe, citados por Pereira et al., 2010) para permitir la obtención de indicadores de funcionamiento de los sistemas y, sobretudo, para fundamentar los cambios a introducir para mejorar el uso y la productividad del agua en los regadíos (Li, Fabiao et al., citados por Pereira et al., 2010).

Según García Petillo (2010) en las condiciones climáticas del 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.

Siguiendo con lo anterior se afirma 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 Petillo, 2010).

Los sistemas de riego por gravedad son muchos, en correspondencia con los procesos de aplicación del agua a las parcelas regadas. Estos se resumen esencialmente a los sistemas de surcos, canteros, melgas, surcos a

nivel y riego de esparcimiento. Los tres primeros son los más importantes (Pereira et al., 2010).

2.2.1.1. Riego por canteros

Es el método más utilizado en todo el mundo (Trout y Kincaid 2007, Pereira et al. 2010). Consiste en aplicar agua a parcelas generalmente rectangulares, con pendiente casi nula, circundadas por lomos, caballones o albardillas que impiden que el agua pase a otra parcela. La mayoría de los canteros usados en el mundo son pequeños (menor a 1 ha) (Trout y Kincaid, 2007). Los canteros pueden ser utilizados para el riego de arroz por inundación permanente (Trout y Kincaid 2007, Pereira et al. 2010) o para el riego de otros cultivos, incluyendo frutales, por inundación temporal (Pereira et al., 2010).

El riego por cantero es más adecuado en suelos con moderada a baja tasa de infiltración de modo que el agua se disperse rápidamente a través del cantero, y riegos más grandes pueden ser aplicados en suelos que poseen una alta capacidad de almacenar agua, en estas condiciones el agua se infiltra más uniformemente (Trout y Kincaid 2007, Pereira et al. 2010). El agua aplicada en la mayoría de los casos supera los 50 mm y a menudo supera los 100 mm de lámina (Dedrick, citado por Trout y Kincaid, 2007). Otros autores mencionan láminas de 100 a 150 mm o incluso mayores cuando la irregularidad de la superficie lo amerita o cuando se usan canteros siguiendo las curvas de nivel (Pereira et al., 2010).

Los caudales de entrada deben ser relativamente altos (mayor a 2 L.s^{-1} . m de ancho) permitiendo alcanzar rápidamente inundaciones y por lo tanto proveer de un tiempo de oportunidad uniforme para la infiltración a lo largo del cantero (Dedrick, citado por Trout y Kincaid, 2007).

2.2.1.2. Riego por surcos

En estos sistemas el agua corre lentamente y se infiltra a través de los surcos, pequeños canales abiertos regularmente, equidistantes, en el sentido de la mayor distancia. Los surcos deben tener pendiente suave y uniforme y ser alimentados por pequeños caudales para que la mayor parte del agua que escurre por ellos se vaya infiltrando uniformemente a lo largo de la parcela (Pereira et al., 2010).

Este método es la forma más común de riego por superficie en EEUU, pero es menos común en el resto del mundo (Trout y Kincaid, 2007).

El espacio entre surco es limitado por la extensión del movimiento lateral del agua infiltrada y la distribución radicular del cultivo. Los suelos de textura fina y con zona de arraigamiento profundo permiten surcos ampliamente espaciados. El espacio de los surcos en las hileras de los cultivos varía desde 0,6 a 1,6 m. En frutales, solo un surco puede ser necesario sobre cada lado de cada fila de árbol (Trout y Kincaid, 2007).

El riego por surcos es usualmente dirigido a lo largo de la pendiente predominante en el campo. Este método es usado en pendientes que varían de 0,1 a 3%. Generalmente no es económico o atractivo mover el suelo para lograr un cambio significativo de la pendiente del campo, sin embargo es beneficioso mover el suelo para crear pendientes uniformes para el riego por surcos. Las pendientes transversales o los surcos en contorno reducen la pendiente de los surcos (Trout y Kincaid, 2007).

En ese sentido Durán y García Petillo (2007) en Uruguay desarrollaron una metodología de sistematización de tierras y un equipamiento para riegos por surcos para topografías accidentadas con pendientes entre 2,0 a 7%. Ambos son especialmente adaptados para la producción intensiva en pequeñas explotaciones. El mismo se implementa mediante un sistema de terrazas paralelas de pendiente variable (entre 0,5% y 1,75%), con surcos paralelos a las mismas.

Dado que la pendiente del surco y la tasa de infiltración del suelo ésta determinado por el campo y por el suelo, básicamente el diseño de los surcos implica principalmente determinar una correcta longitud del surco y un caudal adecuado (Trout y Kincaid, 2007).

Las longitudes de surco más comunes son de 200 a 400 m. Las longitudes más cortas son necesarias para reducir el tiempo de avance cuando la tasa de infiltración es alta. También las longitudes menores pueden ser útiles cuando es necesario reducir el caudal de entrada en situaciones de alta pendiente y suelos con riesgo de erosión (Trout y Kincaid, 2007).

El tiempo de recesión en el riego por surcos es generalmente corto debido a que el volumen de agua reservado en la superficie del suelo es pequeño y la resistencia al fluido en el surco es baja. Consecuentemente la uniformidad de distribución del agua depende de la velocidad de avance del agua a través del campo, requiriendo altos caudales porque solo una porción de la superficie del suelo es mojada. Si se reduce la tasa de aplicación de agua, el tiempo de entrada debería alargarse para asegurar una adecuada aplicación de agua en el extremo final de los surcos (Trout y Kincaid, 2007).

La eficiencia del riego depende de la selección del caudal de entrada a los surcos en equilibrio con la velocidad de avance. Caudales altos generan un rápido avance y una buena uniformidad de distribución pero tienen mayores pérdidas por escorrentía. Con caudales bajos ocurre lo contrario, se reduce la pérdida por escorrentía al reducir la velocidad de avance pero empeora la uniformidad de distribución (Trout y Kincaid, 2007).

Los caudales de entrada de los surcos generalmente son seleccionados en el rango de 0,2 a 1,2 L.s⁻¹ de modo que la fase de avance es 20 a 50 % del tiempo de riego (Trout y Kincaid, 2007).

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).

Como la infiltración varía temporalmente y es difícil de predecir, los sistemas de riego por surco deben ser diseñados para funcionar a través de una amplia gama de caudales de entrada. Riegos por surcos eficientes requieren de monitoreo del proceso de riego y del ajuste de caudales (Trout y Kincaid, 2007).

2.2.1.3. Riego por melgas

En el riego por melgas, el campo se divide en melgas, o sea en parcelas rectangulares estrechas y largas, bordeadas lateralmente por camellones (“borders” en inglés, lo que da el nombre al método), donde el agua es aplicada y escurre a lo largo de su recorrido al mismo tiempo que se va infiltrando.

Se usa para cultivos densos tales como cereales, cultivos forrajeros y praderas, así como para frutales y viñas. El método se adapta bien a terrenos de pendientes suaves menor o igual al 0,5%, 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 (Trout y Kincaid, 2007).

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 el flujo no se dispersa en forma pareja (Trout y Kincaid, 2007).

En cuanto al diseño de la pendiente de las melgas por el USDA. SCS (Servicio de conservación de suelo), se basa en el tiempo en el cual el agua

está disponible para la infiltración (tiempo de oportunidad) arriba y al final de la melga (Clemmens, 1981).

El ancho de las melgas es limitado por pendientes transversales y por el caudal disponible. La diferencia en altura a través de la melga debería ser menor al 30% de la altura de la lámina para asegurar una adecuada cobertura de agua (Trout y Kincaid, 2007).

El ancho de la melga es limitado por la pendiente transversal del campo o por la cantidad de movimiento de tierra requerido para eliminar la pendiente transversal (Trout y Kincaid, 2007). La pendiente transversal suma complicaciones al método (Clemmens, 1981).

El ancho de las melgas debe ser 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 m. En fruticultura el ancho lo determina el espacio de la entre fila de árboles.

La longitud de las melgas depende de la capacidad de infiltración del suelo, de la pendiente y del caudal disponible (Pereira et al., 2010).

La longitud de las melgas 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.

Según Trout y Kincaid (2007) 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 (Trout y Kincaid, 2007).

En el riego por melga, 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 (Trout y Kincaid, 2007).

Una forma práctica para cortar el riego en la melga es cuando el agua ha recorrido gran porcentaje de la misma por ejemplo 80 a 90% de la longitud (Trout y Kincaid 2007, Merot et al. 2008).

El extremo final de las melgas aguas abajo puede estar cerrado o abierto. Las melgas que son cerradas al final, requieren mayor precisión en el corte del agua para evitar el encharcamiento y también pueden requerir drenaje en el caso de precipitaciones excesivas. Las melgas abiertas requieren sistemas de drenaje y recolección y re uso del agua de escorrentía.

Coincidiendo en parte con lo anterior Trout y Kincaid (2007) afirman que 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 EEUU 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. A su vez muchos campos se han pasado al riego por aspersión y en la fruticultura al micro-riego (Trout y Kincaid, 2007).

2.3. TECNOLOGÍA DE RIEGO POR MELGAS

2.3.1. Curvas de avance y de receso

Fases de riego según Strelkoff (1977), al comenzar a aplicar agua en el extremo superior de la parcela, comienza la fase de avance. Esta fase termina cuando el agua alcanza el extremo inferior de la parcela. Si la entrada de agua no ha sido cortada, en ese momento comienza una fase casi estacionaria llamada "la fase continua". Si el final de la parcela no está bloqueado el agua escurre por ejemplo a una zona de drenaje. Si hay un bloqueo que no permite el escurrimiento, el agua se estancará en él. Cuando se corta el flujo de agua, la fase de agotamiento comienza. Esta está marcada por una disminución de la lámina de agua en la parte superior de la parcela. La reducción de la lámina de agua a cero en la parte superior de la parcela indica el comienzo de la recesión. Cuando la recesión llega al borde inferior de la parcela el riego se considera terminado.

Según Foroud et al. (1995) las variaciones en las tasas de avance en los ensayos eran grandes 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 nueve parcelas o melgas evaluadas (Foroud et al., 1995).

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). Las mediciones no toman en cuenta las variaciones aleatorias de las propiedades físicas del suelo y las características fisiográficas, fenómenos de infiltración subyacentes. Son necesarias un gran número de mediciones a campo que son laboriosas y consumen mucho tiempo, para superar el problema relacionado con el suelo y la variabilidad de representar un campo promedio (Foroud et al., 1995).

2.3.2. Parámetros de riego: caudales, tiempo de oportunidad, uniformidad de distribución e infiltración

Con caudales pequeños la fase de avance se alarga tanto que, en los sistemas tradicionales el corte de la alimentación coincide con el fin de avance. En estas condiciones de tiempo de avance alargado, el tiempo de oportunidad de infiltración T 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. Es mayor en la parte inicial que en la del extremo aguas abajo, resultando una curva de infiltración (z) no uniforme, con mayor infiltración al inicio que en el extremo (Pereira et al., 2010).

Los sistemas de riego por gravedad son muchos, estos se resumen a los sistemas de surcos, canteros, melgas, surcos a nivel y riego de esparcimiento. Los tres primeros son los principales. Los sistemas de surcos y melgas son llamados de infiltración porque se aplican caudales suficientemente grandes para que el agua fluya sobre el terreno y suficientemente pequeños para que se vaya infiltrando mientras fluye, de forma que el agua deja de estar sobre el terreno en cuanto se corta el suministro. Se trata de riego de larga duración al contrario del riego por canteros (Pereira et al., 2010).

La dosis de agua a aportar es fácil de controlar puesto que se conoce el caudal, estimándose a través del producto del caudal por el tiempo de aplicación, dividido por el área regada (Pereira et al., 2010).

Los caudales deben ser suficientemente grandes para que el avance sea rápido generalmente, mayor a 2 L.s^{-1} por metro de ancho y preferiblemente mayor a $4 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ lo que es fácil 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 (Pereira et al., 2010).

Los caudales aplicados en riego por melgas, son inferiores a los usados en el riego por canteros, pero superiores al de los surcos, el agua debe avanzar lentamente para irse infiltrando y por tanto se va esparciendo uniformemente en toda la anchura 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 él crecen. Además de eso los caudales no deben ser erosivos sobre todo cuando el riego se hace en suelo desnudo. Los caudales se sitúan frecuentemente en el intervalo $1,5$ a $2 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$, según la infiltración de los suelos y la pendiente, con el que se relacionan de forma semejante a lo referido para los surcos. Al ser los caudales relativamente elevados, y las melgas abiertas en la extremo aguas abajo, los caudales drenados en el extremo aguas abajo son relativamente importantes, generalmente superiores a los de surcos, 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 (Pereira et al., 2010).

El ancho de las melgas depende principalmente 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 la anchura 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 $< 30\%$ 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; es tanto mayor cuanto mayor es la altura de la lámina de escurrimiento, lo que sucede cuando la pendiente longitudinal es pequeña, así como cuando los caudales sean elevados y la rugosidad causada por las plantas sea alta, también. 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 (Pereira et al., 2010).

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. Generalmente se sitúan entre 100 y 200 m , pudiendo alcanzar 400 m cuando la infiltración es pequeña y los caudales son relativamente elevados (Pereira et al., 2010).

Los caudales demasiado fuertes, la baja infiltración, o las longitudes demasiado cortas, dan lugar a avances muy rápidos, con escurrimiento demasiado rápido en la fase de llenado, con el consiguiente exceso de infiltración aguas abajo y sobre todo fuerte escorrentía en dicha zona. 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).

La infiltración es quizás el proceso más crucial, afecta 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, y es importante en la estimación de la descarga de agua óptima que se debe hacer a la parcela (Walker et al., 2006).

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 Elliott 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 queda sub humedecida (Pereira et al., 2010).

Para conseguir un buen funcionamiento en el riego por melgas (que la infiltración sea uniforme a lo largo de su distancia y anchura), es necesario que el agua avance suficientemente deprisa. 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).

2.3.3. Modelos de simulación

Son varios los autores que apuntalan la investigación actual en el desarrollo de los modelos de simulación de riego por superficie (Wohling et al., Eldeiry et al., Mailhol et al., Mateos y Oyonarte, Walker, citados por Durán y García Petillo 2007, Walker y Skogerboe, citados por Pereira et al. 2010), en general con base en experimentos de campo Horst et al., citados por Durán y García Petillo (2007).

Desde 1970 el USDA. ARS (Agriculture Research Service) ha estado involucrado en el desarrollo de modelos de simulación hidráulicos y herramientas de software para el análisis de los sistemas de riego por superficie.

Los modelos de simulación tienen numerosas opciones de configuración, pendiente, sección transversal, geometría, rugosidad, características de infiltración y tasa de caudal de entrada (Bautista et al., 2009).

Un software moderno para el análisis de sistemas de riego por superficie es winSRFR que tiene como funciones el análisis de eventos, análisis de operación, diseño físico y simulación (Bautista et al., 2009).

Las funciones y organización de winSRFR se basan en el típico proceso analítico asesorando y mejorando la performance de sistemas de riego por superficie (Bautista et al., 2009).

El módulo “Análisis de evento” cuenta con tres opciones como método de análisis:

- a- 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;
- b- un balance de volumen post-riego que se basa en medidas de avance y receso y
- c- una fase de avance de volumen de agua basada en el método de dos puntos de Elliott y Walker (1982).

Con el software los usuarios pueden analizar el rendimiento del riego, eventos y parámetros de infiltración promedio a campo, y hacer una estimación basada en datos de campos medidos, diseño y formulación de alternativas operativas.

WinSRFR es principalmente una herramienta práctica pero también puede servir como base para futuras técnicas y para el desarrollo de modelos hidráulicos y técnicas de análisis para el riego por superficie (Bautista et al., 2009).

El primer paso en el proceso analítico es evaluar el rendimiento de los datos medidos o recabados en el campo. De ahí que el módulo de análisis puede resumir, graficar y analizar los datos recabados del campo.

Elliott y Walker (1982), mencionan que la investigación en sistemas de riego por surcos es un proceso que consume tiempo, sin embargo ese tiempo puede ser acortado sin una excesiva pérdida de precisión en la transformación de los datos de campo en modelos de simulación.

Por otra parte, trabajando con otro modelo de simulación García Petillo (2010) simuló con WinISAREG, el balance hídrico de un cultivo de maíz utilizando una serie climática de 33 años (1975/2007) con datos diarios de precipitación y evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), regado con riego localizado (lámina neta, LN 6 mm) y con riego “tradicional” (riego por superficie) (LN 42 mm). Haciendo un análisis de frecuencia el autor encontró que para cubrir las necesidades en el 50 % de los años, el método tradicional requirió 388 mm de riego en la temporada, mientras que el localizado requirió 545 mm (40 % más). Por cada mm de lluvia adicional en la temporada, las necesidades de riego “tradicional” se reducen en 0,44 mm, mientras que en el caso del riego localizado esta reducción es de sólo 0,33 mm.

2.3.4. Evaluación del riego

La evaluación del riego por superficie es esencial para plantear modificaciones de las prácticas de riego que mejoren el funcionamiento de los sistemas de aplicación del agua a la parcela, estimando 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:

- a) 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 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 (Walker y Skogerboe 1987, Clemmens et al. 2001) colocados en las secciones de entrada, de salida y en los tercios cuartos de la longitud total.

- b) Duración de las fases de riego para obtener las curvas de avance y receso, se realiza por observación directa de los instantes en que el agua alcanza (avance) secciones situadas a intervalos regulares, 10 a 20 m, a partir del inicio del cantero o surco y los instantes en que el agua desaparece (receso) después del riego en las mismas secciones. Se deben observar dos a tres perfiles longitudinales en el caso de canteros anchos.
- c) Déficit de humedad del suelo antes y después del riego y su capacidad de almacenamiento. Generalmente se estima por el método gravimétrico en cada muestra, o por simple comprobación al tacto del suelo extraído con la sonda toma-muestras hasta la profundidad de almacenamiento de agua. Cuando se hace con precisión, permite estimar adecuadamente las láminas infiltradas a lo largo del surco o cantero y validar la modelación.
- d) Pendiente y condiciones micro topográficas que caracterizan el estado de nivelación del terreno (perfil longitudinal de la sección de escurrimiento) se hace con equipamiento topográfico simple pero efectuando observaciones de las de un perfil longitudinal en melgas y canteros.
- e) Geometría del surco, del cantero, o de la melga (perfil transversal de la sección de escurrimiento). En el caso de los surcos se utilizan perfilómetros que permitan precisión en el trazado de la sección transversal; para canteros y melgas se usa equipamiento topográfico.
- f) Infiltración. El método más simple es el del infiltrometro de doble anillo, pero traduce mal las condiciones que se verifican bajo la dinámica de riego. En los surcos se usan infiltrometros con o sin recirculación, o se recurre al balance de volumen (Walker y Skogerboe, 1987). En canteros y melgas se usa el cantero - infiltrometro (Sousa, 1990)
- g) Erosión y transporte de sedimentos, cuando las características del suelo lo aconsejan (Trout, 1996)
- h) Gestión del riego por el agricultor averiguando la forma de preparación de la parcela regada y los criterios que usa para decidir cuándo regar y cuánta agua aplicar.

La infiltración es lo más difícil de caracterizar. El uso de datos de evaluaciones de campo es esencial para estimar los parámetros de la ecuación de Kostiaikov. Para surcos con pendiente un procedimiento simple y eficaz, basado en el balance de volumen, es el llamado método de los dos puntos (Elliott y Walker, 1982), ya que se basa en medidas de solo dos secciones. La optimización de los parámetros basada en medidas de las curvas de avance y

recesión han sido aplicadas con éxito tanto para surcos como para canteros (Calejo et al. 1998, Li 1999), recurriendo a la técnica llamada del problema inverso, en la que el modelo funciona de forma iterativa hasta encontrar los parámetros de infiltración y rugosidad que mejor describen las curvas de avance y receso, puede usarse, conjuntamente, un modelo de optimización (Pereira et al., 2010).

2.4. RESPUESTA DE LAS PASTURAS SEMBRADAS AL RIEGO

La investigación en riego en Uruguay para cultivos extensivos del área agrícola – ganadera tradicional es escasa y se desarrolló principalmente en las décadas de los 70 y 80.

Los primeros estudios preliminares buscando generar información para una leguminosa forrajera, el trébol rojo (*Trifolium pratense*) sobre la respuesta al riego en producción de forraje y de semilla fueron llevados a cabo por Pritsch, Hofstadter y Gonnet en el período de 1974 a 1976.

En el reporte Pritsch et al. (1976), mencionaban las buenas condiciones del país para realizar el cultivo de maíz con riego y la necesidad de rotar con pasturas en un sistema también bajo riego.

Por otra parte se llevaron a cabo experimentos con el objetivo de seleccionar umbrales de riego óptimos para diferentes especies forrajeras como el de Hofstadter, citado por Sawchik y Formoso (2000) y el de Cardelino et al., citados por Sawchik y Formoso (2000).

La investigación en el litoral sur fue retomada luego de un largo período recién a fines de 1990 (Sawchick et al., 2010). Desde el año 1997 se han conducido diversos experimentos que tienen como objetivos la definición de umbrales de riego óptimos para distintas leguminosas, los potenciales de rendimiento de forraje alcanzables y 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/mm de agua agregada, siendo altamente significativo. La respuesta del mejoramiento de trébol blanco fue en promedio 7,2 kgMS.ha⁻¹mm⁻¹ de agua agregada, mientras que la del trébol rojo fue de 9,52 kgMS.ha⁻¹mm⁻¹ de agua agregada, resultando significativa la diferencia (Pérez Gomar, 2004).

Se observó mayor respuesta en los mejoramientos en 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 Gomar, 2004).

También se observa la caída general de producción de forraje de ambas leguminosas con el incremento de la resistencia a la penetración (RP). Por lo tanto es muy probable que la menor producción de forraje esté altamente explicada por menor disponibilidad de agua para las plantas asociadas a mayor RP (Pérez Gomar, 2004).

Los déficit hídricos que se manifiestan en el período estival se ven magnificados en suelos de basalto, por un lado por la variación de profundidad que presentan y por el otro su textura pesada o arcillosa determinan una mayor retención del agua en el suelo a tensiones no disponibles para las plantas (Pérez Gomar, 2004).

La producción forrajera anual es muy variable entre años, debido a las variaciones de los regímenes hídricos (Berretta y Bemhaja). A su vez existe una importante variación estacional en la producción de forraje, 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 la evapotranspiración, mientras que en condiciones de sequía extrema dicha producción puede ser muy baja o nula (Pérez Gomar, 2004).

2.4.1. Leguminosas anuales y perenes

La escasa persistencia de las leguminosas es un hecho constatado en el Uruguay. El trébol blanco (*Trifolium repens*), se comporta como una especie de vida corta, presenta un pico de producción en el segundo año y cuatro años con producciones sustancialmente bajas.

Los principales factores involucrados en su baja persistencia son principalmente de origen climático (altas temperaturas estivales asociadas a déficit hídricos superficiales) provocados principalmente por lo errático de las lluvias. El trébol blanco es más sensible a los déficit hídricos que otras leguminosas sembradas debido a la escasa profundidad radicular de sus estolones (Arana et al., 2000).

Los estudios de Archer y Robinson en Australia en situaciones de clima templado con lluvias de verano, encontraron resiembra exitosa de trébol blanco en un año de cada cinco. Los autores sugieren que esto se asocia con la desaparición del stand de plantas durante el verano y las buenas condiciones de humedad durante el otoño e invierno (Arana et al., 2000).

Luego del primer año de vida los estolones fueron el principal mecanismo de persistencia, los que aumentan en otoño e invierno y ciclos de descensos durante la primavera verano (Arana et al., 2000).

A pesar de las muchas variaciones posibles en su constitución botánica, se puede aceptar que la mezcla de *Lolium multiflorum* (RG), *Trifolium repens* (TB) y *Lotus corniculatus* (L) es una situación generalizable a la mayoría de los casos de la rotación arroz-pastura. Surgen dos aspectos a discutir. La adaptación de las especies utilizadas a una situación de riego y la factibilidad de manejar el agua en las condiciones que ofrece la cobertura clásica, desde el punto de vista del estado del piso y de la sistematización (Mas, 2004).

La situación opuesta la representa el L, por su ciclo sería el más importante en términos de capacidad de respuesta al riego, mencionándose como posibles limitantes algunos problemas de sanidad y persistencia que pueden incrementarse por imperfecciones del sistema referidos al drenaje (Mas, 2004).

Por su parte el TB ocupa una situación intermedia, ya que si bien es capaz de responder a estímulos hídricos durante el verano, los cultivares comúnmente utilizados son de ciclo invierno-primaveral, lo que establece una limitación fisiológica desde el punto de vista de la eficiencia de la respuesta productiva. Si bien el riego es independiente del crecimiento que logre la leguminosa durante el verano, puede ayudar a la sobrevivencia de plantas y estolones permitiendo un mejor inicio en el ciclo siguiente, también es posible que influya negativamente, a través de aspectos de orden sanitario y de competencia, fundamentalmente ejercida por gramíneas naturales de mejor adaptación al ambiente y por lo tanto altamente competitivas (Mas, 2004).

Paralelamente y durante los dos primeros años de evaluación el TB fue significativamente superior cuando no tuvo la competencia del L. Ambas leguminosas fueron importantes hasta el inicio de tercer año, disminuyendo su contribución a partir de ese momento hasta su desaparición en el quinto. A pesar de los niveles de humedad mantenidos al cuarto año ninguna de las dos leguminosas superaba el 5% del total de la composición de la mezcla, pudiendo llegar al 10% en tratamientos que incluían a las dos (Mas, 2004).

Parece razonable pensar en la utilización de especies de crecimiento estival, en lugar de forzar las invernales a estirar su ciclo a través del mantenimiento de condiciones de humedad en el suelo durante el verano mediante prácticas de riego (Mas, 2004).

En el año 97/98 estos tratamientos se aplicaron a tres especies: trébol rojo, alfalfa y lotus. En el cuadro 2 se presentan los rendimientos de forraje acumulado para trébol rojo.

Los umbrales de riego evaluados fueron de 40% (agotamiento del 60 % del agua disponible) y 75% (agotamiento del 25% del agua disponible). Esto determina la aplicación de láminas mayores de menor frecuencia y láminas menores de mayor frecuencia para uno y otro caso respectivamente.

Cuadro No. 2. Producción de forraje (t MS.ha⁻¹) para 1º año de trébol rojo cultivar LE 116 en tres regímenes hídricos y lámina neta aplicada.

Tratamiento	Secano	Riego 1 (Umbral 40%)	Riego 2 (Umbral 75%)
Producción acumulada (t MS.ha ⁻¹)	6.7	8.1	8.0
Rendimiento Relativo	100	119	118
Lámina neta aplicada		100	140

Fuente: Sawchik y Formoso (2000)

Los autores mencionados encontraron respuesta significativa al riego pero de baja magnitud (20%) comparado con el secano. Se considero para la reposición de la lámina una profundidad de arraigamiento de 40 cm. La producción de forraje corresponde al período del 3/11 al 31/3 de la estación de crecimiento.

De igual modo Hofstadter et al., citados por Hofstadter (1982) reportan para trébol blanco que los tratamientos con riego produjeron en el entorno de 18% más de forraje en el promedio de los años (1974/75 y 1975/76) comparado con el secano.

Siguiendo con lo reportado por Sawchick y Formoso (2000), para el caso de alfalfa cv. Crioula, los autores mencionan que no hubo diferencias significativas en producción de forraje para los tres regímenes hídricos. Los mismos autores destacan la mayor profundidad radicular de esta especie.

En el mismo sentido, para lotus, los datos mostraron tendencias similares a alfalfa en cuanto a la respuesta en producción de forraje bajo riego.

En el año 1998 se instaló un experimento con 4 especies: festuca cv. Tacuabé, trébol rojo cv. INIA Mizar, lotus cv. INIA Draco y alfalfa cv. Crioula. En el año de instalación de la pastura, los autores no encontraron respuestas significativas al riego en producción de forraje para ningún corte en trébol rojo,

alfalfa y lotus. En el caso de festuca, ésta rindió un 10% más en el tratamiento regado para todo el período analizado. Parecería que en parte la respuesta podría deberse a que la especie presenta un sistema radicular más superficial que las leguminosas. Los autores indican que en los cortes de primavera fue donde se obtuvo respuesta al riego, coincidiendo con la estación que presentó más deficiencias hídricas (Sawchik y Formoso, 2000).

El año 1999/2000 el segundo año de la pastura, según afirman los autores fue uno de los años más secos de la serie histórica climática de La Estanzuela, por tanto puede considerarse un año cercano a máxima demanda de agua para una pastura (Sawchik y Formoso, 2000). En el cuadro 3, se muestran las producciones acumuladas de forraje de las tres leguminosas para la zafra primavera – verano (1999/2000).

Cuadro No. 3. Producción acumulada de forraje (primavera – verano) para tres especies en su 2º año en el año 1999/2000.

VARIABLE	Alfalfa		Trébol rojo		Lotus	
	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego
Producción acumulada t MS.ha ⁻¹	8.5	14.2	1.8	6.4	4.4	5.8
Rendimiento relativo 100	100	167	100	355	100	131
Kg MS.mm ⁻¹ aplicado		19.9		13.6		4.2

Fuente: Sawchick y Formoso (2000)

En este sentido Sawchick y Formoso (2000) mencionan que ese año en particular fue extremo y permitió la respuesta al riego y agregan que en parte se debió a la distinta capacidad de exploración radicular de cada especie. Acotan además que trébol rojo y festuca (datos no presentados) especies con sistemas radiculares más superficiales triplicaron los rendimientos.

Para el caso del lotus, su sistema de raíz pivotante permitió en parte adaptarse mejor a la condición extrema y según los autores, salvo condiciones de sequías severas, ésta sería una especie marginal a incluir en un plan de pasturas a regar.

En contraposición con lo anterior, Más (2004) sostiene que el buen comportamiento del L justificaría la prescindencia de las leguminosas tropicales para fines de riego. El autor menciona que la performance productiva del trébol blanco bajo riego fue relativamente mediocre cuando se lo maneja como una especie estival.

Hofstadter (1982), trabajando con alfalfa con distintos regímenes de riego en un experimento de 3 años de duración (1973/74, 1974/75 y 1975/76) encuentran que no hay grandes diferencias entre tratamientos en la producción acumulada para los 3 años en conjunto, aunque si una tendencia a un mejor comportamiento para el umbral de 30% de agua disponible en suelo. El umbral mayor (60%) se comportó prácticamente igual al seco. Los factores que explicarían la falta de respuesta para este trabajo serían las condiciones sanitarias del cultivo provocadas por excesos hídricos en los tratamientos con riego.

Continuando con lo anterior García (2010) menciona que la ocurrencia de precipitaciones medias a altas en verano provocó mermas en el rendimiento de alfalfa en ciertos trabajos realizados.

Pritsch et al. (1976), realizaron un estudio preliminar sobre el comportamiento en producción de forraje y semilla bajo dos regímenes hídricos diferentes, de dos cultivares de trébol rojo cv. Kenland y Estandzuela 116. El riego incrementó la producción de materia seca total del cultivar Kenland en un 300% y el cultivar Estandzuela 116 incrementó su producción en un 50% frente a los testigos sin riego en los años 74/75 y 75/76 en las cuales se llevaron a cabo los experimentos.

Cuadro No. 4. Producción de semilla para dos especies bajo dos regímenes hídricos.

	SECANO		RIEGO	
	Estandzuela 116	Kenland	Estandzuela 116	Kenland
Semilla Kg.ha ⁻¹	194	406	619	1205

Fuente: Pritsch et al. (1976)

En el reporte Mas (2004), muestra los resultados de un experimento en el cual se evaluaron distintas mezclas invernales sembradas por método convencional después de arroz, con un componente base de trébol blanco, al cual se le agregaba una gramínea festuca o phalaris, o ambas y a estos tres tratamientos con gramíneas se le agregaba o no la variante del componente lotus, totalizando un total de seis tratamientos. El riego se aplicaba en el período primavera verano en torno a 3 o 4 eventos de riegos por temporada según las características climáticas reinantes. No se encontró efecto significativo en cuanto a producción de las distintas mezclas, pero si una tendencia a mayor producción en aquellas que incluían el componente lotus. Paralelamente y durante los dos primeros años, el trébol blanco fue significativamente superior cuando no tuvo la competencia del lotus.

Debido a lo anterior, los autores comentan que el riego de este tipo de pasturas con ciclo invierno-primaveral es más complicado de lo que parece y que las respuestas esperadas pueden ser muy inferiores a las obtenidas y que existen factores y efectos desconocidos que no se manejan cuando se “agrega” agua artificialmente a la pastura (Mas, 2004).

Santiñaque y Battista (2003), estudiaron en L cv. San Gabriel el efecto de dos frecuencias de defoliación (F: frecuente y A: aliviado) bajo tres niveles de estrés de agua en el suelo (E0, E1 y E2) sobre el comportamiento de la leguminosa y el uso del agua. El manejo frecuente (F) corresponde a cortes cada 22 días y el aliviado (A) cada 44 días. EL E0 es sin estrés hídrico (82% de CC), E1 estrés intermedio (65% CC) y el E2 estrés severo (59% de CC). Se constató diferencias en producción de forraje para los tres niveles de estrés para el promedio de los dos manejos de defoliación y en los dos períodos evaluados (a) primavera – verano y (b) verano. El rendimiento se redujo al 64 y 51% en el período (a) y 45 y 22% para el período (b) para E2 y E1, respectivamente con respecto al manejo sin estrés. Otros autores encuentran similar respuesta en L donde la producción promedió el 21% del control irrigado (Peterson et al., citados por Santiñaque y Battista, 2003).

2.4.2. Gramíneas anuales y perenes

Para el caso de las gramíneas perennes estivales como lo es la *Setaria sphacelata* existen reportes en Nueva Zelanda de producciones anuales en secano de 8.800 y 13.827 kg MS.ha⁻¹ para diferentes condiciones climáticas en el período de crecimiento comprendido entre mediados de noviembre y fines de abril (Taylor et al., citados por Pravia, 2009). En el mismo ensayo la producción bajo riego de setaria para una lámina igual a la evapotranspiración diaria fue de 13.108 – 18.909 kg MS.ha⁻¹, es decir una respuesta al riego de 32% en promedio para tres años de ensayo.

En Portugal Lourenco et al. (2006) reporta que en raigrás anual, el riego duplica el número de pastoreos, cuatro en lugar de dos comparado con el tratamiento de control de secano, también duplica el rendimiento de materia seca, proteína cruda y digestibilidad, lo que muestra la importancia del riego suplementario en estabilizar la disponibilidad forrajera a lo largo del año.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

3.1.1. Ubicación

El experimento fue realizado durante el período octubre de 2010 a marzo de 2011, en el establecimiento “El Junco” a 75 km de la Ciudad de Salto, paraje Colonia Itapebí. Se ubica en las coordenadas planas - Latitud 31°11'23.74"S, Longitud 57°22'39.15"O.

El suelo es un Vertisol Háptico de la Unidad Itapebí - Tres Árboles según (MAP. DSF, 1976). Este suelo se caracteriza por un alto contenido de materia orgánica, alto porcentaje de saturación de bases, textura arcillosa y drenaje moderadamente bueno a bueno. Tiene un horizonte A que alcanza los 60-80 cm de profundidad.

3.1.2. Antecedentes de la chacra

La pradera estaba compuesta por trébol blanco (*Trifolium repens* cv. Zapican), lotus (*Lotus corniculatus* cv. San Gabriel) y raigrás (*Lolium multiflorum* cv. E284). Fue sembrada sobre un rastrojo de sorgo forrajero, que venía de 2 años de arroz (2007-2008). Los ensayos de riego en la pradera se instalaron en su segundo año productivo, con una buena cobertura de trébol blanco y raigrás (llegando al fin de su ciclo).

3.1.3. Siembra

La siembra se realizó en la primera quincena de mayo del 2009 con las siguientes densidades, trébol blanco 2,5 Kg.ha⁻¹, lotus 6 Kg.ha⁻¹ y raigrás 20 Kg.ha⁻¹. El raigrás se sembró en línea por método de chorrillo y el trébol blanco al voleo.

3.1.4. Fertilización

La fertilización al momento de la siembra fue con 120 Kg.ha⁻¹ de 7-40-0 (N-P-K). No hubo re fertilizaciones en el período experimental.

3.1.5. Control de malezas, enfermedades y plagas

No se realizó ningún control de malezas, plagas, ni enfermedades en los ensayos. Al comenzar con los riegos se detectó un foco de arañuela roja

(*Tetranychus urticae*) que no aumentó ni generó mayores problemas; con el suceso de los riegos fue desapareciendo.

3.1.6. Preparación del suelo

La pradera se encontraba instalada desde mayo del 2009 en su segunda primavera de producción con muy buen número de plantas y vigor. La preparación del suelo no necesitó otra cosa más que hacer las melgas de riego con un tractor y una taípera.

3.1.7. Características del ensayo

La fisiografía del ensayo estuvo compuesta por una ladera media larga, con una pendiente de 2% y una orientación SO – NE. El suelo se caracterizó por tener hasta 0,75-0,80 m de profundidad con una textura dominante arcillo limoso.

El diseño experimental fue de parcelas al azar con tres repeticiones. Los tratamientos bajo riego fueron diferentes anchos de melgas, siendo los mismos 6, 9 y 12 m, más un testigo en secano de 9 m de ancho de melga.

Los intervalos entre riegos se determinaron según la reposición de una lámina de 40 mm para los tres tratamientos bajo riego cada vez que la evapotranspiración máxima estimada por Penman-Monteith alcanzaba ese valor de 40 mm.

La pendiente que presentan las parcelas es de 2% desde la cabecera hasta el final de las mismas. El área total que ocupó el ensayo fue de 4.760 m² (108m x 45m).

3.1.8. Materiales utilizados

El agua utilizada para el riego proviene de una represa, la cual llega al ensayo mediante un canal principal y se reparte a la cabecera de las diferentes parcelas por medio de tuberías de polietileno flexible, que por medio de ventanas o compuertas regulables vierten el agua a cada franja en tratamiento.

El ensayo fue pastoreado con 265 carneritos Corriedale de un año de edad, con el fin de lograr un “efecto pastoreo” a la pradera y así obtener datos de crecimiento más ajustados a lo que podría ser la realidad.

Algunos de los demás materiales utilizados en el experimento se detallan a continuación: tractor con taípera y rolo, retro excavadora, estación

agro meteorológica automática, manga de polietileno, compuertas plásticas regulables, saca bocado, 2 a 3 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 metal para unión, cronómetro, piques de madera, alambre eléctrico, etiquetas, bolsas de nylon, balanza de laboratorio, regla y nivel.

3.1.9. Descripción del método de riego

El método de riego utilizado fue de melgas o fajas. Estas se ubicaron a favor de la pendiente permitiendo el desplazamiento uniforme del agua aprovechando la pendiente.

El objetivo de los sucesivos riegos fue reponer una lámina correspondiente a 40 mm de evapotranspiración. La misma fue medida en una estación agro meteorológica ubicada a 2 km del sitio del ensayo. Durante el verano 2010-2011 se obtuvieron valores que rondaban los 5-7 mm de evapotranspiración diaria, por lo cual cada 6-7 días fue necesario un evento de riego.

El tratamiento T4 fue 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 en $L.s^{-1}$ que salía por cada compuerta, para así poder determinar el tiempo que dicha compuerta debería estar abierta para poder completar los 40 mm a reponer en cada melga.

Cada melga a regar tiene una superficie en m^2 diferente, por lo tanto el tiempo de riego y los L totales a aplicar serán también diferente para cada caso.

Cuadro No. 5. Largo, ancho y superficie de cada franja y litros totales a aplicar en cada riego para reponer 40 mm evapotranspirados

Tratamiento	Largo (m)	Ancho (m)	Superficie (m ²)	L totales a aplicar en cada riego
T1 - 6 m	45	6	270	10.800
T2 - 9 m	45	9	405	16.200
T3 - 12 m	45	12	540	21.600
T4 - 9 m (secano)	45	9	405	0

Los litros totales a aplicar en cada melga surgen de la multiplicación de los m² de cada melga por 40 mm a aplicar, considerando el supuesto preestablecido que 1 mm corresponde a 1 L.m².

Una vez obtenidos los L totales a aplicar (L) y el caudal (L.s⁻¹) que está ingresando por la cabecera de la franja, se puede obtener el Tiempo que debería estar abierta la compuerta para que se apliquen esos 40 mm a la melga.

La aplicación de los riegos se realizó cuando la evapotranspiración máxima (E_{tm}) diaria acumulada alcanzó valores de 40 mm. Estos se definieron de la siguiente forma:

Cuadro No. 6. E_{To}, mm totales, números de riegos y mm promedios aplicados en los 9 riegos

Tratamiento	E _{To} acumulados en el período (mm)	mm totales aplicados en todo el período	No. de riegos realizados	mm promedio aplicado por riego
T1 - 6 m	690	523	9	58
T2 - 9 m	690	463	9	51
T3 - 12 m	690	537	9	59
T4 - 9 m (secano)	690	0	0	0

El período de riego para los tratamientos T1, T2, T3 comenzó el 28/10/2010 con un riego uniformizador de unos 100 mm aproximadamente con el cual se trató de tener una humedad uniforme en la profundidad del perfil en toda el área que ocupó el ensayo. Luego los riegos cada 40 mm de evapotranspiración acumulados comenzaron el 08/11/2010 y se extendieron hasta el 25/01/2011 fecha del último riego, dado que después de esa fecha las precipitaciones fueron suficientes como para mantener un balance hídrico que no requirió más riegos.

3.1.10. Recomendación de riego

La recomendación de riego para los tratamientos regados T1, T2 y T3 fue determinada en base a la Evapotranspiración máxima del cultivo determinada por la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 2006). Una vez que el valor de ETo acumulaba 40 mm se determinaba como necesario un evento de riego con el cual se reponían esos 40 mm que se habían evapotranspirado.

3.1.11. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue de parcelas al azar con 3 repeticiones. Los tratamientos fueron cuatro distintos anchos de melga 6, 9 y 12 m y un seco de 9 m. La longitud de las melgas era de 45 m. La lámina de reposición era de 40 mm para todos los tratamientos con riego. El área experimental ocupaba un área 0,48 ha con tamaños de parcelas de 270, 405 y 540 m² para parcelas de 6, 9 y 12 m de ancho respectivamente.

Los tratamientos consistieron en diferentes anchos de melga para poder evaluar eficiencia de aplicación; de distribución; caudales; láminas aplicadas y poder relacionarlo a la producción de MS en KgMS.ha⁻¹ y así obtener indicadores de eficiencia de uso del agua de la pastura como lo es KgMS.mm⁻¹ (mm = Riego + Precipitaciones).

3.2. DETERMINACIONES

3.2.1. Pasturas

En la pastura se determinó la producción de forraje total por tratamiento y la biomasa de forraje presente pre y post pastoreo.

Para estimar la cantidad de materia seca disponible (biomasa aérea presente) se utilizó el "Método de rendimientos comparativos para estimar la biomasa seca de una pastura" de Haydock y Shaw (1975). Es un método de estimación visual de la biomasa a través de la comparación de una escala de referencia a la que se le asignan valores relativos. Sirve para estimar cantidad de forraje en situaciones de gran variabilidad (con pastoreo) donde el obtener un número alto de muestras (aunque no sean exactas) es más preciso que pocas muestras exactas.

Previo a cada pastoreo en el área experimental se seleccionaron cinco sitios de 0,3 m x 0,3 m del tamaño de la unidad muestral (escala de referencia). El cuadro 1 y 5 se colocaban por apreciación visual en las zonas de mayor y menor cantidad de forraje (según altura, densidad y contenido de agua). A continuación el estándar 3, se colocaba en un lugar con biomasa intermedia entre el 1 y 5. Luego se seleccionaban los estándares de 2 y 4, que tienen rendimientos intermedios entre el 1 y el 3, y entre el 3 y el 5, respectivamente.

Luego se procedía a realizar el muestreo en cada unidad experimental, recorriendo la misma y a distancias regulares se colocaba un cuadro y se estimaba a qué escala correspondía. Se realizaban 20 muestras por unidad experimental.

La calibración del método se realizaba cortando un cuadro cada cierto número de estimaciones visuales y al finalizar el muestreo se cortaban también los cuadrantes de referencia. Los cortes identificados (aproximadamente 3 por cada valor de la escala) eran pesados y colocados en estufa hasta peso constante y pesado nuevamente en el laboratorio de EEFAS (Estación Experimental de la Facultad de Agronomía Salto). Con dicha información se obtenía la ecuación de regresión de la cantidad de forraje (kg MSha^{-1}) según los valores relativos de la escala.

O sea que en cada muestreo los valores de la escala representaban diferentes cantidades de forraje de la pastura según el momento y estado de la pastura.

Luego de cada pastoreo (forraje remanente) se procedía similarmente, con la diferencia que la escala de referencia utilizada era sólo de tres puntos, ya que luego del pastoreo realizado con los ovinos la variabilidad de ese remanente era baja. Los pastoreos realizados fueron “muy intensos” dejando una pastura prácticamente arrasada, que no superaba los 2-3 cm de altura.

La primera medición de disponibilidad de forraje se realizó el 03/11/2010 a inicios del ensayo cuando aún no se había comenzado con los eventos de riego. La segunda estimación de la disponibilidad se realizó el 15/12/2010 (correspondiendo al primer disponible) previo al ingreso de los ovinos en su primer pastoreo. El tercer muestreo fue realizado el 04/01/2011 siendo el primer remanente luego del primer pastoreo. El cuarto fue realizado el 19/02/2011 corresponde al segundo disponible, previo al último ingreso de ovinos a pastorear. El quinto y último corte se realizó el 06/04/11 que corresponde al remanente del último pastoreo. La producción de forraje se midió por diferencia entre la cantidad de forraje entre dos momentos, determinada como se expresó anteriormente. El forraje existente antes de

pastorear menos la cantidad de forraje remanente del pastoreo anterior. No se cuantificó ni se estimó la cantidad de forraje producido durante los pastoreos, a pesar de que los períodos fueron significativos (37 días).

3.2.2. Riego y precipitaciones

Respecto al riego se determinó el caudal de entrada en cada parcela, el tiempo de riego, tiempo de avance cada 10 m, tiempo de recesión cada 10 m, lámina infiltrada y uniformidad de distribución, lámina aplicada y eficiencia de aplicación.

La obtención de los caudales de entrada a cada melga se realizó con un balde de 20 L y un cronómetro. La medición se realizaba cuando se había estabilizado el caudal dentro de la manga de riego y se la repetía por cinco veces para llegar a una medida promedio en $L \cdot s^{-1}$ de salida de agua en cada compuerta que suministraba el agua a la melga. En el caso de que las melgas tuvieran dos compuertas en su cabecera se medían y sumaban los caudales de ambas compuertas.

Los datos meteorológicos (precipitación, temperatura, radiación solar, humedad, viento) y de evapotranspiración del cultivo de referencia, calculada para la reposición de la lámina, los proporcionaba una estación agro meteorológica automática “Davis” ubicada a unos 1900 m de distancia del ensayo.

Los riegos se definieron con el objetivo de reposición de una lámina de 40 mm para los tres tratamientos bajo riego cada vez que la evapotranspiración (ET_o) por Penman-Monteith acumulaba 40 mm.

Los principales factores que afectan la evapotranspiración corresponden a las variables climáticas, características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo. Podemos ordenar a las variables climáticas de mayor a menor influencia sobre los valores de la evapotranspiración: la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento (Allen et al., 2006).

Otros factores que se deben considerar al evaluar la evapotranspiración (ET) 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 ET está determinado primeramente 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 este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración (Allen et al., 2006).

3.2.3. Suelo

La capacidad de almacenar agua de los suelos del país presenta una alta variabilidad, con zonas de suelos superficiales con capacidad inferior a 30 mm y zonas de suelos profundos con capacidad superior a 170 mm (Castaño et al., 2011)

En el suelo se determinó el contenido de humedad del perfil (0 a 80 cm) pre y pos-riego (porcentaje en peso) a través de muestreos gravimétricos; muestras no perturbadas con capsulas de aluminio para determinar mediante un análisis de laboratorio propiedades físicas del suelo como textura, estructura y densidad. Se determinó la tasa de infiltración e infiltración acumulada a través del método de doble anillo. Con el resultado de estas muestras se llegó a la curva de retención del agua para el suelo en cuestión, utilizando el programa Curvaret ajustado al modelo Van Genuchten (ver anexo 2).

La infiltración de agua en el suelo se determinó con el método de doble anillos, 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 (ver anexo 3).

✓ Ecuación de tasa de infiltración:

$$I = K \cdot T^{a-1}$$

I = tasa de infiltración en mm.h⁻¹

K = constante en unidades de milímetros por hora elevada al exponente a (mm.h⁻¹)

T= tiempo en hora.

a - 1= sin unidades.

La determinación del tiempo de oportunidad de infiltración consistió en medir el tiempo de avance y recesión del agua, para luego mediante el cálculo de su diferencia obtener el “tiempo de oportunidad de infiltración” propiamente dicho. Para esto se colocaron estacas cada 10 m en el centro de la melga desde la zona superior a la inferior de la misma.

El cálculo de los tiempos de avance comenzaban una vez que se abría la compuerta de la manga en la cabecera de la melga y la misma iba avanzando de a diez m. Cada vez que el agua llegaba a cada estaca se tomaba el tiempo. Los tiempos de receso se fueron midiendo en las mismas estacas

una vez cada diez m, cuando el agua iba desapareciendo de la superficie del suelo (figura 1).

$$\text{Tiempo de oportunidad} = T. \text{ de Recesión} - T. \text{ de Avance}$$

El tiempo de oportunidad determina el tiempo de riego en el cual se aplica una lámina determinada. Para esto, con el tiempo de oportunidad calculado se ingresa a la ecuación de infiltración de Kostiakov y se obtiene la lámina infiltrada.

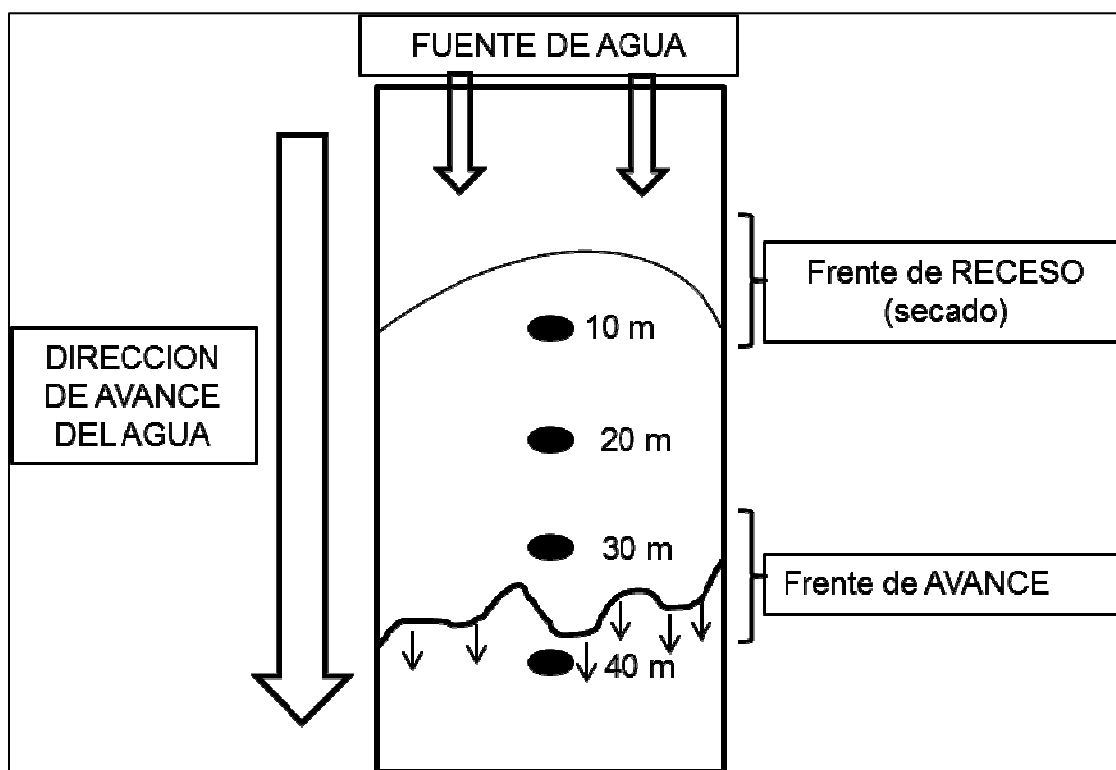


Figura No. 1. Representación esquemática de vista aérea y con frente de avance y de receso del agua en la melga al momento del riego.

El frente de avance o de mojado en el largo de la melga es algo más desuniforme que el caso del frente de receso.

Para la obtención de la eficiencia de aplicación, de la uniformidad de distribución, percolación profunda y el escurrimiento superficial del agua de riego, se utilizó el software de simulación WinSRFR v.4.13. En el módulo de Análisis de Evento se ingresaron los datos de campo requeridos por el software

como son: 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 Maning, parámetro “a” de la función de Kostiakov. Éste módulo con los datos ingresados calcula el tiempo de oportunidad, el parámetro K de la función de infiltración y luego al correrlo arroja resultados como eficiencia de aplicación (EA), uniformidad de distribución (UD), percolación profunda (P) y escurrimiento superficial (E) expresados en porcentaje (%) como en mm de lámina de agua según el caso. Otros resultados obtenidos son el tiempo de avance medido y predicho, el tiempo de receso medido y predicho y el tiempo de oportunidad medido y predicho que no se tuvieron en cuenta en este trabajo.

En una segunda etapa, se utilizó el módulo de Simulación ingresando el parámetro K calculado por el módulo Análisis de Evento además de los mismos datos de campo con el fin de simular los eventos de riegos. Este módulo arroja resultados simulados de EA, UD, P, E en porcentaje y en unidades de mm de lámina de agua, asimismo de éstos se obtienen otros resultados que no se tienen en cuenta para este trabajo.

Siguiendo con lo anterior cabe aclarar que ambos módulos construyen una serie de gráficos con los resultados ya mencionados.

Los eventos de riego simulados fueron 1, 2, 5 y 7 en forma aleatoria con el fin de aprender a usar este tipo de herramienta tecnológica y aproximarse a un primer intento de calibración de este modelo de simulación con datos locales para nuestras condiciones.

3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para la realización del análisis estadístico se utilizó el programa Statistical Analysis System (SAS®). Evaluándose el efecto del riego sobre la producción de materia seca, rendimiento. Para evaluar el efecto del tratamiento se realizaron análisis de varianza y para la comparación de tratamientos se realizó comparación de medias a partir de mínima diferencia significativa (MDS) al $P \leq 0.05$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO

El promedio mensual de la serie histórica de 27 años (1984-2011) para el INIA Salto Grande muestra que durante los meses de mayor demanda atmosférica (N-D-E-F), la ETo supera a las precipitaciones, resultando en un déficit hídrico durante el verano y excesos hídricos durante los meses de menor demanda atmosférica (M-J-J-A)

Estos desbalances a lo largo del año se explican por la variabilidad que presenta la demanda atmosférica y no por el régimen de precipitaciones, que se ajusta a un régimen isohigro. La evapotranspiración (ETo) en los meses de mayor demanda atmosférica multiplica por cuatro su valor presentado en los meses de invierno.

Un régimen de precipitaciones isohigro da la pauta que la distribución de precipitaciones a lo largo del año es similar para las cuatro estaciones; pero para el caso de nuestro país es muy variable entre años. Tal es así que para el año en el que se realiza el ensayo se presenta un déficit hídrico muy marcado, dado principalmente por las escasas precipitaciones en la estación estival.

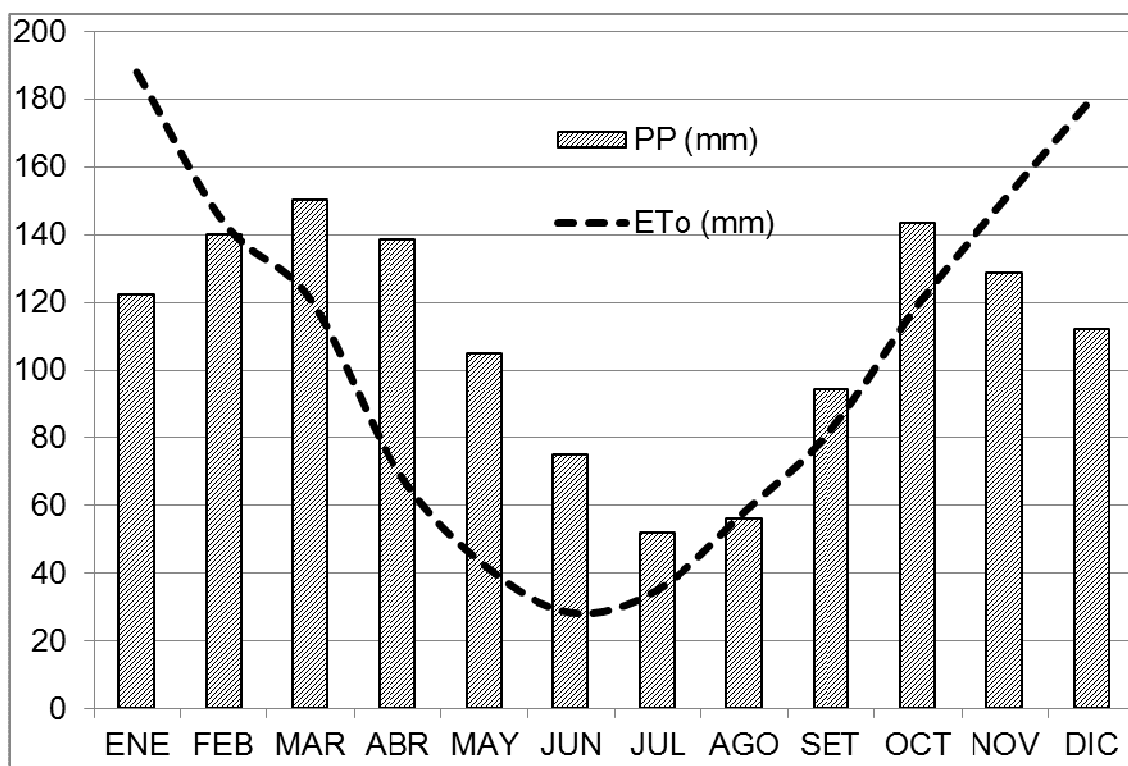


Figura No. 2. Precipitación y evapotranspiración media mensual (1984-2011)

La variabilidad que presentan las precipitaciones entre años es muy amplia, presentando meses con valores máximos cercanos a los 550 mm y mínimos de 10 mm, por lo que no sería correcto hablar de años promedios. A su vez se evidencia para la serie histórica un descenso de las precipitaciones para los meses de junio, julio y agosto, pero al disminuir la evapotranspiración en dichos meses por tratarse de invierno, el balance hídrico no se ve afectado negativamente.

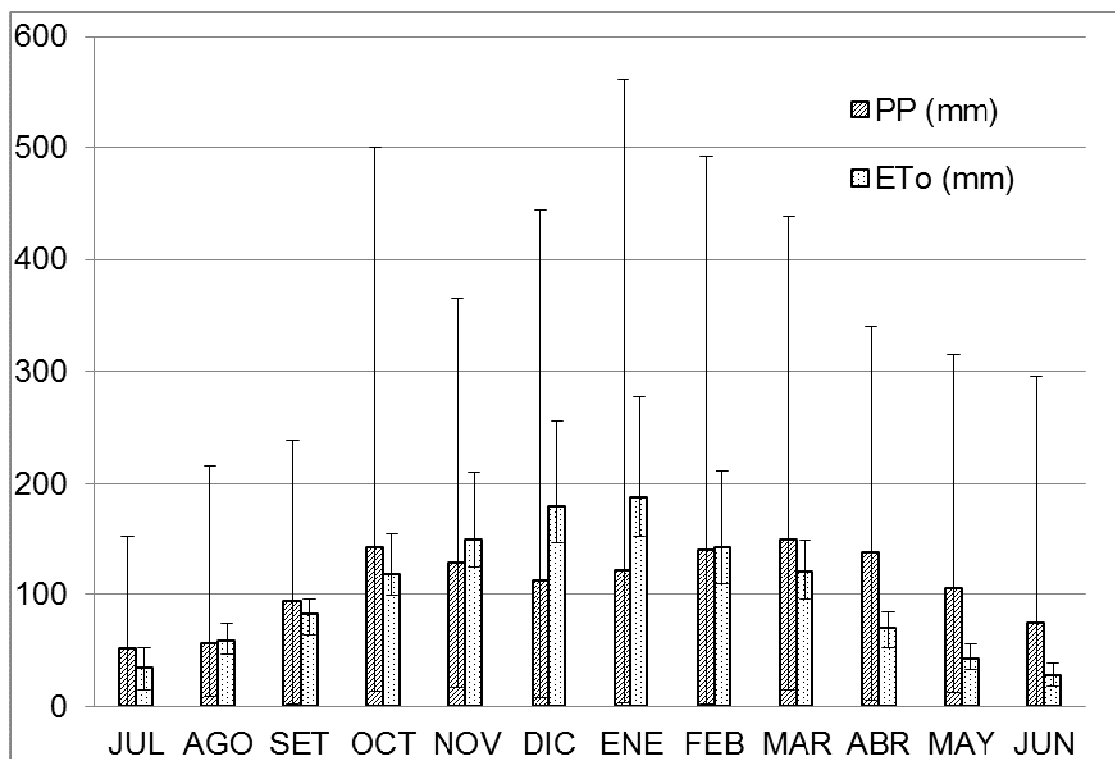


Figura No. 3. Precipitación y ETo promedios mensuales con máximos y mínimos (1984-2011) para INIA Salto Grande.

4.1.1. Precipitaciones

Como ya se mencionó anteriormente, el comportamiento de precipitaciones en el país es muy variable.

Para el año en cuestión las mismas no superan la mitad del promedio de los años de la serie histórica (1984-2011), lo cual evidencia un acentuado déficit hídrico para ese verano.

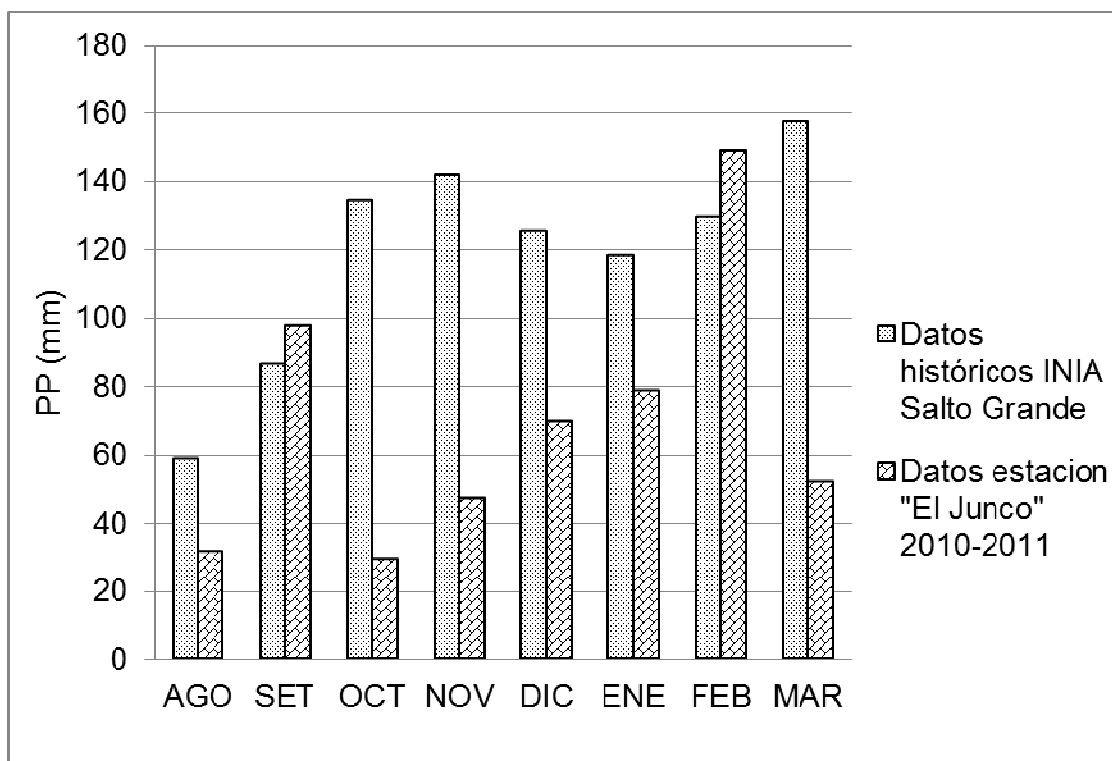


Figura No. 4. Comparación de precipitaciones del promedio de la serie histórica (1984-2011) del INIA Salto Grande vs. período experimental.

4.1.2. Temperaturas

A diferencia de las precipitaciones, el promedio de las temperaturas se mantienen relativamente constantes año a año, el año evaluado no fue la excepción.

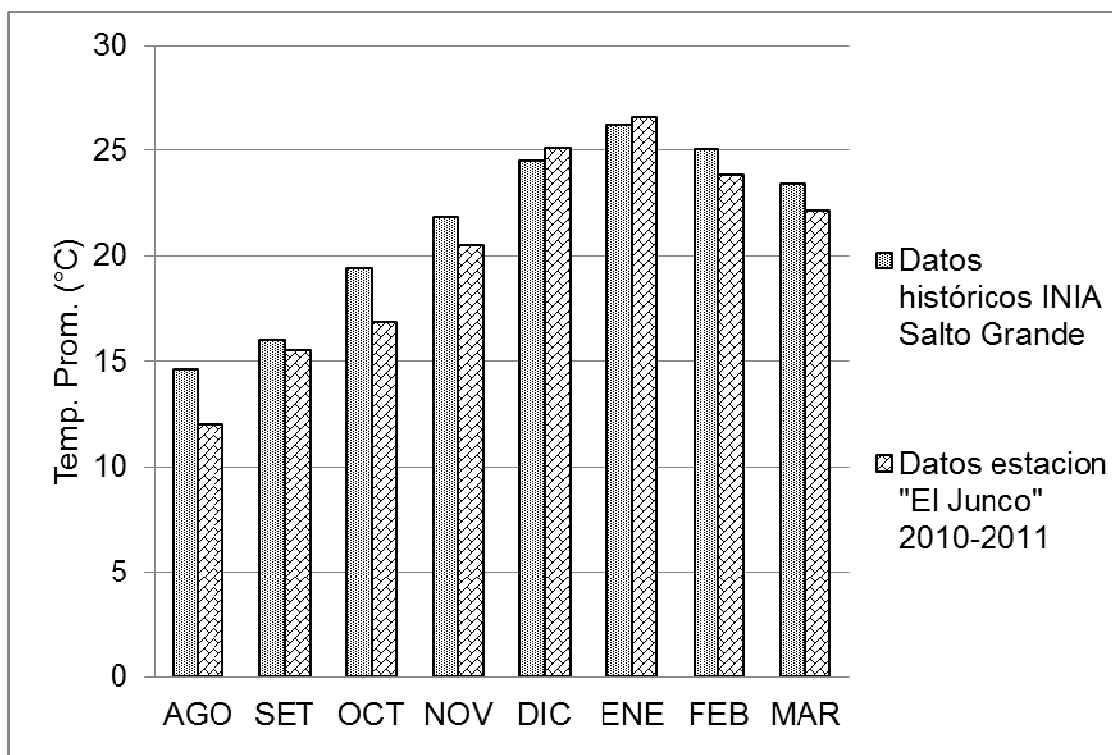


Figura No. 5. Comparación de temperaturas del promedio de la serie histórica (1984-2011) del INIA Salto Grande vs. período experimental..

4.1.3. Evapotranspiración y balance hídrico

Los valores medios de evapotranspiración acumulada anual, estimada por el método de Penman-Monteith, se sitúan entre 1000 y 1200 milímetros (mm), con los menores valores situados al sureste y los máximos al noroeste del país. El gradiente por lo tanto es incremental de sureste a noroeste. La evapotranspiración (Penman-Monteith) presenta un claro comportamiento estacional registrándose los valores más altos durante el verano ($160\text{-}185 \text{ mm.mes}^{-1}$), seguido de la primavera ($95\text{-}105 \text{ mm.mes}^{-1}$), el otoño ($65\text{-}80 \text{ mm.mes}^{-1}$) y el invierno con $25\text{-}35 \text{ mm.mes}^{-1}$. 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)

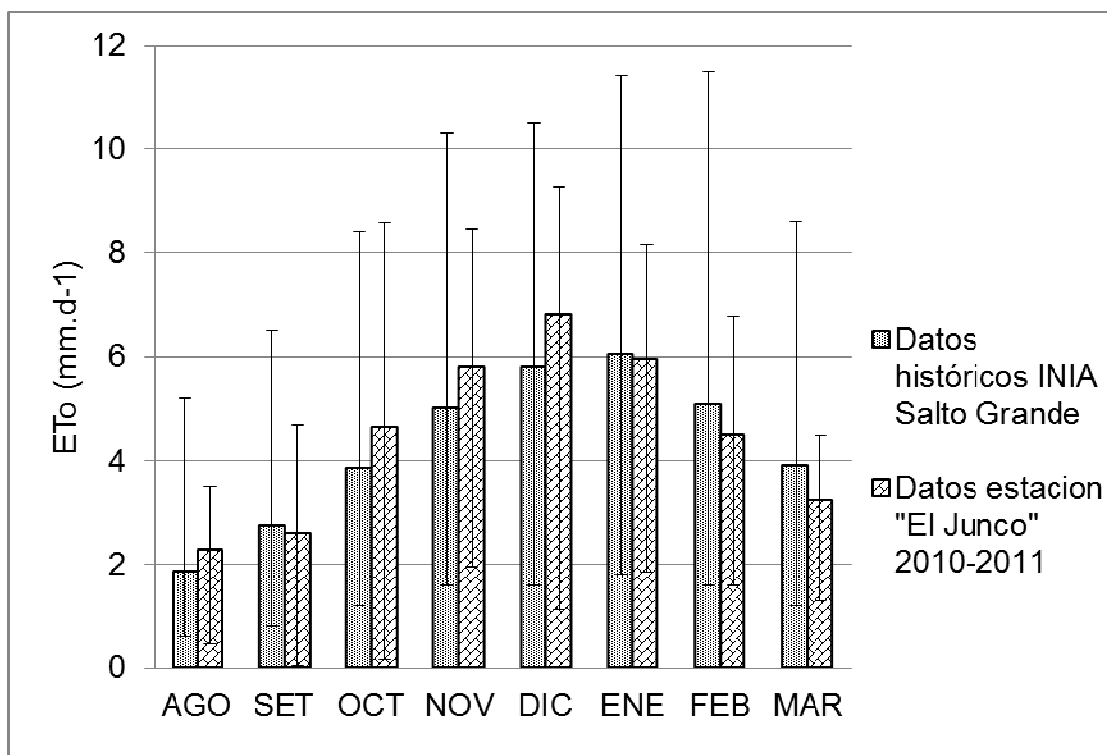


Figura No. 6. Comparación de evapotranspiración del promedio de la serie histórica (1984-2011) del INIA Salto Grande vs. período experimental.

Para el año de la evaluación las condiciones de balance hídrico coinciden con el registro de la serie histórica; notándose un déficit hídrico en los meses de mayor demanda atmosférica que triplica en valor a las precipitaciones alcanzadas en dicho período.

Como se mencionó anteriormente para el año tratado se presenta una marcada sequía generada por las altas demandas atmosféricas y falta de lluvias durante el período estival, lo cual no escapa a la realidad de la mayoría de los veranos en la región norte del país. Demostrando así, que el riego suplementario en dicho período podría asegurar una buena producción de forraje de buena calidad.

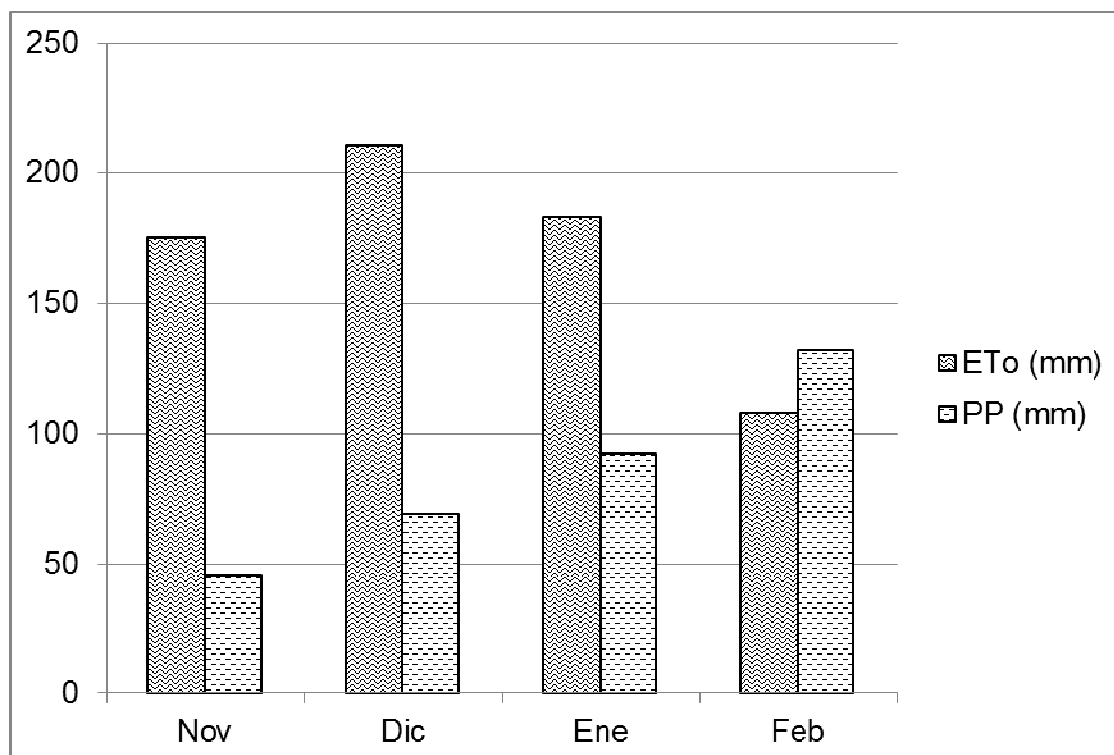


Figura No. 7. Evapotranspiración (ETo) vs. precipitaciones (PP) en mm presentadas durante el período del ensayo.

4.2. PARÁMETROS DEL RIEGO POR MELGAS

4.2.1. Curvas de avance y receso

La diferencia en el tiempo de avance entre las melgas de 9 m vs. 6 y 12 m, se explica por los diferentes caudales aplicados por metro de ancho de melga ($Q=L.s^{-1}.m^{-1}$ de ancho), siendo en promedio un 33% mayor en las dos últimas para el promedio de los 9 riegos realizados en el período.

A su vez, las curvas de receso presentan una forma similar para los tres tratamientos de ancho de melga, independientemente del caudal aplicado (figura 8). 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. Otros factores que determinan que la forma de las curvas de recesos sean similares son: la producción de materia seca (MS); la acumulación de la misma en superficie, y la lámina aplicada, que no varían para los tres tratamientos bajo riego.

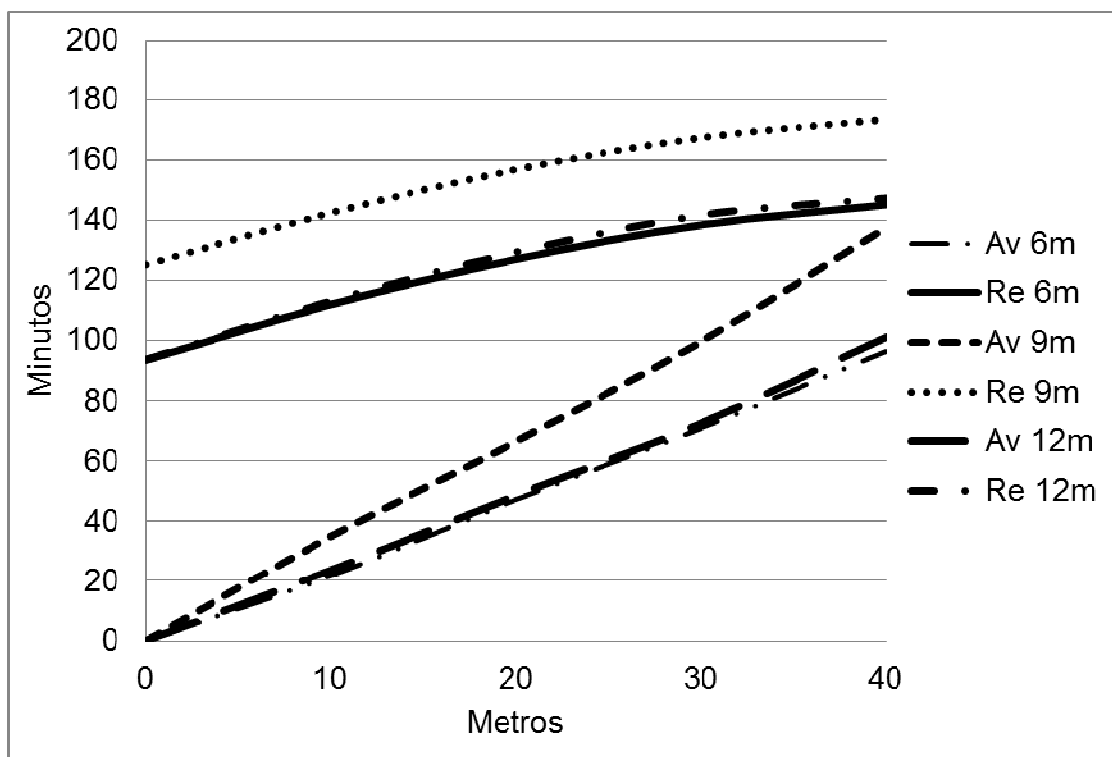


Figura No. 8. Curvas de tiempos de avance y receso del agua para tratamientos de 6, 9 y 12 m de ancho de melga.

4.2.2. Tiempo de oportunidad

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 de 9 m de ancho de melga, lo cual se explica por el menor caudal de agua en la cabecera de cada parcela lo cual generó una velocidad de avance menor y por ende un mayor tiempo de riego. Por ello se supone una mayor infiltración de volumen de agua en profundidad en los primeros 25-30 m de la melga.

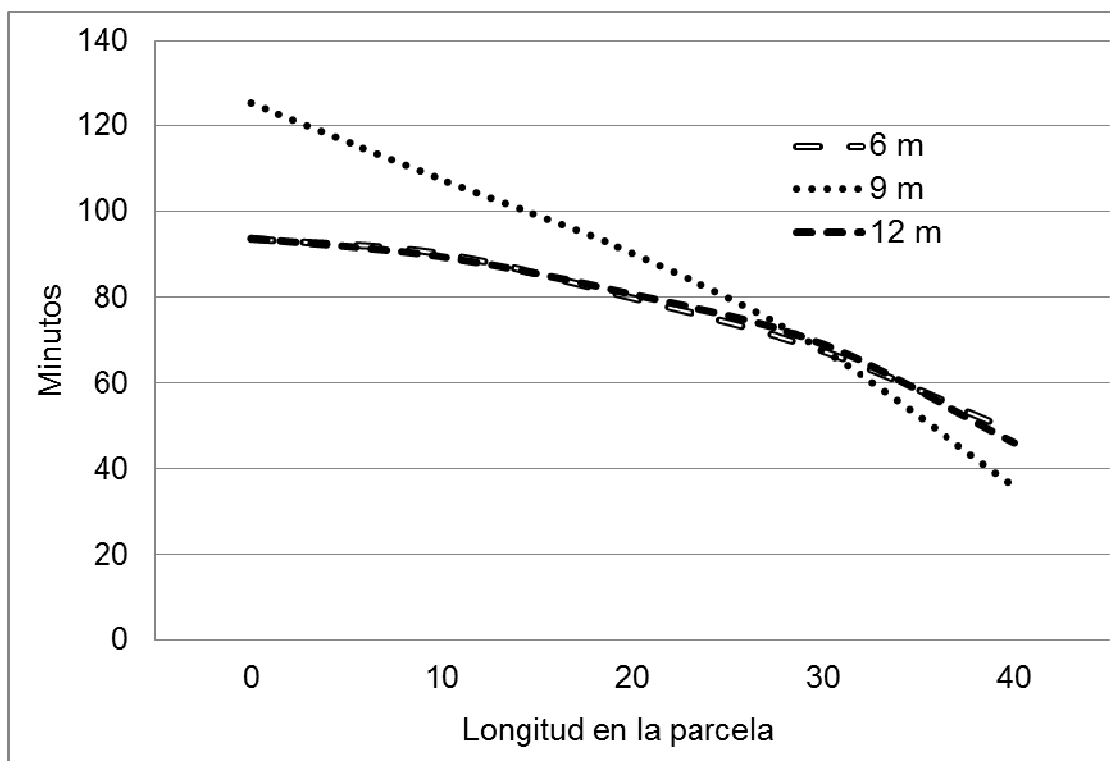


Figura No. 9. Tiempos de oportunidad promedio para los tres tratamientos regados de anchos de melga de 6 m, 9 m y 12 m.

4.2.3. Uniformidad de distribución

Este parámetro se calcula como: la lámina promedio aplicada en el cuarto menos regado de la melga dividido la lámina promedio de toda la melga. El cuarto de la melga menos regado corresponde al pie de la melga debido a que es la zona más distante al ingreso del agua y por ello la que presenta mayores problemas para lograr buenos niveles de uniformidad.

El cálculo se realizó de la siguiente manera:

1°) Lámina Neta (LN) = Lámina aplicada (mm) x (EA/100)

2°) Lámina infiltrada en cuarto inferior (L) = % Humedad Post Riego (40 cm) - % Humedad Pre Riego (40 cm)

3°) UD = (L/LN) x 100

Cuadro No. 7. Cálculo de Uniformidad de distribución para riego del 31/12/10

Tratamiento	6 m	9 m	12 m
Lámina aplicada (mm)	49	44	46
EA (%)	66	74	74
Lámina neta (mm)	32	32	34
L (mm)	11	13	15
UD (%)	34	40	44

Es importante aclarar que el cálculo de esta uniformidad de distribución se realizó para un único evento de riego el 31/12/10 en el cual se obtuvieron los datos completos de agua en el perfil pre y post riego. En los demás riegos no se obtuvieron datos completos de humedad en el perfil.

4.2.4. Eficiencia de aplicación y cuantificación de pérdidas

Las EA fueron similares para los tres tratamientos. La obtención de las mismas surge de la división de la cantidad de agua retenida en los primeros 40 cm de profundidad (en mm) sobre la lámina aplicada en cada riego en mm. Es importante aclarar que entre cada evento de riego y su respectivo muestreo post riego generalmente transcurrían entre 3 y 4 días, en ese caso los mm que se evapotranspiran entre el riego y el muestreo post riego se le suman a la cantidad de agua retenida en los primeros 40 cm, con el fin de obtener valores de eficiencia ajustados a la realidad. El contenido de agua en los 40 cm de profundidad se mide en mm, y se calcula multiplicando el % en vol (que equivale a mm cada 10 cm) X 4.

$$EA (\%) = \frac{\text{Cont. de agua en los 40 cm (mm)} + ETo \text{ acum. días post riego (mm)}}{\text{Lámina aplicada (mm)}}$$

Cuadro No. 8. Eficiencia de aplicación, pérdidas por percolación y escorrentía.

Tratamiento	EA(%)	Percolación (%)	Escorrentía (%)
6 m	74	26	0
9 m	76	24	0
12 m	80	20	0

Los valores de pérdidas por escorrentía fueron nulos o se los considera insignificantes para los riegos realizados, por lo tanto el total de la ineficiencia lo da las pérdidas por percolación o en profundidad por debajo de los 40 cm.

4.2.5. Caudales

Cuadro No. 9. Caudales en $L.s^{-1}.m^{-1}$ obtenidos en cada evento de riego, con sus respectivos promedios y calculado el promedio para todos los eventos de riego.

TRAT.	PARC.	Caudal ($L.s^{-1}.m^{-1}$)								
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
6m	2	0,51	0,57	0,48	0,35	0,37	0,51	0,38	0,6	0,45
9m	3	0,34	0,48	0,34	0,2	0,24	0,36	0,32	0,45	0,28
12m	1	0,52	0,6	0,49	0,35	0,37	0,56	0,35	0,65	0,42
6m	5	0,52	0,31	0,48	0,29	0,5	0,48	0,34	0,64	0,45
9m	7	0,37	0,18	0,33	0,2	0,34	0,32	0,34	0,43	0,31
12m	8	0,52	0,33	0,4	0,32	0,5	0,49	0,39	0,68	0,47
6m	10	0,56	0,41	0,4	0,38	0,43	0,57	0,29	0,79	0,51
9m	9	0,37	0,22	0,34	0,21	0,23	0,33	0,35	0,44	0,3
12m	12	0,49	0,41	0,37	0,51	0,45	0,61	0,39	0,83	0,53

TRAT.	PARC.	Promedios ($L.s^{-1}.m^{-1}$)									PROM.
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	
6m	2+5+10	0,53	0,43	0,45	0,34	0,43	0,52	0,34	0,68	0,47	0,47
9m	3+7+9	0,36	0,29	0,34	0,20	0,27	0,34	0,34	0,44	0,30	0,32
12m	1+8+12	0,51	0,45	0,42	0,39	0,44	0,55	0,38	0,72	0,47	0,48

La variabilidad que se presenta en los caudales para los 9 riegos está dada por el nivel de agua que presentaba el canal que conducía el agua hasta el ensayo. Este canal también llevaba agua para riego de arroz y eso generaba su variación en altura a lo largo del verano.

Se obtuvo un menor caudal (Q) en el tratamiento de 9 m ya que la relación entre $L.s^{-1}$ y ancho de melga es desfavorable para este tratamiento. Para el promedio de los riegos en el tratamiento de 9 m se utilizó una compuerta de $2,9 L.s^{-1}$; en el de 6m de ancho se utilizó una sola compuerta de $2,8 L.s^{-1}$ y en el de 12 m, fueron utilizadas dos compuertas que sumaron un total de $5,8 L.s^{-1}$.

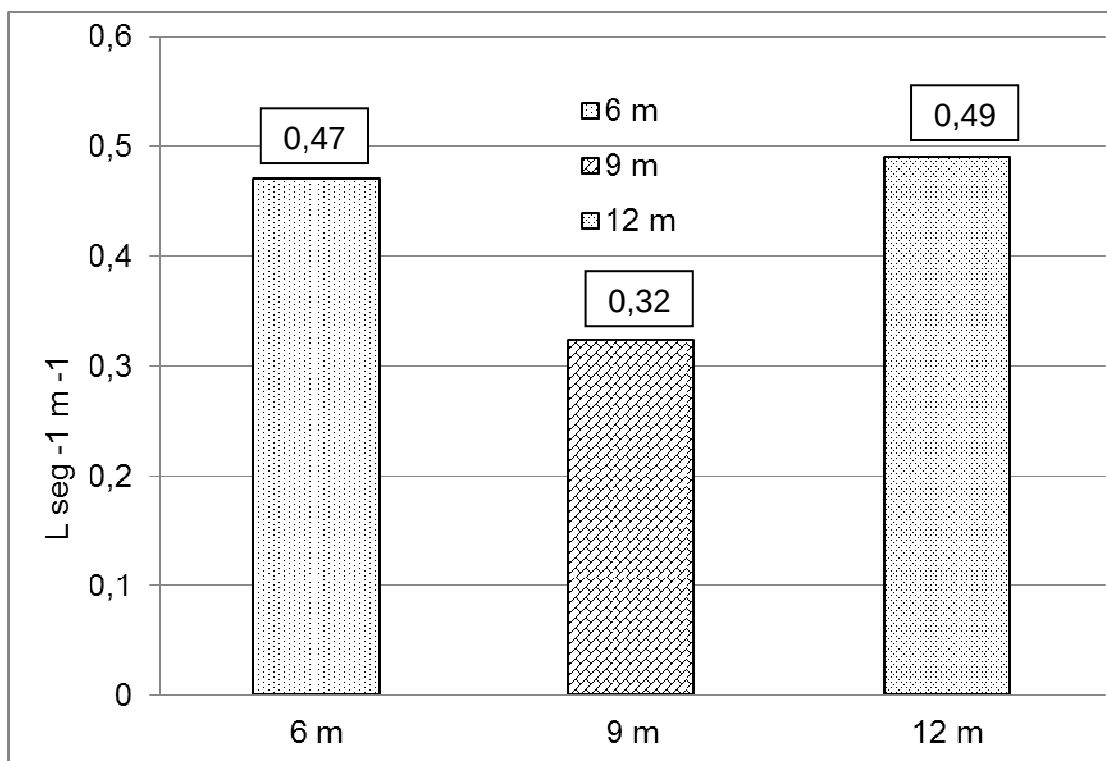


Figura No. 10. Caudal de entrada a los distintos tratamientos (6, 9 y 12m) "Q", expresada en $L.s^{-1}.m^{-1}$ de ancho para los tratamientos regados.

4.2.6. Lámina de riego

Para el total del período del ensayo la lámina aplicada promedio fue de 508 mm, distribuidos en 9 riegos, resultando en una lámina promedio por riego de 56 mm.

La diferencia significativa que se observa en la lámina total aplicada durante todo el período del ensayo entre los tratamientos de 9 m vs. los de 6 m y 12 m se debe a dificultades al momento de realizar los riegos, como por ejemplo roturas de mangas por excesos de caudal, con lo cual en reiteradas ocasiones obligaba a cerrar el ingreso de agua a las mangas para evitar grandes pérdidas.

Cuadro No. 10. Lámina total aplicada (mm) a cada tratamiento, caudal promedio ($L.s^{-1}$) y número de riegos realizados para cada tratamiento durante la zafra 2010-11, Salto 2011.

Registros	Tratamiento		
	6 m	9 m	12 m
Lámina (mm)	523 a	463 b	537 a
Caudal ($L.s^{-1}$)	2,8	2,9	5,8
No. de riegos	9	9	9

4.2.7. Resultados de riego con Winsrfr 4.13

Se tomaron al azar datos de campo de los Eventos 1 (08/11/2010), Evento 2 (16/11/2010), Evento 4 (02/12/2010) y Evento 7 (31/12/2010), con el objetivo de simular los mismos en el módulo de Simulación del Software WinSRFR v. 4.1.3 para obtener resultados de performance de riego como: EA, UD, P, E y poder evaluar como simula los datos de campo. Es un primer intento por calibrar dicho modelo con datos locales para nuestras condiciones y sistemas de producción en suelos de basalto del Norte de Uruguay.

Cuadro No. 11. Resultados simulados de EA, UD, P y E promedio por tratamiento para los cuatro eventos mencionados arriba tomados al azar de un total de 9 eventos para todo el período del ensayo de riego.

Tratamiento	%			
	EA	UD	P	E
6m	82	59	18	1
9m	73	35	27	0
12m	69	70	18	13
Promedio	75	55	21	5

Los valores de eficiencia de aplicación (EA) promedio de 75% para los tres tratamientos son satisfactorios si los comparamos con los encontrados por distintos autores que estudian sistemas de riego por superficie (Trout y Kincaid 2007, Pereira et al. 2010). El máximo fue de 82% y el mínimo de 69% para el tratamiento de 6 y 12 m de ancho de melga respectivamente. El tratamiento de 9 m de ancho de melga se comportó apenas por debajo al promedio con 73% de EA.

En el mismo sentido Durán y García, citados por García Petillo (2010) obtuvieron una EA de 16% en un ensayo realizado en Bella Unión, en una parcela de caña de azúcar regada por surcos a través del método tradicional abriendo una acequia con azada frente a cada surco y aduciendo un caudal

muy reducido (el agua demoraba 24 hrs en recorrer toda la longitud) y manejando simultáneamente un número muy grande de surcos (200).

En el referido trabajo se regó también otra parcela similar, pero aduciendo el agua a los surcos mediante tubería con compuertas regulables frente a cada uno. Se utilizaron dos caudales, primero un caudal máximo que no genera erosión y cuando este llegaba al final del surco se lo reducía a un caudal apenas mayor al infiltrado. Con esta operación lograron una eficiencia de aplicación de 78%.

En cuanto a la UD vemos que en promedio un 55% de la lámina aplicada se infiltró en el último cuarto de la melga, siendo un poco más alto este valor para los tratamientos de 6 y 12 m de ancho de melga con 59 y 70% respectivamente. En el tratamiento de 9 m de ancho de melga la UD fue de 35%. En un ambicioso estudio realizado en California (EEUU) de evaluación a campo de distintos sistemas de riego se encontró que la UD para el método de riego por melgas fue de 84% (Hanson et al., citados por García Petillo, 2010).

Las pérdidas por percolación son 18% para los tratamientos de 6 y 12 m de ancho de melga respectivamente. El tratamiento de 9 m de ancho de melga presentó un valor de 27%, mientras que la media fue de 21% para los casos analizados.

Según la bibliografía revisada, en diferentes suelos del Uruguay se ha detectado sistemáticamente pérdidas por percolación profunda muy superiores a la citada por la bibliografía (García Petillo et al., 2010).

En cuanto a las pérdidas por escurrimiento superficial los tratamientos de 6 y 9 m de ancho de melga no presentaron pérdidas prácticamente siendo de 0 y 1 % respectivamente. Para el tratamiento de 12 m de ancho las pérdidas son de 13 % explicado por un solo evento que presentó pérdidas de E de 46% (ver anexo 4) lo que elevó el promedio para éste tratamiento.

Cuadro No. 12. Comparación de datos obtenidos de EA (%) y cuantificación de pérdidas por percolación vs. los estimados por el software WinSRFR.

Tratamiento	Calculados Real		WinSRFR	
	EA	Percolación	EA	Percolación
6m	74	26	82	18
9m	76	24	73	27
12m	80	20	69	18
Promedio	76	23	75	21

Los datos estimados por el modelo al ser cotejados con los resultados de campo reales vemos que tienen cierta similitud tanto para EA y P con lo cual podríamos suponer que el software WinSRFR es una herramienta muy valiosa al momento de evaluar el riego en un sistema complejo.

Los datos no se analizaron estadísticamente dado que se tomaron eventos al azar con el objetivo de mostrar cómo funciona esta herramienta y comenzar a entender su funcionamiento.

4.3. PASTURA

4.3.1. Evapotranspiración del cultivo

La obtención de la ETc (en mm) surge de la multiplicación del valor diario de la ETo (mm) por un Kc obtenido de tabla (Allen et al., 2006); donde en períodos de mayor acumulación de materia seca ese Kc es “máximo” y en períodos de menor acumulación de materia seca ese Kc es “mínimo”.

Cuadro No. 13. Rangos de kg de MS acumulada y su respectivo Kc.

Rangos de kg MS acumulada	Valor de Kc correspondiente
4.616 - 3.568	1,2
3.568 - 2.519	0,9
2.519 – 1471	0,6

$$ETc \text{ (mm)} = ETo \text{ (mm)} \times Kc$$

El valor de la ETo (mm) diaria se obtuvo de la estación agrometeorológica ubicada a unos 1900 m del lugar donde se localiza el ensayo. Como era de esperar los valores de la ETc previo al pastoreo superaron o fueron muy similares a los de la ETo; en cambio para condiciones post pastoreo los resultados se dieron a la inversa, obteniéndose valores de ETo por encima de los valores de ETc hasta el final del período analizado.

Es importante destacar que el momento de reponer la lámina de 40 mm, lo definía la acumulación de mm de la ETo al transcurrir los días; por ello se podría suponer que en el período post pastoreo se realizaron un par de riegos que no serían necesarios si nos hubiéramos basado en la acumulación de ETc.

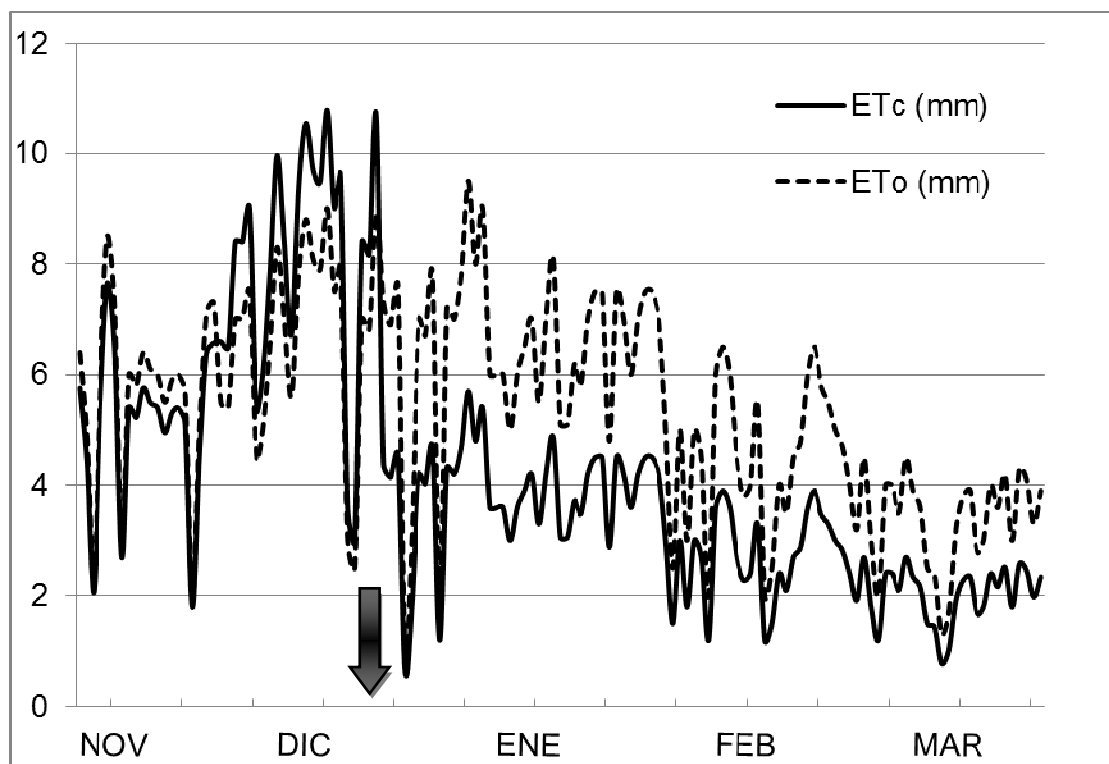


Figura No. 11. Evolución de la ETo y la ET_c durante el período del ensayo.

Analizando los parámetros acumulados durante los meses de mayor demanda atmosférica (diciembre-enero) se observa que la cantidad de agua agregada mediante el riego se asemeja más a los valores de ETo que a ET_c .

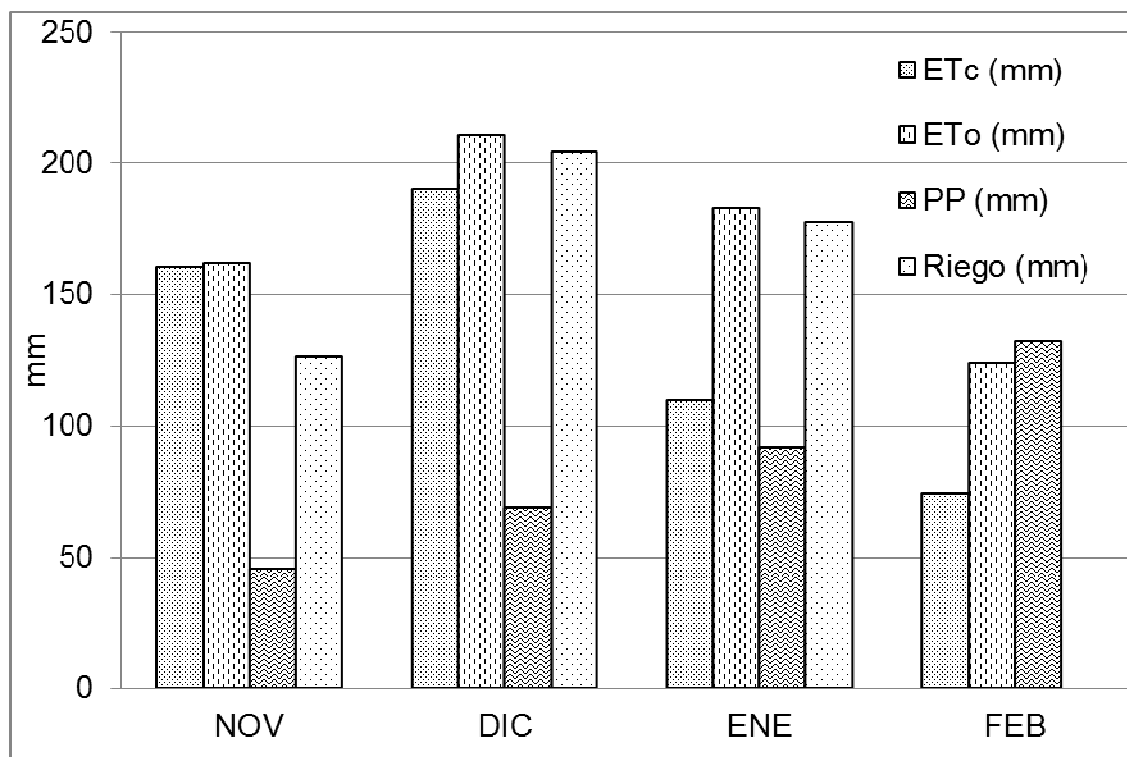


Figura No. 12. Milímetros acumulados mensuales de ETc, ETo, riego y precipitaciones.

4.3.2. Biomasa de forraje pre y post pastoreo

Los diferentes momentos de estimación de la cantidad de forraje presente corresponden a: M1 INICIAL (03/11/10) – representa el total de forraje en materia seca a inicios del ensayo sin ningún riego realizado. La cantidad de materia seca en este momento no presenta diferencias significativas, lo cual demuestra la homogeneidad del área experimental antes de la aplicación de los tratamientos. M2 primer disponible o forraje presente antes del pastoreo con lanares (15/12/10) ; M3 primer remanente del pastoreo (04/01/11); M4 segundo disponible (19/02/11) previo al ingreso de lanares a realizar el segundo pastoreo; M5 remanente (06/04/11) del segundo pastoreo.

En líneas están representados los milímetros acumulados (riego + precipitación) al momento de las estimaciones.

Cuando se realizó la estimación 4 no se observa diferencia significativa en la cantidad de forraje (KgMS.ha^{-1}) entre los tratamientos testigos (sin riego) vs. los tres tratamientos bajo riego. Esto se debe a la colonización en las áreas sin riego de especies C_4 altamente invasoras como *Digitaria sanguinalis* – Pasto

blanco y *Echinochloa cruz-galli* – Capín; que poblaron el área descubierta, originada por el déficit hídrico que presentaban las parcelas testigo. La aparición y dominancia de las mismas se vio favorecida por las precipitaciones surgidas a partir del mes de enero en adelante.

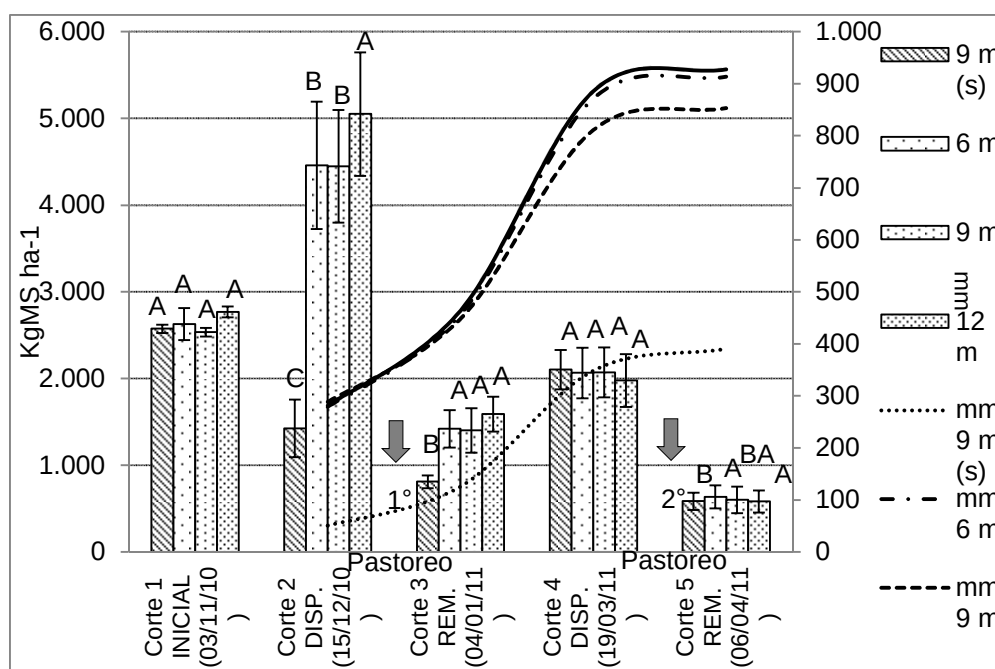


Figura No. 13. Cantidad de forraje KgMS.ha⁻¹ en 5 momentos (1 Inicial, 2 Disponibles y 2 Remanentes); con la cantidad de agua acumulada de precipitación + riego en los distintos momentos para cada uno de los tratamientos.

4.3.3. Tasa de crecimiento

Se obtuvieron tasas de crecimiento bien diferenciadas en dos etapas, una etapa “primaveral” (noviembre y diciembre) y otra etapa “estival” (enero-febrero-marzo). En los tratamientos bajo riego en la primavera se lograron valores promedio de 45 KgMS.ha⁻¹.d⁻¹ en tratamientos bajo riego en la primera y de 8-10 KgMS.ha⁻¹.d⁻¹ en verano. Esto se debe a que en estos tratamientos el principal componente de la mezcla en aportar materia seca es el trébol blanco especie perenne invernifera C3, que con el riego alarga su ciclo productivo en verano y pero igualmente se deprime su tasa de crecimiento.

La tasa negativa que se observa, se explica por la mortandad y senescencia de la pastura a causa de la seca del período en el tratamiento testigo (secano).

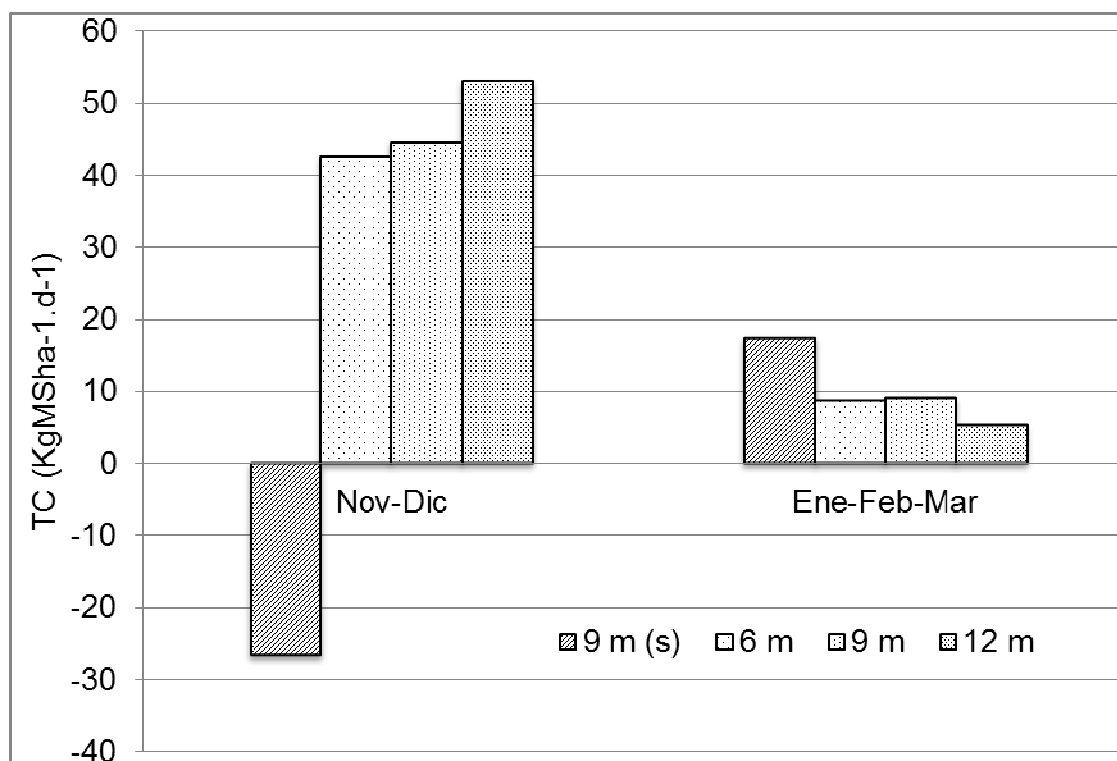


Figura No. 14. Tasa de crecimiento medida en 2 etapas, en KgMS.ha⁻¹.d⁻¹

4.3.4. Respuesta al riego

Para la sumatoria de producción de biomasa en los períodos evaluados (producción desde el 03/11/10 al 15/12/10 + producción desde el 04/01/11 al 19/02/11), la diferencia de producción de materia seca de los tratamientos regados duplica a la de los testigos sin regar. Se produce 1.286 KgMS.ha⁻¹ más que el promedio de los tres tratamientos regados durante los meses evaluados.

Cuando se analiza la respuesta al riego considerando únicamente la producción de la pradera como tal (trébol blanco y lotus); la misma se sitúa en valores promedio de 2.500 KgMS.ha⁻¹ ya que la producción que se obtiene en las parcelas no regadas corresponde a especies de malezas de verano que invaden una vez que llegan las precipitaciones en febrero.

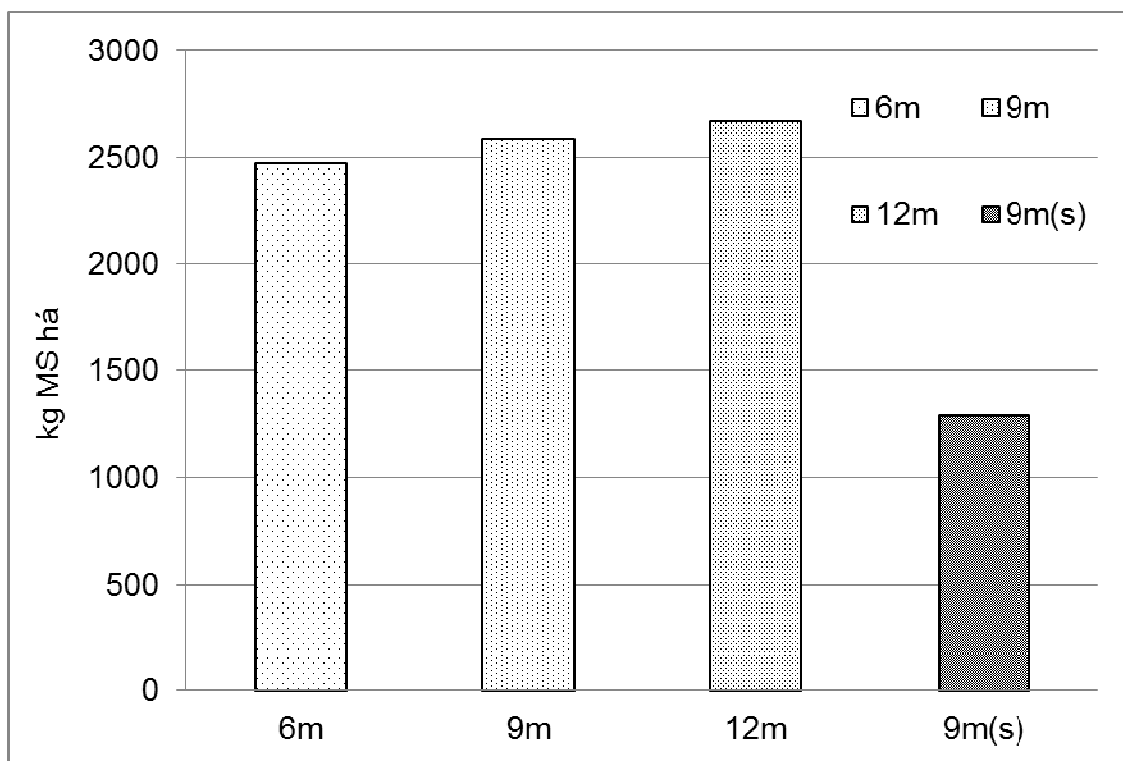


Figura No. 15. Producción de materia seca para los tratamientos, en KgMS.ha⁻¹.

En este caso podemos considerar como Respuesta de un 100% al riego, ya que en el caso de lo producido en parcelas testigos (secano) corresponde únicamente a malezas espontaneas, por lo tanto la respuesta es significativa para todos los tratamientos bajo riego comparados con el secano.

4.3.5. Eficiencia en uso de agua

La eficiencia de uso del agua para la primera etapa (Corte 2 vs. Corte 1) es de 6,6 Kg MS ha⁻¹ por cada milímetro de agua (riego + precipitaciones), mientras que en la segunda etapa (Corte 4 vs. Corte 3) la misma es de 1,3 Kg MS ha⁻¹ por cada milímetro de agua (R+PP).

La diferencia en la eficiencia de uso del agua, a favor del primer período se explica en parte por las condiciones de altas temperaturas de los meses de enero y febrero, las cuales afectan el desempeño del trébol blanco, como ya se mencionó anteriormente.

En el caso del tratamiento de secano presenta un aumento en la productividad del agua en la segunda etapa debido a la gran invasión de

especies C_4 en donde el suelo estaba prácticamente desnudo, y al momento de la llegada de las lluvias en febrero estas tuvieron un gran crecimiento.

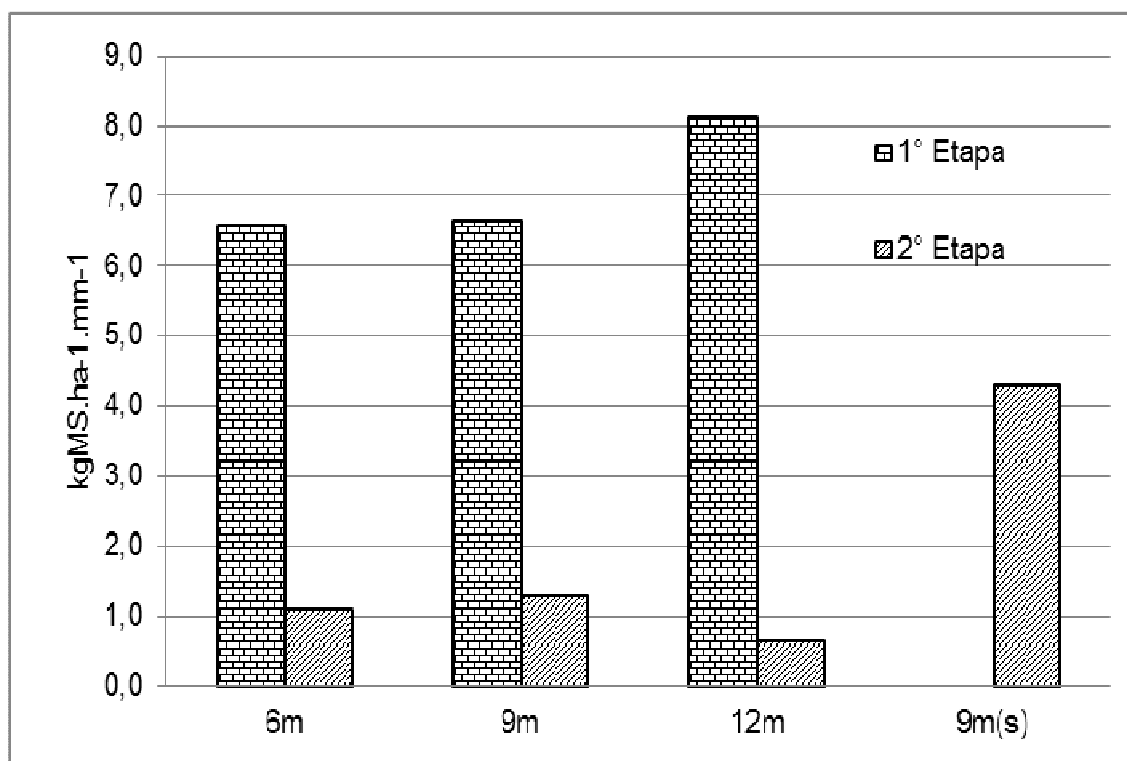


Figura No. 16. Eficiencia de uso del agua en $\text{Kg MS.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ de riego + precipitación.

4.4. SUELO

4.4.1. Curvas de infiltración

Los valores de Infiltración al inicio de la medición comenzaron en torno a los 30 cm.h^{-1} y luego de transcurridos 120 min aproximadamente se estabilizaron en valores que no superan los $2,5 \text{ cm.h}^{-1}$.

La lámina total aplicada e infiltrada para los 215 minutos que duró la medición, fue de 145 mm.

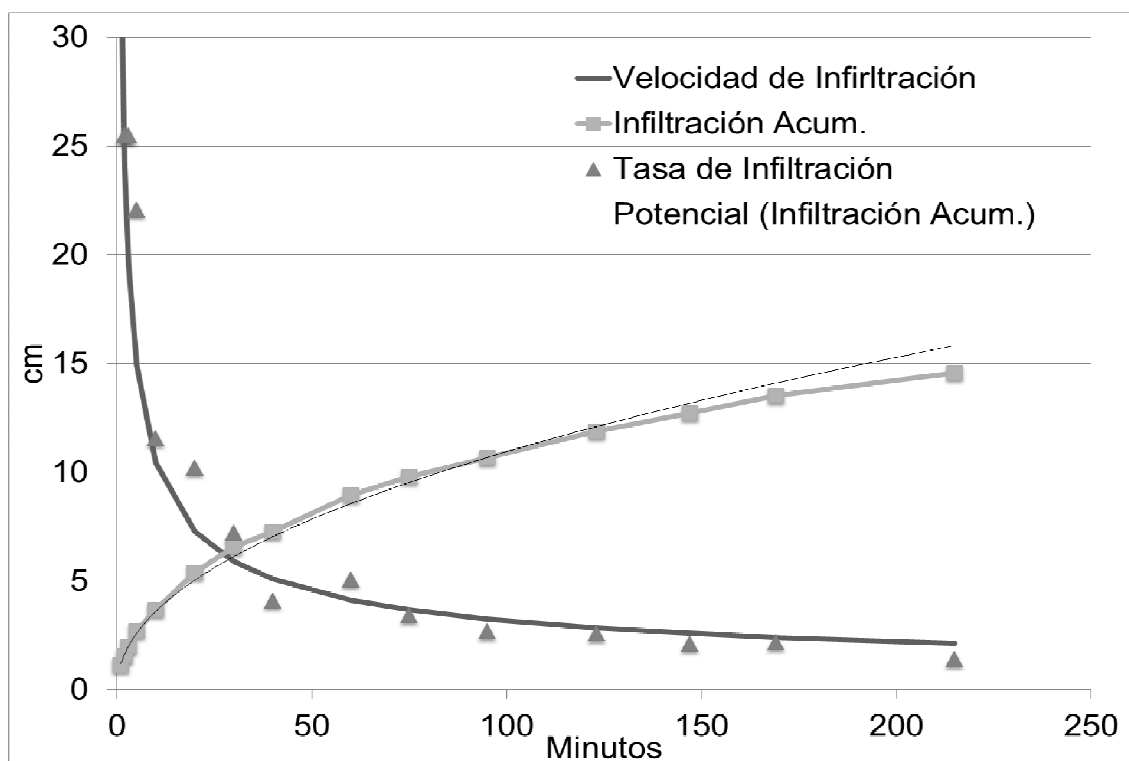


Figura No. 17. Curvas de infiltración obtenidas para el suelo del ensayo.

4.4.2. Evolución de la humedad en perfil

La evolución de la humedad en % en Volumen se presenta en las siguientes tres graficas una para cada tratamiento. La misma es medida a tres profundidades 10,30 y 50 cm, con la idea de demostrar como oscila a lo largo del tiempo y lo sucesivos riegos.

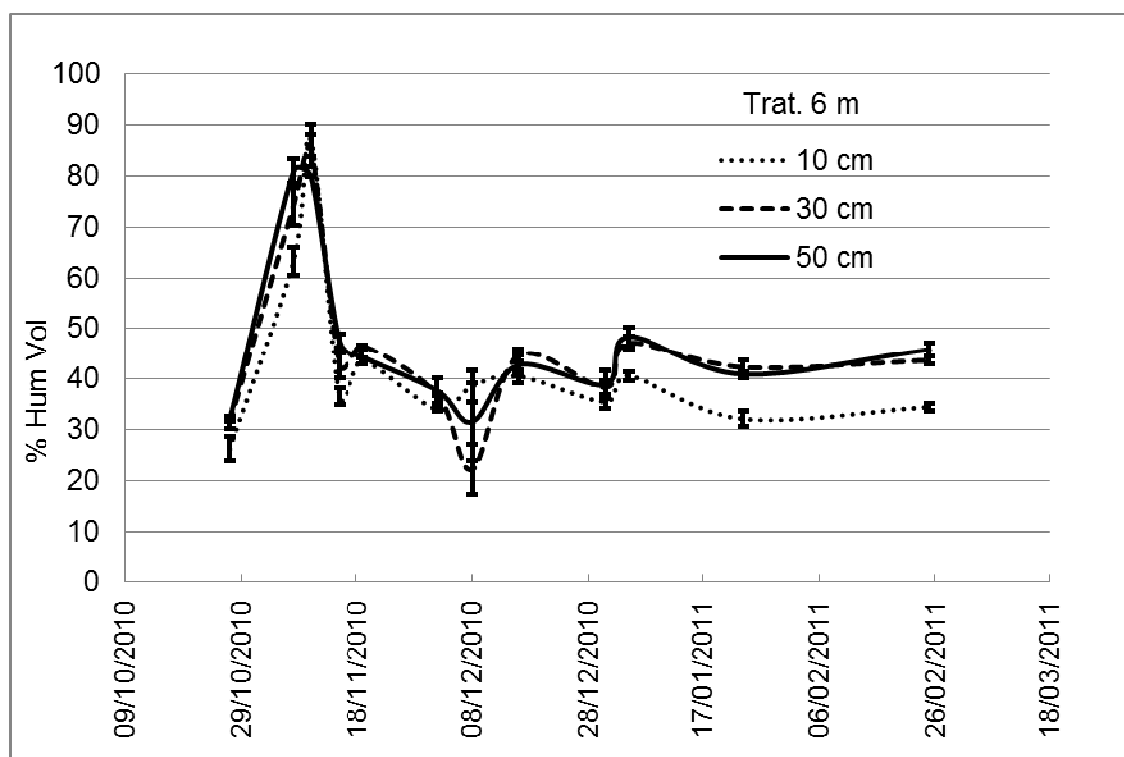


Figura No. 18. Evolución de la humedad (% Vol) para tres profundidades (10,30 y 50 cm) en el tratamiento de 6 m de ancho de melga.

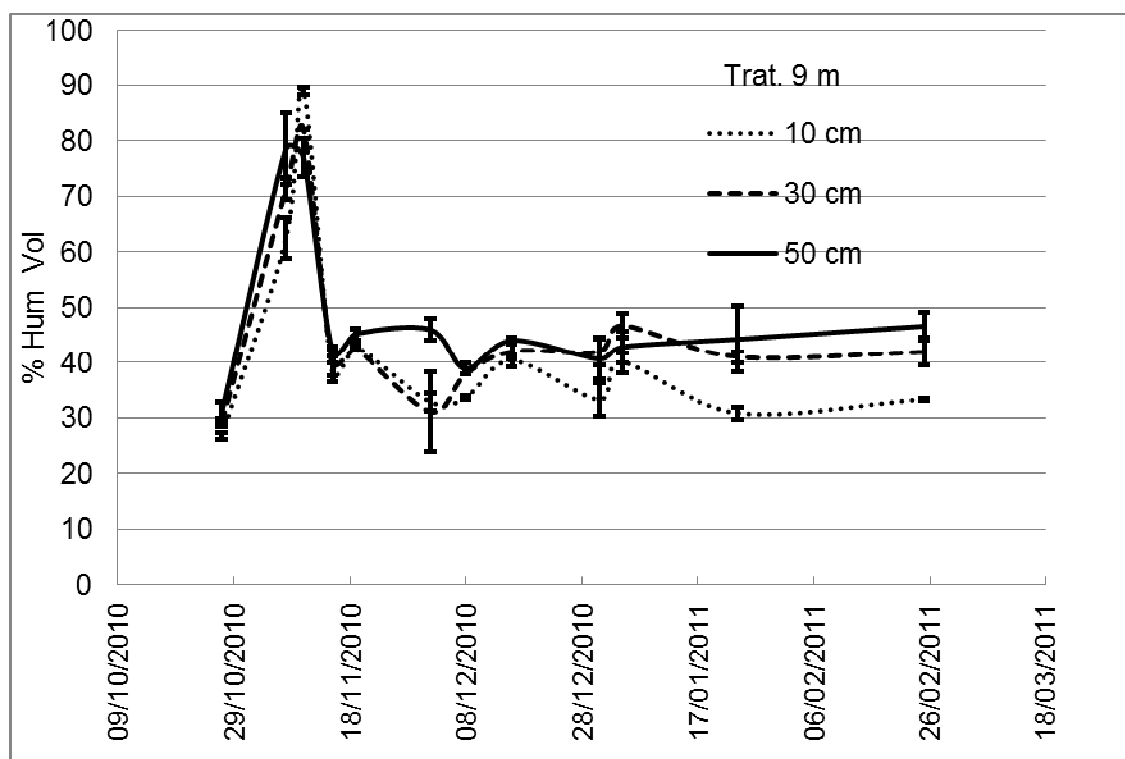


Figura No. 19. Evolución de la humedad (% Vol) para tres profundidades (10,30 y 50 cm) en el tratamiento de 9 m de ancho de melga.

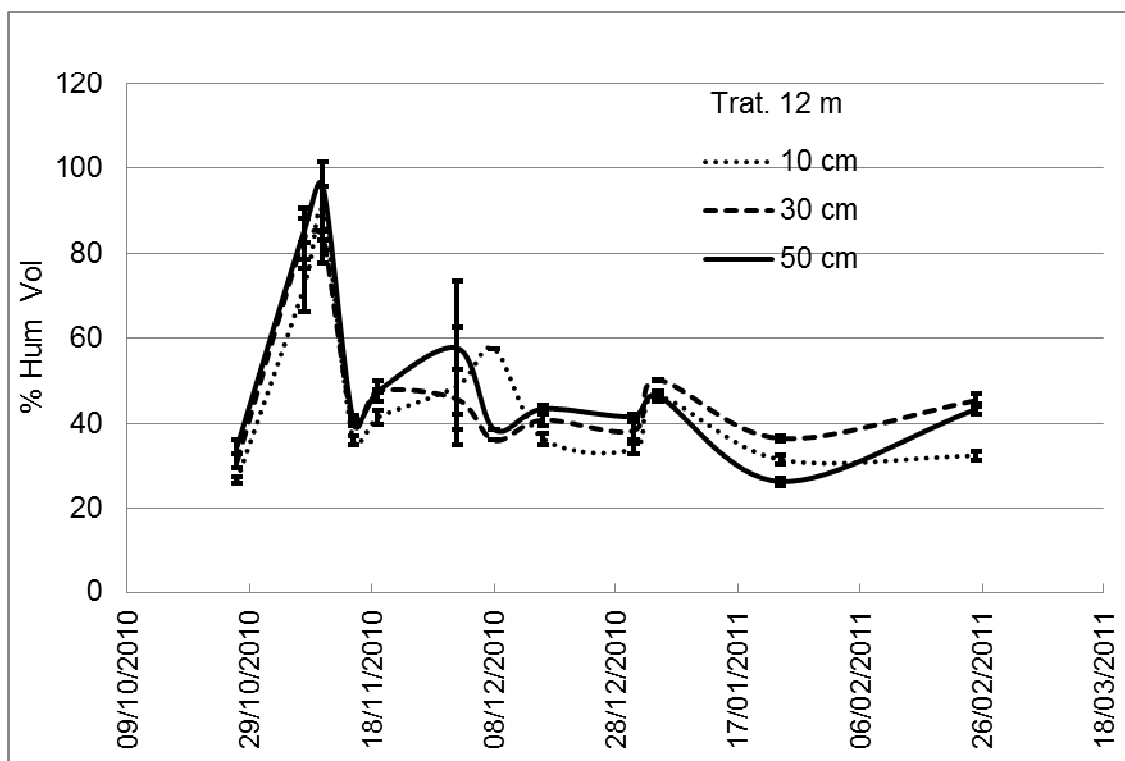


Figura No. 20. Evolución de la humedad (% Vol) para tres profundidades (10,30 y 50 cm) en el tratamiento de 12 m de ancho de melga.

La humedad en % Volumétrico se mantuvo entre 40-50% durante la mayoría del período analizado, para los tres tratamientos en los primeros 50 cm de profundidad del suelo. El caso que la misma se ubica por encima de 80%, se debe a que en un muestreo post riego se dio un evento de precipitación y el muestreo se realizó al otro día de la lluvia, registrando un perfil prácticamente saturado.

5. CONCLUSIONES

No existió diferencia significativa entre tratamientos de 6 vs. 12 en lámina de agua aplicada. Comparando tratamiento 9 vs. 6 y 12 esta diferencia si fue significativa para la lámina total aplicada.

La Eficiencia de aplicación en los 9 riegos fue de 70%.

La producción de forraje aumentó en las parcelas regadas en relación al testigo que recibió solamente agua de lluvia, durante el período de evaluación (octubre 2010 a marzo 2011).

Dicho aumento de producción de forraje provocado por el riego para el período evaluado fue de 100% más de materia seca con respecto al tratamiento de secano.

Además de la mayor producción de ms en los tratamientos regados, existen evidencias de un menor enmalezamiento al comienzo del otoño, y una mayor persistencia de la pradera.

En el período primaveral la eficiencia de uso del agua de esta pradera oscila entre 6 y 7 Kg MS.ha⁻¹.mm⁻¹ y cercano a 1,5 Kg MS.ha⁻¹.mm⁻¹ para el período estival explicándose esta diferencia principalmente por la composición de especies C3 de a pastura.

6. RESUMEN

El potencial de los sistemas de producción agropecuarios en Uruguay es altamente dependiente del régimen de precipitaciones y su variabilidad. Los valores medios de precipitación acumulada anual sobre el país se sitúan entre 1200 y 1600 milímetros. 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. En cambio es posible obtener altos nivel de producción de materia seca de las pasturas cuando los regímenes hídricos superan a la evapotranspiración, en dicho período. Surge entonces la idea del riego suplementario aplicado a especies forrajeras como herramienta tecnológica, no sólo para atenuar las faltas de lluvias en períodos breves, pero críticos en cuanto a sus efectos sobre la estabilidad en la producción, 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. El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar tecnologías de riego por melgas (también llamadas bordos) tendiente al aumento de la eficiencia de uso tanto del agua como de la mano de obra y la uniformidad del riego, evaluando diferentes anchos de melgas 6, 9 y 12 metros para una misma lámina de agua aplica por evento de riego. El diseño experimental del ensayo, constó de parcelas al azar con tres repeticiones donde los tratamientos bajo riego fueron diferentes anchos de melgas, siendo los mismos 6, 9 y 12 m, más un testigo en secano de 9 m de ancho de melga. El objetivo de los sucesivos riegos fue reponer una lámina correspondiente a 40 mm de evapotranspiración estimada por la ecuación de Penman-Monteith, evaluando diferencias de eficiencias y producción entre los diferentes anchos de melga. Durante el verano 2010-2011, los valores obtenidos rondaban los 5-7 mm de evapotranspiración diaria, por lo cual cada 6-7 días fue necesario un evento de riego. Para el total del período del ensayo la lámina aplicada promedio fue de 508 mm, distribuidos en 9 riegos, resultando en una lámina promedio por riego de 56 mm. Se observó un menor caudal (Q) en el tratamiento de 9m ya que la relación entre $L.s^{-1}$ y ancho de melga es menor para este tratamiento. En el tratamiento de 9m se utilizó una compuerta de $2,9 L.s^{-1}$; en el de 6m de ancho se utilizó una sola compuerta de $2,8 L.s^{-1}$ y en el de 12m, fueron utilizadas 2 compuertas que sumaron un total de $5,8 L.s^{-1}$. La eficiencia de aplicación (EA) promedio fue de 75% para los tres tratamientos, son satisfactorios si los comparamos con los encontrados por distintos autores que estudian sistemas de riego por superficie. Siendo el máximo de 82% y un mínimo de 69% para el tratamiento de 6 y 12 m de ancho de melga respectivamente. El tratamiento de 9 m de ancho de melga se comportó apenas por debajo al promedio con 73% de EA. Para todo el período, la diferencia de producción de materia seca de los tratamientos regados duplica a la de los testigos sin regar, dicho aumento de

producción de forraje por el riego fue de 100% más de materia seca con respecto al tratamiento de secano. Además de una gran invasión de malezas C4 en los tratamientos de secano testigo. La respuesta de la pastura para la primera etapa fue de 6,6 Kg MS ha⁻¹ por cada milímetro de agua (riego + precipitaciones), mientras que en la segunda etapa la misma es fue de 1,3 Kg MS ha⁻¹ por cada milímetro de agua (R+PP).

Palabras clave: Riego por fajas o bordos; Eficiencia de aplicación; Riego de pasturas por superficie.

7. SUMMARY

The potential of agricultural production systems in Uruguay is highly dependent on rainfall and its variability. The mean annual accumulated rainfall over the country are between 1200 and 1600 mm. During the summer and on average conditions, the water content of the soil does not meet the water demand of crops and pastures. This negative impacts are often verified in the production of annual and perennial forages. Instead it is possible to obtain high level of production of dry matter from pasture when water regimes exceed evapotranspiration during that period. This raises the idea of supplemental irrigation applied to forage as a technological tool, not only to mitigate the lack of rain in short periods, but critics in their effects on the stability in production, but also as an element of planning and incorporation the total production area, since it provides stability and increase system productivity. This paper aims to develop technologies border irrigation (also called levees) aimed at increasing the efficiency of use of both water and labor and irrigation uniformity, evaluating different widths of border irrigation 6, 9 and 12 meters for a single sheet of water applied per irrigation event. The experimental design of the test, consisted of plots at random with three repetitions where the treatments under irrigation were different broad of border irrigation, being the same 6, 9 and 12 m, more a witness in dryness of 9 m of width of border irrigation. The objective of successive irrigations was replacing a sheet corresponding to 40 mm of evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith equation, evaluating production efficiencies and differences between different widths of borders irrigation. During summer 2010-2011, the values obtained were around 5-7 mm of daily evapotranspiration, so every 6-7 days was necessary irrigation event. For the whole period of the trial the average applied sheet was 508 mm, distributed in 9 irrigations, resulting in an average sheet of 56 mm per irrigation. A lower flow rate (Q) in the treatment of 9m was observed as the ratio $L.s^{-1}$ border irrigation width is smaller for this treatment. A gate of $2.9 L.s^{-1}$ was used to treat 9m; in the 6m wide single gate $2.8 L.s^{-1}$ and 12m was used, were used two gates that totaled $5.8 L.s^{-1}$. The application efficiency (AE) average was 75% for the three treatments, are satisfactory when compared with those found by other authors studying surface irrigation systems. As the maximum of 82% and a minimum of 69 % for the treatment of 6 and 12 m wide border irrigation respectively. Treatment of 9 m width border irrigation behaved just below average with 73 % of EA. For the whole period, the difference of production of dry matter of the watered treatments duplicates that of the witnesses without acting rashly; the above mentioned increase of production of forage for the irrigation was some more 100 % of dry matter with regard to the treatment of dryness. Besides a great invasion of undergrowths c4 in the treatments of dryness witness. The response of the pasture for the first stage was 6.6 kg DM

ha⁻¹ per milliliter of water (irrigation + rainfall), while in the second stage it is was 1.3 kg DM ha⁻¹ every millimeter of water (R + PP).

Keywords: Irrigation strips or berms; Application efficiency; Irrigation of pastures by surface.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, R.; 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. (Estudio FAO. Riego y drenaje no. 56).
2. Arana, S.; Piñero, G.; García, J.; Satiñaque, F. 2000. Riego y manejo en la producción de pasturas con trébol blanco. In: Jornada de Pasturas (2000, Treinta y tres). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 5-12 (Actividades de Difusión no. 241).
3. Bautista, E.; Clemmens, A. J.; Strelkoff, T. S.; Schlegel, J. 2009. Modern analysis of surface irrigation systems whithwinsrfr. Agricultural Water Management. 96 (7): 1146-1154.
4. Burt, C. M.; Clemmens, A. J.; Strelkoff, T. S.; Solomon, R. D.; Bliesner, L. A.; Hardy, T. A.; Howell, D. E. 1997. Irrigation performance measures; efficiency and uniformity. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 123 (6): 423-442.
5. Castaño, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J.; Aunchayna, R. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Montevideo, INIA. 34 p. (Serie Técnica no. 193).
6. Clemmens, A. J. 1981. Evaluation of infiltration measurements for border irrigation. Agricultural Water Management. 3: 251-267.
7. Durán, P. J.; García, M. 2007. Desarrollo de tecnologías apropiadas para riego por surcos en terrazas paralelas y tierras con pendiente. Ingeniería del Agua. 14 (3): 187-198.
8. Elliott, R. L.; Walker, W. R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Transactions of the ASAE. 25: 396-400.
9. Failde, A.; Peixoto, C.; Estol, E.; Preve, A. 2013. Estudio sobre riego agropecuario en Uruguay. Anuario OPYPA 2013: s.p.

10. Foroud, N.; George, S. T.; Entz, T. 1995. Determination of infiltration rate from border irrigation advance and recession trajectories. *Agricultural Water Management*. 30:133-142.
11. García, C. 2010. Estrategias para la incorporación del riego en sistemas de producción extensivos. *In*: Grupo de Desarrollo del Riego; Facultad de Agronomía; Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria; IICA. PROCISUR orgs. Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. v. 1, pp. 135-140.
12. García, M. 2010. Análisis crítico del método de riego por goteo en las condiciones del Uruguay. *Agrociencia* (Montevideo). 14(1): 36 – 43.
13. Hofstadter, R. 1982. Producción de maíz, alfalfa y trébol blanco en condiciones de riego. *Agua en la Agricultura*. 1: 7-13.
14. Haydock, K. P.; Shaw N. H. 1975. The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. (en línea). *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*. 15: 663-670. Consultado 15 jul. 2014. Disponible en <http://usi.earth.ac.cr/glas/sp/50000138.pdf>
15. Lourenco, M. E. V.; Palma, P. M. M.; Silva, L. L.; Orvalho, H. 2006. Influence of supplemental irrigation on annual ryegrass. Évora, Universidad de Évora. pp. 62-64.
16. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1976. Carta de reconocimientos de suelos del Uruguay (en línea). Montevideo. Escala 1:1.000.000. Consultado 05 may. 2014. Disponible en <http://www.cebra.com.uy/renare/media/Carta-de-reconocimiento-de-Suelos-del-Uruguay-1.1.000.000-imprimir-A0.pdf>
17. 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).

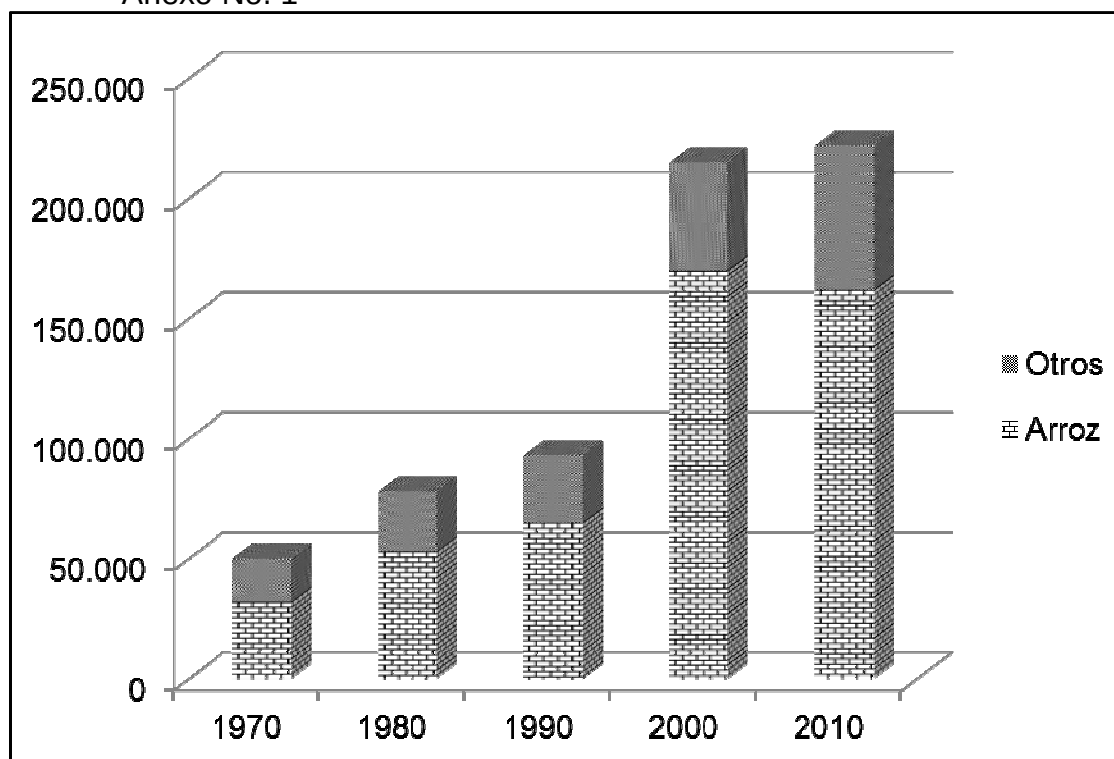
18. Pereira, L. S.; Trout, T. J. 1999. Irrigation Methods. In: Van Leir, H. N. ed. Handbook of agricultural engineering. St. Joseph, MI, ASAE. pp. 297-380.
19. Pereira, L.; Valero J. A.; Picornell, M. R.; Tarjuelo, J. M. 2010. El riego y sus tecnologías (en línea). Albacete, ES, CREA/UCLM. 296 p. Disponible en http://crea.uclm.es/crea/descargas/files/El_Riego_y_sus_Tecnologias.pdf
20. 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).
21. Pravia, V. 2009. Alternativas forrajeras estivales; utilización de *Setaria sphacelata* cv Narok bajo riego con diferentes dotaciones de novillos. In: Jornada de Divulgación de Producción Animal-Pasturas (2009, Treinta y Tres). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 13-20 (Actividades de Difusión no. 591).
22. Pritsch, O.; Hofstadter, R.; Gonnet, M. 1976. Estudios preliminares sobre el comportamiento de trébol rojo bajo riego. La Estanzuela, Colonia, CIAAB. pp. 19-24.
23. Santiñaque, F.; Battista, J. P. 2003. Niveles de agua y frecuencias de defoliación en el comportamiento de *Lotus corniculatus* L. Agrociencia (Montevideo). 7(1): 41-51.
24. Sawchik, J.; Formoso, F. 2000. 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).
25. _____; Mas, C., Pérez Gomar, E.; Bermúdez, R.; Pravia, V.; Giorello, D.; Ayala, W. 2010. Riego suplementario en pasturas: antecedentes de investigación nacional. In: Grupo de Desarrollo del Riego; Facultad de Agronomía; Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria; IICA.

PROCISUR orgs. Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. v. 1, pp. 141-154.

26. Strelkoff, T.; Asce, M. 1977. Algebraic computation of flow in border irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 103 (3): 357-377.
27. Trout, T. J.; Kinchad, .C. 2007. On farm system design and operation and land management. In: Lascano, ed. *Irrigation of agricultural crops*. 2nd. ed. Madison, WI, ASA. pp. 133-180 (Monograph no. 30).
28. Walker, W. R; Prestwich, B.; Spofford, T. 2006. Development of therevised USDA–NRCS intake families for surface irrigation. *Agricultural Water Management*. 85 (1-2): 157-164.

9. ANEXOS

Anexo No. 1



Fuente: FAO (2013)

Anexo No. 2

Humedad volumétrica (en mm/10cm de suelo)										
		Suelo Saturado		Suelo CC				Suelo CMP	Promedio c/20 cm de profundidad para la diferencia entre CC - CMP	Promedio c/20 cm de profundidad para la diferencia entre Saturado - CMP
Profundidad	Densidad	0	30	100	300	1000	5000	15000		
0-20	1,07	0,53	0,48	0,44	0,43	0,37	0,33	0,33	10,39	17,93
0-20	1,03	0,55	0,49	0,47	0,42	0,38	0,34	0,34		
0-20	1,16	0,47	0,45	0,42	0,38	0,37	0,34	0,34		
20-40	0,97	0,48	0,45	0,43	0,41	0,38	0,35	0,35	8,67	14,97
20-40	0,90	0,42	0,39	0,37	0,36	0,34	0,32	0,29		
20-40	1,10	0,59	0,52	0,49	0,47	0,43	0,39	0,39		
40-60	1,01	0,60	0,56	0,51	0,51	0,42	0,42	0,41	9,13	14,34
40-60	0,94	0,52	0,50	0,48	0,46	0,42	0,39	0,39		
40-60	1,07	0,59	0,57	0,56	0,56	0,54	0,49	0,47		

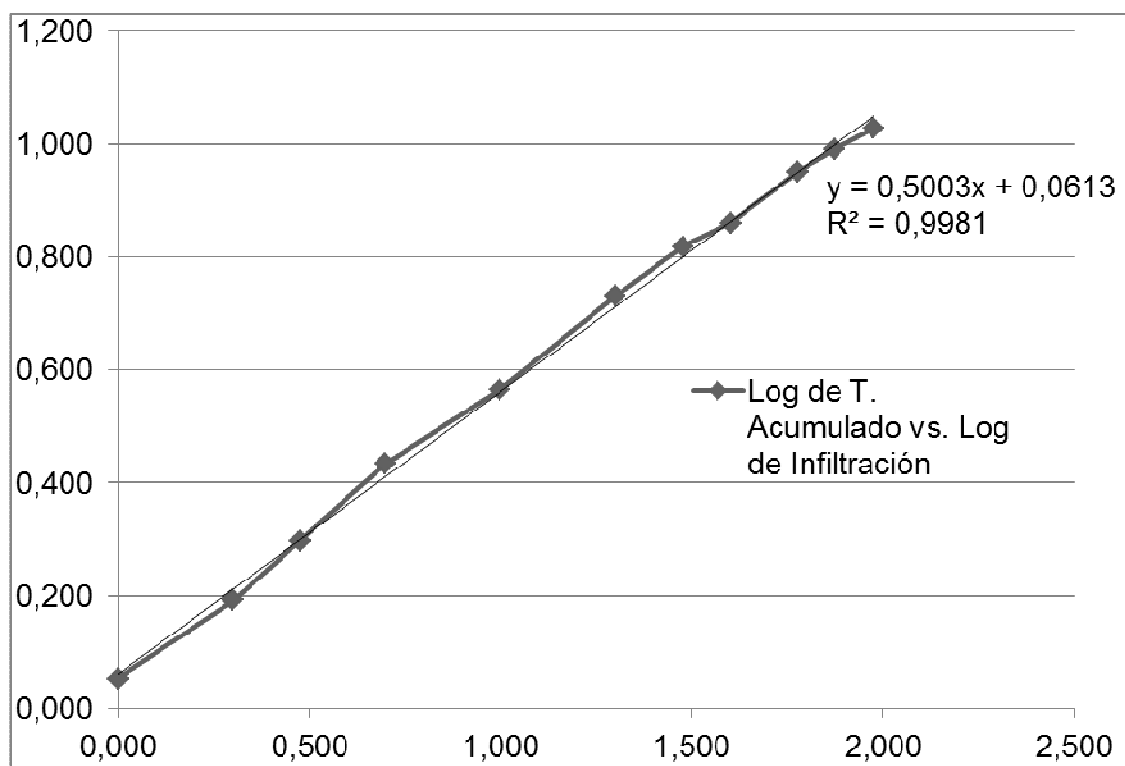
Anexo No. 3

Diámetro del cilindro menor (en cm) = **30**

Tiempo Acum. (min)	Log T. acm. X	X ²	Lectura (ml)	Lámina (cm)	Lámina (mm)	Infiltración acum. (I) (cm)	Infiltración acum. (I) (mm)	Log Infiltr. Y	X * Y
0			700						
1	0,00	0,00	1500	1,13	11,32	1,13	11,32	0,05	0,00
2	0,30	0,09	1800	0,42	4,24	1,56	15,56	0,19	0,05
3	0,47	0,22	2100	0,42	4,24	1,98	19,81	0,29	0,14
5	0,69	0,48	2620	0,74	7,36	2,72	27,16	0,43	0,30
10	1,00	1,00	3300	0,96	9,62	3,68	36,78	0,56	0,56
20	1,30	1,69	4500	1,70	16,98	5,38	53,76	0,73	0,95
30	1,47	2,18	5350	1,20	12,03	6,58	65,78	0,81	1,20
40	1,60	2,56	5830	0,68	6,79	7,26	72,57	0,86	1,37
60	1,77	3,16	7020	1,68	16,84	8,94	89,41	0,95	1,69
75	1,87	3,51	7620	0,85	8,49	9,79	97,90	0,99	1,85
95	1,97	3,91	8250	0,89	8,91	10,68	106,81	1,02	2,03
123	2,09	4,36	9100	1,20	12,03	11,88	118,84	1,07	2,24
147	2,16	4,69	9690	0,83	8,35	12,72	127,18	1,10	2,39
169	2,22	4,96	10250	0,79	7,92	13,51	135,10	1,13	2,51
215	2,33	5,44	11000	1,06	10,61	14,57	145,72	1,16	2,71
15	21,3	38,3	89930	14,57	145,7	112,3	1123,7	11,3	20,0

n =	0,482	
a =	1,189	
CI =	18,25	mm.h ⁻¹
T =	289,17	h

Velocidad de Infiltración (VI) (cm.h ⁻¹)	Velocidad de Infiltración (VI) (mm.h ⁻¹)	Tasa de Infiltración (cm.h ⁻¹)	Tasa de Infiltración (mm.h ⁻¹)
34,382	343,817	67,91	67,906
24,009	240,092	25,46	254,648
19,460	194,604	25,46	254,648
14,936	149,356	22,07	220,695
10,430	104,297	11,54	115,440
7,283	72,832	10,19	101,859
5,903	59,033	7,22	72,150
5,086	50,859	4,07	40,744
4,122	41,224	5,05	50,505
3,672	36,723	3,40	33,953
3,249	32,491	2,67	26,738
2,842	28,421	2,58	25,768
2,591	25,914	2,09	20,867
2,411	24,108	2,16	21,606
2,128	21,281	1,38	13,840



Anexo No. 4

Simulación WinSRFR					
Tratamiento 6 m ancho melga		%			
Evento	Fecha	EA	UD	Percolación	Escurrimiento
1	08/11/2010	81	69	18	0
2	16/11/2010	90	74	8	2
4	02/12/2010	78	52	22	0
7	31/12/2010	78	39	22	0
Promedio		82	59	18	1

Simulación WinSRFR					
Tratamiento 9 m ancho melga		%			
Evento	Fecha	EA	UD	Percolación	Escurrimiento
1	08/11/2010	66	33	34	0
2	16/11/2010	81	59	19	0
4	02/12/2010	79	38	21	0
7	31/12/2010	67	10	33	0
Promedio		73	35	27	0

45 m Longitud	Simulación WinSRFR				
Tratamiento 12 m ancho melga		%			
Evento	Fecha	EA	UD	Percolación	Escurrimiento
1	08/11/2010	61	72	37	2
2	16/11/2010	87	73	11	2
4	02/12/2010	54	97	0	46
7	31/12/2010	75	37	25	0
Promedio		69	70	18	13