

Modelos para programación y optimización de agua de riego en avena forrajera

Models for irrigation timing and optimization in oats for forage

Miguel Servin Palestina^{a*}

Ricardo Alonso Sánchez Gutiérrez^a

Orlando Ramírez Valle^b

Manuel Antonio Galindo Reyes^c

Héctor Gutiérrez Bañuelos^d

^a INIFAP. Campo Experimental Zacatecas. Km. 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo, 98500 Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México.

^b INIFAP. Campo Experimental Sierra de Chihuahua. Chihuahua. México.

^c INIFAP. Campo Experimental Pabellón. Aguascalientes. México.

^d Universidad Autónoma de Zacatecas. Facultad de Medicina Veterinaria, México.

* Autor de correspondencia: servin.miguel@inifap.gob.mx

● Resumen:

La avena como forraje es un cultivo de riego importante para la industria pecuaria en zonas áridas y semiáridas. Sin embargo, hay poca información sobre la relación del rendimiento de materia seca con la evapotranspiración real del cultivo o demanda hídrica, por lo que el objetivo del estudio fue generar modelos para describir el rendimiento de forraje y la productividad del agua al variar el aporte de agua de riego. Al aplicar 610.13 mm se logró el máximo ($P<0.05$) rendimiento (12.78 t ha^{-1}) y la máxima ($P<0.05$) eficiencia del uso del agua

(2.36 kg de forraje m^{-3}) fue al aplicar 463.64 mm y con rendimiento de 11.22 t ha^{-1} , cosechando a grano lechoso-masoso (155 días después de la siembra o 1,291.5 grados días de desarrollo). El modelo cúbico ajustó mejor las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación del suelo (K_c) en función de los grados días de desarrollo. Con dichos modelos y la evapotranspiración potencial, es posible representar la demanda hídrica diaria del cultivo con un modelo matemático y concluir, que la demanda máxima es de 7.15 mm dia^{-1} y la demanda óptima sin poner en riesgo el rendimiento es de 5.8 mm dia^{-1} . Estos modelos constituyen una herramienta útil para optimizar la producción de forraje con avena de riego con base en la aplicación oportuna y cantidad adecuada de agua de riego.

● **Palabras clave:** Planeación agrícola, Productividad del agua, Funciones de respuesta, Grados días de desarrollo, Uso consuntivo.

● **Abstract:**

Irrigated oats is an important forage-crop for livestock industry in arid and semi-arid zones; however, there is a lack of information regarding the relationship of dry matter yield and crop actual evapotranspiration or water demand; then the objective of the study was to develop mathematical models to describe yield and water use efficiency at different levels of irrigation water added. Maximum ($P<0.05$) yield (12.78 t ha^{-1}) was found when 610.13 mm of water was applied, highest ($P<0.05$) water use efficiency was 2.36 kg of forage m^{-3} with 463.64 mm water applied and yielded 11.22 t ha^{-1} , harvesting at the milky-dough stage (155 d after sowing or 1,291.5 degree days). Crop characteristics and mean effect of the soil evaporation (K_c), in function of the degree days, were better described by a cubic model. Using these models, in addition with the potential evapotranspiration, it is possible to estimate daily water demand, and it can be concluded that 7.15 mm d^{-1} is the maximum demand while 5.8 mm d^{-1} is the optimal demand without compromising yield. These models are a useful tool to optimize forage production from irrigated oats based on time and amount of water to be applied.

● **Key words:** Agricultural planning, Water productivity, Response functions, Degree days, Consumptive water use.

Recibido 13/03/2017

Aceptado 23/01/2018

❖ Introducción ❖

La avena como forraje es un cultivo de amplia adaptación climática^(1,2) e ideal para el ciclo otoño-invierno en zonas áridas y semiáridas por su alto contenido energético⁽³⁾. El rendimiento de forraje fluctúa de 7 a 15 t ha⁻¹ con apoyo de riego, el intervalo en rendimiento responde a la amplia variabilidad genética y a la disponibilidad de agua. Aunque se considera un cultivo de bajo requerimiento hídrico, algunos estudios presentan valores de 3,212 m⁻³ ha⁻¹⁽⁴⁾ y 3,788 a 5,290 m⁻³ ha⁻¹⁽⁵⁾ a madurez fisiológica, y los altos costos de extracción y la disponibilidad del agua de riego son factores limitantes para su producción en zonas áridas⁽⁶⁾. Por tal razón, se requiere de una aplicación en el momento oportuno y con la cantidad de agua necesaria para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo y lograr un rendimiento óptimo⁽⁷⁾. La pobre precisión en determinar los requerimientos hídricos y la aplicación de la cantidad de agua de riego basada en la experiencia empírica, puede ocasionar láminas excesivas o insuficientes en etapas críticas para el cultivo, propiciando rendimientos de forraje por debajo del potencial^(8,9). Uno de los enfoques clásicos para llevar a cabo la optimización del agua consiste en analizar la respuesta del cultivo a diferentes grados de déficit hídrico; también, obtener las relaciones funcionales que permiten maximizar el rendimiento por unidad de agua usada, así como estimar la producción del cultivo cuando este recurso es restringido^(10,11,12). Sin embargo, existe poca información de los requerimientos hídricos de la avena y la relación del rendimiento de forraje con respecto a la cantidad de agua aplicada. El objetivo del estudio fue desarrollar herramientas para la programación del riego, que permitan conocer la demanda hídrica diaria en función del coeficiente del cultivo y la respuesta en rendimiento de forraje a la cantidad de agua aplicada en una zona árida templada, para identificar la máxima eficiencia y así optimizar el uso del agua.

❖ Material y métodos ❖

El estudio se realizó en el Campo Experimental Zacatecas (CEZAC), ubicado a 22° 54' N y 102° 39' O y 2,197 msnm, temperatura media anual de 14.6 °C, ~ 600 unidades frío de noviembre a febrero, precipitación media anual de 416 mm, concentrada (75 %) en el verano

(junio a septiembre) el resto durante el invierno y una evaporación media anual de 1,609 mm⁽¹³⁾. El suelo es Kastanozem, textura franca arcillosa, pH de 7.9, 2.0 % materia orgánica, densidad aparente de 1.42 g cm⁻³, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) de 30.62 y 15.04 % respectivamente, para 0 a 30 cm y 34.63 y 15.02 % para 30 a 60 cm de profundidad de suelo.

La avena variedad Cuauhtémoc se sembró en seco el 26 de noviembre del 2015, en surcos de 0.76 m usando una sembradora de precisión a doble hilera de plantas colocadas en chorro con separación entre hileras de 0.10 m y densidad de siembra de 100 kg ha⁻¹. Se utilizaron cuatro bloques de 30 m de largo por 7 m de ancho, donde se colocó tubería de PVC de 2'', entre el bloque 1-2 y 3-4 sobre la cual se colocaron cruceros de riego dobles con válvulas de seccionamiento de polietileno de 2'' espaciadas a 6 m, quedando un total de 20 unidades experimentales. En cada bloque se distribuyeron los tratamientos al azar. La dosis de fertilización (NPK) fue 150-60-00 (urea y fosfato monoamónico solubles) fraccionada en cinco aplicaciones durante el ciclo por medio del sistema de riego a los 22, 48, 64, 91 y 125 días después de siembra (DDS) con porcentajes de 30-10, 30-10, 20-20, 10-30 y 10-30 de nitrógeno y fósforo respectivamente. Los tratamientos fueron cinco niveles de recuperación de la demanda atmosférica 110 (T110), 100 (T100), 85 (T85), 65 (T65) y 50 (T50) % de la evapotranspiración potencial (ET_{O_{in}}) calculada por el método de Penman Monteith⁽¹⁴⁾, obtenida diariamente de una estación Adcon® ubicada dentro del experimento. La aplicación de agua de riego se realizó mediante una cintilla autocompensada calibre 6 milésimas de pulgada, con separación de emisores a 20 cm y gasto del emisor de 0.94 lph y se colocó un medidor volumétrico de ½'' marca TD Meters® sobre la cintilla del surco central en cada parcela. La unidad experimental fue de seis surcos de 0.76 m por 6.0 m de largo. La parcela útil fueron los dos surcos centrales con 2.5 m de largo. La cosecha de las plantas se realizó manualmente en el estadio de desarrollo de grano lechoso-masoso. La parcela útil se cortó a 5 cm por arriba del suelo y se pesó, de allí se tomó una submuestra de 300 g que se llevó a una estufa de secado donde se dejó a 60 °C durante 72 h para calcular el porcentaje de materia seca.

Al inicio del experimento se realizó un muestreo gravimétrico para determinar el contenido de humedad residual (CHR), y así calcular la lámina de riego inicial⁽¹⁵⁾ para el establecimiento del experimento (Ec. 1), para los tratamientos 110 y 100 de ET_{O_{in}} se llevó a capacidad de campo (100 % de la humedad aprovechable). Los demás tratamientos fueron a 85, 65 y 50 % de la humedad aprovechable en los primeros 60 cm del perfil del suelo.

Las láminas de establecimiento se aplicaron por pulsos de 20 a 30 mm durante la primera semana después de la siembra, hasta cubrir el porcentaje de humedad aprovechable para cada tratamiento. Posteriormente se estableció un programa de riego con base en sumar dos veces por semana los datos diarios de la ET_{O_{in}} obtenidos de la estación Adcon y se restó la precipitación efectiva (Pe) (Ec. 2); se consideró como precipitación efectiva aquella que superó los 5 mm y sólo se considera únicamente el 75 %⁽¹⁶⁾.

$$LRE = (CC - CHR/100) * Da * Pr \quad \text{Ec. 1}$$

$$Lr_i = \sum_{i=1}^n ET_{o_{in\ i-1}} - \sum_{i=1}^n Pe_{i-1} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

LRE= lámina de riego de establecimiento (cm); **CC**= capacidad de campo (%);

CHR= contenido de humedad residual (%); **Da**= densidad aparente (g cm⁻³);

Pr= Profundidad del perfil (cm); **Lr_i**= lámina de riego (mm);

ET_o= evapotranspiración diaria en (mm);

Pe= precipitación efectiva diaria (mm); **n**= número de días entre riegos de 3 o 4 (riegos dos veces por semana).

Para determinar la lámina de riego neta (**Lr_n**) se consideró un 95 % de eficiencia de aplicación. El tiempo de riego se obtuvo dividiendo la **Lr_n** entre la tasa horaria (TH), que es la cantidad de agua suministrada por el sistema de riego en milímetros en una hora de operación, la cual fue TH = 6.18 mm h⁻¹(6). Considerando una separación entre líneas regantes de 0.76 m. Con la sumatoria de **Lr_i** de cada riego se determinó la lámina total (mm, **R**) y para corroborar el volumen total de agua en cada tratamiento se tomaron las lecturas de los medidores volumétricos. Las variables obtenidas fueron rendimiento de forraje base materia seca (kg ha⁻¹), y se calculó la evapotranspiración real del cultivo (ETc¹) que es la suma de **R** más la precipitación efectiva de todo el ciclo (Pe_i). También se calculó la eficiencia en el uso de agua **EUA** = Rendimiento / **R** y la productividad del agua **PA** = Rendimiento / ETc¹ ambas representadas en kg m⁻³(17).

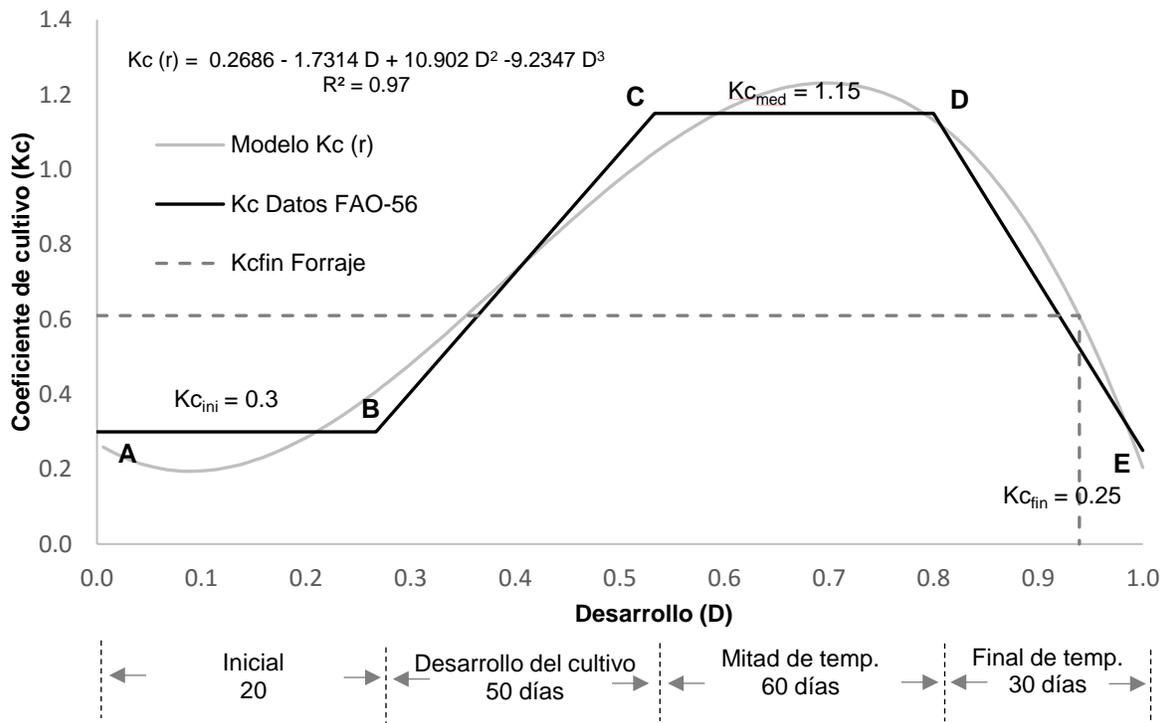
El análisis estadístico fue con análisis de varianza para las variables rendimiento, **EUA** y **PA**, con un modelo de diseño en bloques al azar; la comparación de medias fue por Tukey al 5% de probabilidad(18).

Posteriormente la función de respuesta del cultivo a los diferentes niveles de humedad, se obtuvo al relacionar los datos observados del rendimiento (t ha⁻¹) y productividad de agua (kg m⁻³) como variables dependientes y la evapotranspiración real del cultivo (mm; ETc¹) como variable independiente, y se realizó mediante una regresión en SAS con el procedimiento Stepwise, ajustándolos a un modelo cuadrático de segundo orden, de la forma: Rendimiento=β₀+β₁ETc+β₂ETc² y PA=β₃ETc+β₄ ETc², donde β₀= ordenada al origen, β₁ a β₄= coeficientes de la regresión. Para obtener la evapotranspiración del cultivo que maximiza el rendimiento de forraje: evapotranspiración del cultivo máxima (ETc_{max}) y la

evapotranspiración del cultivo que presenta el valor más alto de productividad de agua y rendimiento óptimo: Evapotranspiración óptima del cultivo ($ET_{C_{opt}}$), se realizó un análisis de optimización con la teoría de máximos y mínimos del cálculo diferencial e integral⁽¹⁹⁾. Además, se cuantificaron los días después de siembra (DDS) para las etapas de: inicio, desarrollo del cultivo, mitad de temporada y final de temporada y se calcularon los grados día de desarrollo (GDD) con la metodología curva seno modificada⁽²⁰⁾, como temperaturas base y máxima (a las cuales el desarrollo de la avena no es afectado), se tomaron 5 y 30 °C respectivamente⁽²¹⁾.

Para obtener el coeficiente del cultivo diario se utilizó el modelo $Kc(r) = -9.2347D^3 + 10.902D^2 - 1.7314D + 0.2686$, donde: $Kc(r)$ = coeficiente de cultivo de avena para grano (adimensional) y D = porcentaje de desarrollo del cultivo representando con valores de 0 a 1 obtenido con los datos del manual número 56 de la FAO de la página 106 y 111 para avena de grano⁽¹⁴⁾, utilizando la metodología descrita por Servín⁽⁶⁾ (Figura 1).

Figura 1: Curva generalizada de coeficiente de cultivo para avena de grano con datos obtenidos de manual 56 de la FAO, la línea punteada muestra el Kc final para producción de forraje en la etapa de masoso-lechoso



Para obtener el Kc final para forraje de la zona de estudio, se dividieron los días de corte en la etapa grano masoso-lechoso a los 155 DDS, entre los días que llegó a madurez fisiológica

el cultivo de avena, que fue a los 165 DDS, ($D=0.94$), el valor se sustituyó en el modelo $Kc(r)$ (Figura 1), quedando $Kc_{fin}= 0.61$, que será el valor utilizado para generar la curva generalizada de coeficiente de cultivo para forrajes de avena [$Kc(f)$], considerando los puntos observados en el experimento establecido de “AB” 35 días “BC” 40 días “CD” 60 días y “DE” 20 días y los coeficientes de cultivo de 0.3 y 1.15 para Kc_{ini} y Kc_{med} , respectivamente. Se calculó el porcentaje de desarrollo para cada etapa y se obtuvo un modelo cúbico para estimar el coeficiente del cultivo para forraje [$Kc(f)$]. Posteriormente se obtuvo el $Kc(f)$ diario y se multiplicó por la evapotranspiración potencial calculada por el método de Penman Monteith⁽¹⁴⁾, obtenida diariamente de una estación Adcon® ubicada a 1.5 km de la parcela experimental ($ET_{O_{out}}$), y se obtuvo la evapotranspiración diaria del cultivo calculada (ET_{C_i}). Finalmente se realizó una sumatoria para obtener evapotranspiración del cultivo calculada ($\sum ET_{C_i}$).

Consecutivamente con los valores de $ET_{C_{max}}$ y $ET_{C_{opt}}$ obtenidos del análisis de optimización se procesaron en “SOLVER”, una herramienta complementaria de Excel, que optimiza numéricamente los modelos sujetos a restricciones, y emplea un algoritmo matemático con el cual se encuentran las decisiones óptimas para un modelo determinado en una hoja de cálculo⁽²²⁾ y con un método de gradiente reducido generalizado⁽²³⁾ se logra un modelo de coeficiente de cultivo que maximiza el rendimiento (Kc_{max}) y el que optimiza el rendimiento (Kc_{opt}).

Posteriormente se calculó el Kc_{max} y Kc_{opt} diario y se multiplicó por $ET_{O_{out}}$ registrada diariamente en la estación agroclimática, y se obtuvo la evapotranspiración diaria del cultivo calculada $ET_{C_{max}}$ y $ET_{C_{opt}}$, que al relacionarlas con el porcentaje de desarrollo (de 0-1) obtenido con los grados días de desarrollo, se obtienen los modelos máximos y óptimos de uso consuntivo para producción de forraje de avena en clima árido templado.

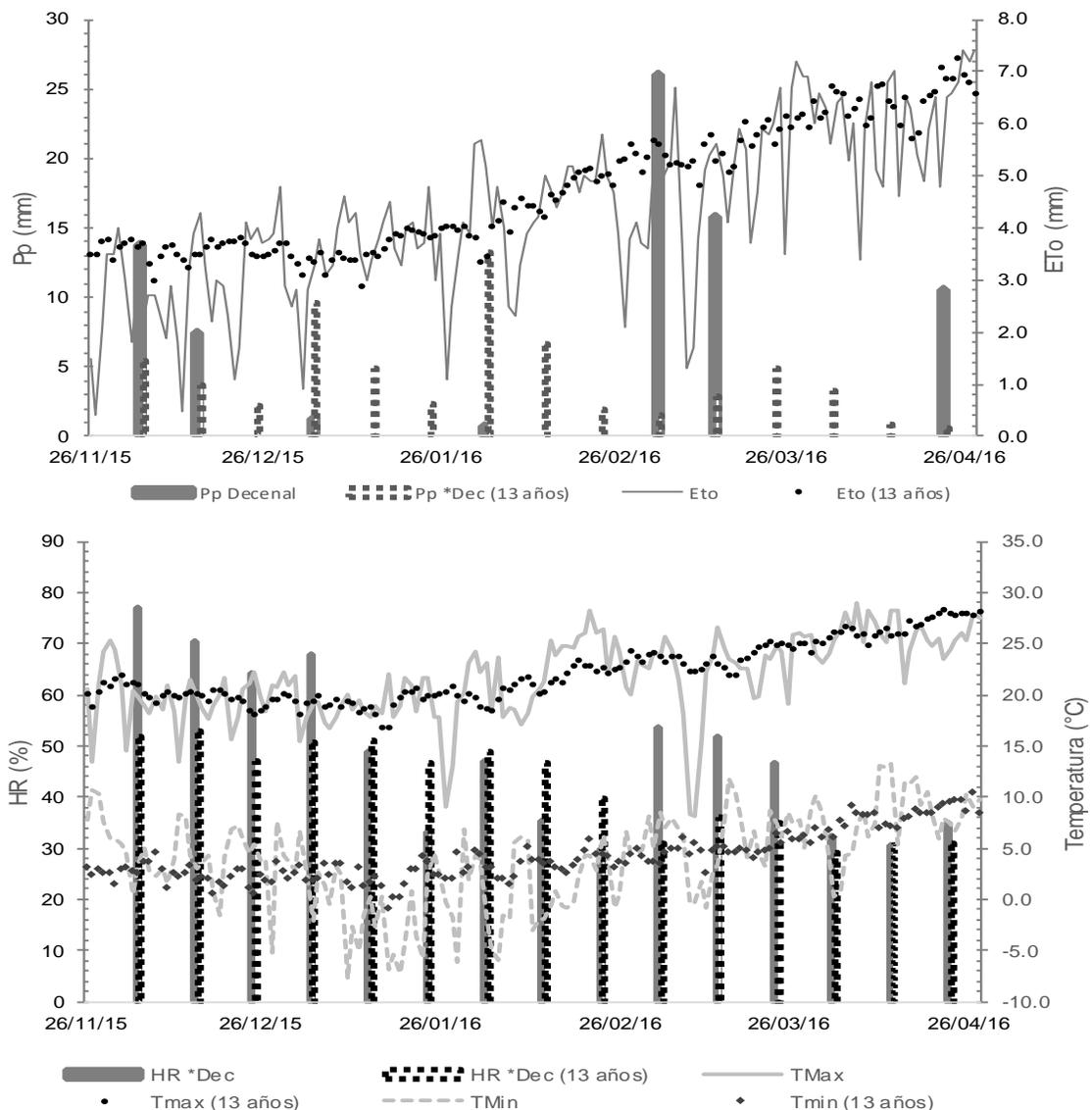
Resultados

● Condiciones climáticas ●

La precipitación del ciclo de desarrollo del cultivo fue de 75.7 mm; mientras que el promedio de los últimos 13 años (2002 a 2015) fue de 64.59 mm; esto indica que el ciclo de establecimiento del experimento fue más húmedo sobre todo en diciembre y marzo, ya que

se registró el 74 %, mientras que los meses de enero y febrero solo se registraron 7 mm, mostrando una distribución irregular con un periodo muy largo de sequía, mientras que en los promedios históricos se muestra una distribución más uniforme. Para ET_0 durante la estación de crecimiento fue 663.4; y el promedio histórico fue de 734.4 mm, esto significa una disminución de 10.7 % en ET_0 , sobre todo en diciembre y marzo. Estos meses coinciden con las precipitaciones y por consiguiente en el incremento de la humedad relativa. En cuanto al promedio de las temperaturas para la estación de crecimiento fueron 21.65 y 3.83 °C, un poco inferiores a los promedios históricos de 22.19 y 4.24 °C para la T_{max} y T_{min} respectivamente (Figura 2).

Figura 2: Variables climáticas registradas durante la estación de crecimiento y promedios históricos (13 años) de la estación CEZAC INIFAP-Zacatecas. *Promedios decenales



● Rendimiento y productividad ●

El tratamiento que mostró el rendimiento más alto ($P<0.05$) fue T85 con 12.7 t ha^{-1} , los tratamientos extremos presentaron los rendimientos más bajos sin diferencia ($P>0.05$) entre ellos. El rendimiento incrementó gradualmente con la lámina de riego hasta llegar a T85 y posteriormente se redujo a mayor lámina de riego. La EUA y PA fueron máximos ($P<0.05$) con T50, con valores de 2.64 y 2.40 respectivamente, aunque en rendimiento fue de los tratamientos más bajos; T110 mostró un rendimiento similar al de T50, pero con la mayor cantidad de agua aplicada (757 mm), por lo que EUA fue 92 y 69 % menor que T50 y T85 respectivamente (Cuadro 1).

Cuadro 1: Rendimiento base materia seca, eficiencia y productividad de agua en avena en etapa de lechoso-masoso irrigada a diferente proporción de la evapotranspiración potencial (ETo)

ETo (%)	R (mm)	Pe _t (mm)	ETc ¹ (mm)	MS (t ha ⁻¹)	EUA (kg m ⁻³)	PA (kg m ⁻³)
50	383		422	10.13±0.4 c	2.64±0.12 a	2.40±0.11 a
65	446		485	11.72±0.4 b	2.62±0.09 b	2.42±0.08 b
85	551	39	590	12.78±0.2 a	2.32±0.05 b	2.17±0.04 b
100	708		747	11.21±0.2 b	1.58±0.03 c	1.50±0.03 c
110	757		796	10.39±0.2 c	1.37±0.03 c	1.31±0.03 c
CV				3.05	3.52	3.46
MSE				0.34	0.07	0.06

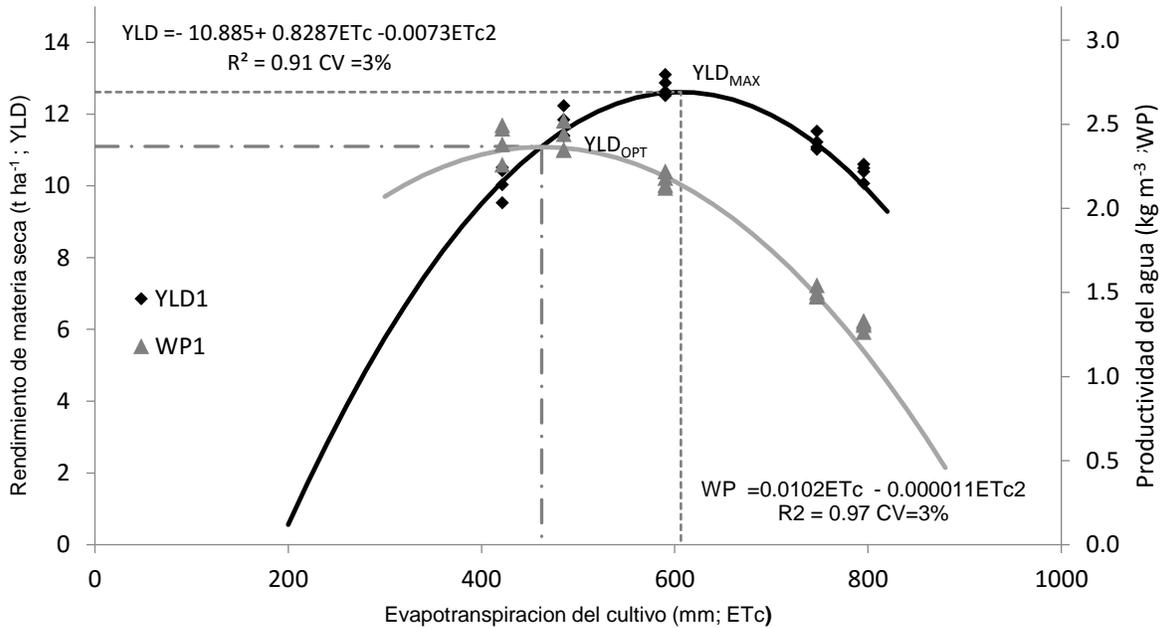
R = lámina de riego aplicada; Pe_t= precipitación efectiva total; ETc¹= evapotranspiración real del cultivo; MS= rendimiento base materia seca; EUA= eficiencia en el uso de agua; PA= productividad de agua de riego; CV= coeficiente de variación; MSE= cuadrado medio del error.

abc Medias en igual columna con al menos una literal en común no son diferentes (Tukey al 5%).

● Modelos de optimización ●

Rendimiento y PA mostraron una relación cuadrática con los cambios en ETc_1 con un ajuste aceptable y coeficientes de regresión diferentes de cero ($P \leq 0.01$) (Figura 3). El punto de máximo de rendimiento y máxima PA no coincidieron, donde se intersectan ambas curvas se encuentra el punto óptimo para productividad del agua y rendimiento considerados en conjunto.

Figura 3: Relación de rendimiento de materia seca y productividad de agua del cultivo de avena para forraje sometida a déficit hídrico en Zacatecas, México

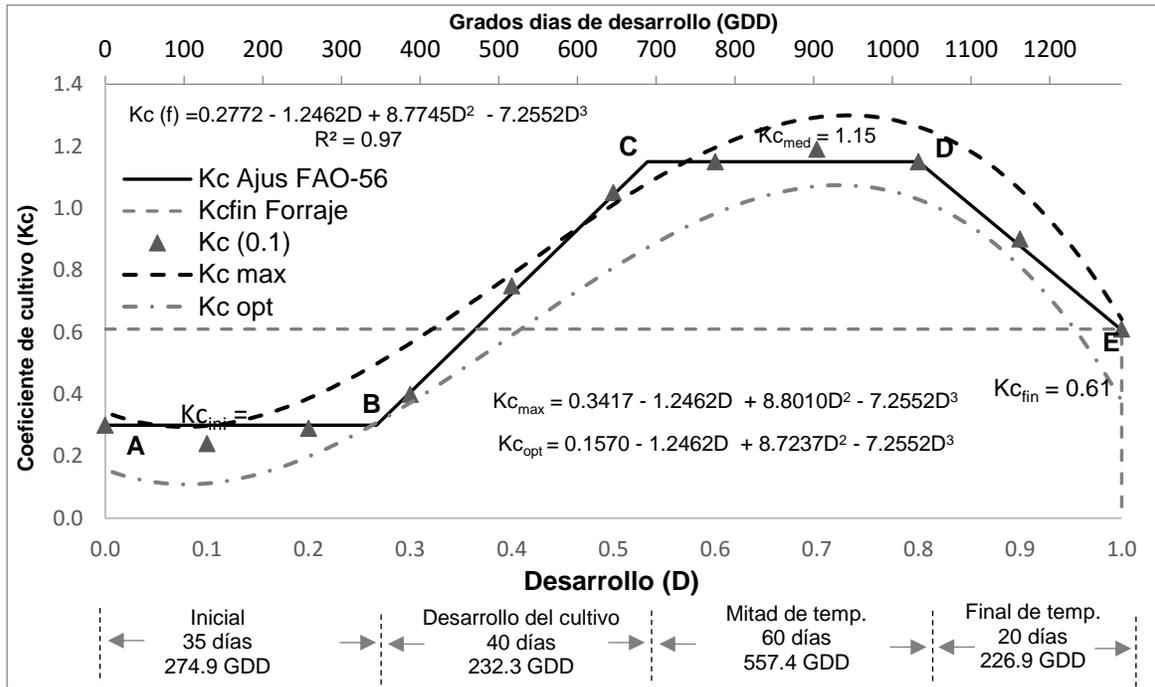


Con los modelos de rendimiento y PA el análisis de optimización permite deducir que la avena forrajera maximiza su producción a $12.78\ t\ ha^{-1}$, cuando consume $ETc_{max} = 610.13\ mm$ y la máxima productividad del agua de $2.36\ kg\ m^{-3}$ se alcanza cuando consume $ETc_{opt} = 463.64\ mm$ presentando un rendimiento óptimo de $11.22\ t\ ha^{-1}$, hasta los 155 DDS que abarca de la siembra al estado lechoso-masoso.

● **Coefficiente de cultivo ajustado** ●

Con los datos observados de 35, 40, 60 y 20 días para la etapa de: inicio, desarrollo del cultivo, mitad de temporada y final de temporada respectivamente, se obtuvo el desarrollo acumulado Kc, donde: B=0.27, C=0.53 D=0.80 (A y B es 0 y 1 respectivamente) y valores de coeficiente de cultivo de: Kcini=0.3, Kcmed=1.15 y Kcfin=0.61. Se generó la curva generalizada de kc, posteriormente se ubicaron 10 puntos para suavizar la curva (Figura 4) y se sometió a un análisis de regresión.

Figura 4: Curva generalizada del coeficiente de cultivo de avena para forraje en la etapa de masoso-lechoso



Línea negra representa los valores de Kc (Fuente: FAO-56), mientras que las líneas punteadas son el resultado de análisis de optimización de Kc max y Kc opt.

Los grados días de desarrollo por etapa fueron: AB=274.9, BC=232.3, CD=557.4 y DE=226.9 que corresponden a: inicio, desarrollo del cultivo, mitad de temporada y final de temporada, respectivamente, el total fue 1,291.5 GDD durante los 155 días del cultivo, que al hacer divididos entre los grados diarios acumulados de siembra hasta la cosecha del forraje, da como

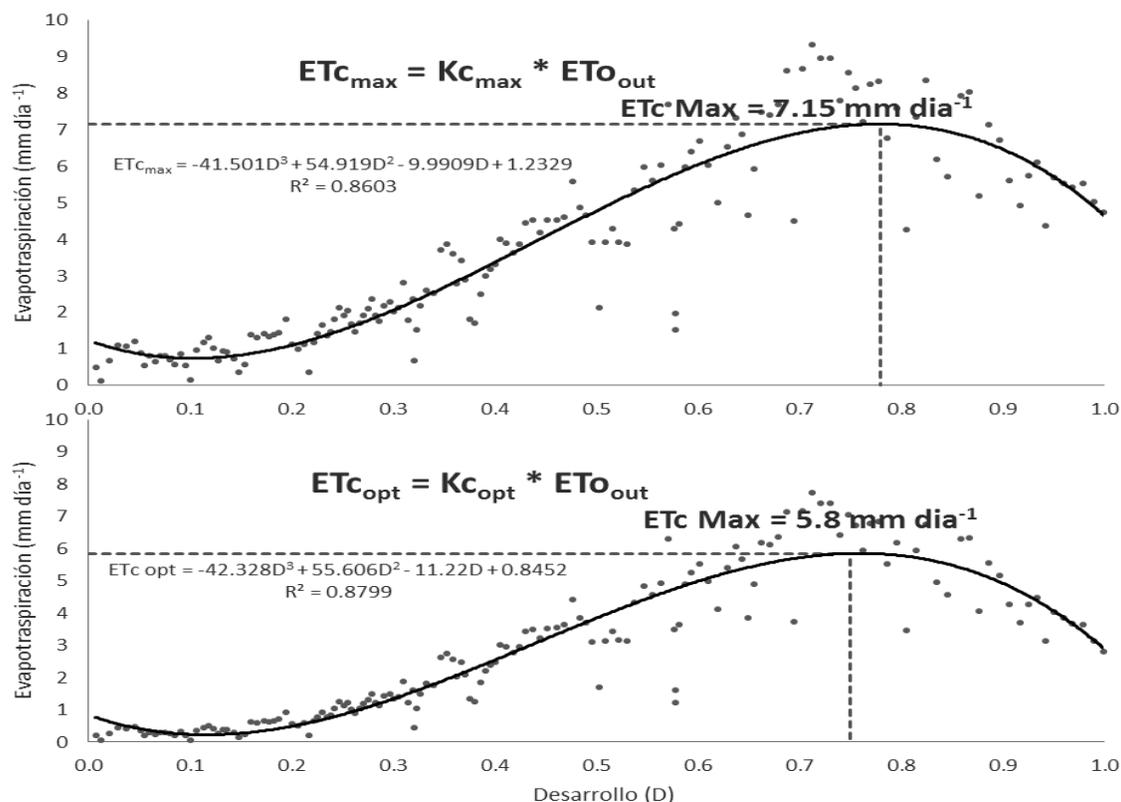
resultado el porcentaje de desarrollo, que al sustituirlo al modelo $Kc(f)$ genera el coeficiente de cultivo diario y al multiplicarlo por la $ET_{O_{out}}$ diaria resulta una $\sum ET_c = 520.02$ mm.

Al someter el análisis en “SOLVER” por medio de interacciones y cambiar los valores positivos de modelo $Kc(f)$, $\beta_0 = 0.2772$ y $\beta_2 = 8.7745$, hasta $ET_{c_{max}} = \sum ET_c$ y $ET_{c_{opt}} = \sum ET_c$ se obtuvieron los modelos que se muestran en la Figura 4, donde: Kc_{max} = coeficiente de cultivo que maximiza el rendimiento (adim); Kc_{opt} = coeficiente de cultivo que optimiza el rendimiento (adim) y D = porcentaje de desarrollo representado en tanto por 1 en función de los grados días de desarrollo.

● Evapotranspiración del cultivo ●

Al relacionar las necesidades de agua de cultivo representada en evapotranspiración de cultivo (ET_c) como variable dependiente, que es el producto de la $ET_{O_{out}}$, por el coeficiente del cultivo diario (obtenidos de los modelos de Kc_{max} y Kc_{opt}) y porcentaje de desarrollo en función de los grados días de desarrollo acumulados representado de 0 a 1 como variable independiente, se obtuvo un modelo polinomio de tercer grado mediante un análisis de regresión, y de esa manera calcular la demanda de agua diaria del cultivo (Figura 5).

Figura 5: Evapotranspiración diaria del cultivo cuando maximiza su rendimiento y cuando el cultivo optimiza su rendimiento



Con los resultados mostrados en la Figura 5, se puede deducir, que la demanda evapotranspirativa máxima del cultivo es de 7.15 mm día⁻¹ para alcanzar un rendimiento máximo y 5.85 mm día⁻¹ para alcanzar la mayor productividad del agua, valores que se representa como uso consuntivo para producción de avena forrajera de otoño e invierno para zonas áridas templadas.

Discussion

A pesar que la precipitación no fue una variable importante para determinar la cantidad de agua aplicada en cultivo ($Pe=39 \text{ mm}$), tuvo un efecto indirecto en la demanda evapotranspirativa, ya que se observó un efecto en humedad relativa y temperaturas, variables importantes en el consumo de agua en los cultivos⁽²⁴⁾. Los procesos fisiológicos que se realizan durante el crecimiento y desarrollo de las plantas están fuertemente

influenciados por la temperatura. Su variación depende de la especie y variedad, ya que para cereales de invierno se han aceptado umbrales de 4 a 5°C⁽²⁵⁾. Durante el presente estudio se observó un promedio de temperatura mínima de 3.83 °C, lo que ocasionó que se alargara el ciclo vegetativo de 150 días a 165 días hasta grano maduro de avena⁽²⁶⁾.

Los rendimientos coinciden con Jiménez⁽²⁷⁾ y Gutiérrez⁽²⁸⁾, ya que mencionaron rendimientos de forraje en los Valles Altos de México de 9 a 13 t ha⁻¹ con las variedades Saia, Ópalo y Cevamex. Espitia *et al*⁽²⁾ evaluaron 24 genotipos de avena en cuatro localidades del centro del país en P-V en temporal donde se presenta Pp mayor de 400 mm durante el ciclo, con valores de 10 a 19 t ha⁻¹ sembrada a chorrillo en surcos espaciados a 30 cm; sin embargo, son inferiores a los reportados por otros autores⁽²⁶⁾ que obtuvieron 17.2 t ha⁻¹ en la etapa de grano masoso en Zacatecas con la variedad Chihuahua sembrada de la misma manera (surco doble hilera) con 80 kg de semilla por ha, con una dosis de fertilización de 80-46-0 Kg ha⁻¹ de N P K respectivamente. Usando como fuentes sulfato de amonio y superfosfato triple en dos aplicaciones 50-100-0 % a la siembra y 50-0-0 % al primer riego de auxilio, con una lámina total aproximada de 40 cm aplicada con multicompuertas.

Las láminas de riego aplicadas para cereales de invierno se reportan en 500 a 600 mm por ciclo⁽²⁹⁾, que corresponden a ciclos completos hasta madurez fisiológica, que es más largo que para forraje. También se han reportado láminas de 65.3 cm y rendimientos de materia seca de 7.27 kg ha⁻¹ para la variedad Avemex (1.14 kg MS m⁻³) sembrada en surcos a doble hilera con una dosis de 100-70-00 de NPK⁽³⁰⁾, y rendimientos de 13.7 t ha⁻¹ con láminas de riego de 55 cm y una productividad de 2.5 kg m⁻³⁽³¹⁾. Las variaciones de los resultados reportados en los diferentes trabajos de investigación son atribuibles a la variedad, ambiente agroecológico y manejo, principalmente de riego y siembra.

Además, con riego superficial en la Comarca Lagunera una tendencia lineal entre rendimiento de materia seca y el agua aplicada. Las láminas reportadas fueron de 44.3 a 62.5 cm mientras que los rendimientos fueron de 14.28 hasta 15.53 t ha⁻¹ con eficiencias en el uso de agua de 3.14 a 2.14 kg de forraje por m⁻³⁽³²⁾. Otros autores reportan para sorgo una relación sigmoideal entre el rendimiento y el agua aplicada mediante el riego^(33,34,35). Es importante explorar toda la curva, donde el cultivo tenga exceso de agua, y por otro lado esté sometido a estrés donde la ETreal sea menor a ETmax, para los cultivos forrajeros el exceso de vigor no será un problema, pero sí la mala aireación⁽³⁶⁾.

Con lo que respecta a Kc para avena forrajera algunos reportes de investigación presentan valores de Kc_{ini}=0.4, Kc_{med}=1.20 y Kc_{fin}=0.8⁽³⁷⁾ que están por encima de los que se tomaron de referencia que son trabajos más recientes. El Kc comienza teniendo valores pequeños y aumenta a medida que la planta cubre el suelo⁽¹⁴⁾. Los valores máximos de Kc se alcanzan en la floración, se mantienen durante la fase media y finalmente decrece durante la fase de maduración, tendencias similares son reportadas^(38,39,40).

Dellacanonica *et al*⁽⁴¹⁾, realizaron un balance hídrico del suelo en avena y mencionan que las necesidades netas del cultivo fueron 370 mm sometido a un déficit hídrico de 38 hasta 46 %. Con rendimientos promedios de 9.40 t ha⁻¹ de MS, el déficit hídrico suele provocar pérdida de turgencia y en consecuencia una disminución en la tasa de crecimiento⁽⁴¹⁾. De acuerdo a los resultados mostrados 610.13 mm el cultivo expresa su potencial en función del agua disponible y 463.64 mm el cultivo es sometido a un déficit controlado que no pone el riesgo la tasa de crecimiento.

❖ Conclusiones e implicaciones ❖

En avena para forraje la relación de rendimiento de forraje y eficiencia del uso del agua se describe mediante un modelo cuadrático con respecto de la cantidad de agua de riego aplicada, sin coincidencia en los niveles de agua aplicada para lograr máximo rendimiento y máxima eficiencia. El modelo cúbico de coeficiente del cultivo óptimo ($K_{c_{opt}}$) es una herramienta confiable para calcular la demanda hídrica diaria de avena para forraje en función de los grados días de desarrollo, lo que a su vez permite una programación y calendarización de riego en tiempo real en periodos mayores de un día sin poner en riesgo el rendimiento de forraje de avena.

● Literatura citada:

1. Sánchez GRA, Gutiérrez BH, Serna PA, Gutiérrez LR, Espinoza CA. Producción y calidad de forraje de variedades de avena en condiciones de temporal en Zacatecas. *Rev Mex Cienc Pecu* 2014;5(2):131-142.
2. Espitia RE, Villaseñor ME, Tovar GR, de-la-O OM, Limón OA. Momento óptimo de corte para rendimiento y calidad de variedades de avena forrajera. *Rev Mex Cienc Agr* 2012;3(4):771-783.
3. Ghanbari BA. Intercropped wheat and bean as a low-input forage [doctoral thesis]. London: Wye College Univ; 2000.
4. Abraha MG, and Savage MJ. The soil water balance of rainfed and irrigated oats, Italian rye grass and rye using the CropSyst model. *Irrigation Sci* 2008;26(3):203-212.

5. Drastig K, Prochnow A, Libra J, Koch H, Rolinski S. Irrigation water demand of selected agricultural crops in Germany between 1902 and 2010. *Sci Total Environment* 2016;(569):1299-1314.
6. Servin PM. Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real [tesis maestría], Texcoco México. Colegio de Potsgradudados; 2015.
7. Inzunza IMA, Villa CM, Catalán VEA, Mendoza MSF. Modelo para estimar el rendimiento de maíz en función de la humedad del suelo. *Terra Latinoamericana*, 2006;24(2):179-185.
8. Sammis, TW. Yield of alfalfa and cotton as influenced by irrigation. *Agronomy J* 1981;73(2):323-329.
9. Abdul-Jabbar, AS, Sammis TW. Effect of moisture level on the root pattern of alfalfa. *Irrigation Sci* 1982;3(3):197-207.
10. Reck, WR, Overman AR. Estimation of corn response to water and applied nitrogen. *J Plant Nutr* 1996;19(1):201-214.
11. Llewelyn RV, Featherstone AM. A comparison of crop production functions using simulated data for irrigated corn in western Kansas. *Agric Systems* 1997;54(4):521-538.
12. Reza J, Roldan J, Alcaide M, López R, Camacho E. Optimization model for water allocation in deficit irrigation systems. I. Description of the model. *Agric Water Manage* 2001;48(2):103-116.
13. Medina G, Ruíz A. Estadísticas Climatológicas Básicas del Estado de Zacatecas (Período 1961 – 2003). SAGARPA-INIFAPCIRNOC- Campo Experimental Zacatecas. Libro Técnico No. 3. 2004.
14. Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje 56. Roma, Italia; 2006.
15. Palacios VE. ¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar?: para lograr mejores cosechas. México, DF: Editorial Trillas; 2002.
16. Serna PA, Zegbe JA, Mena CJ. Rendimiento y calidad de chile seco Mirasol cultivado bajo riego parcial de la raíz. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 2011;17(SPE 1):19-24.
17. Caviglia OP, Andrade FH. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. *Am J Plant Sci Biotechnol* 2010;3:1-8.

18. SAS. Version 9.3 [Computer software]. SAS Institute, Cary, NC. 2011.
19. Steel RG, Torrie JH, Dickey DA. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. Third ed. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc; 1997.
20. Villa CM, Catalán VE, Román LA, Inzunza IMA, Mendoza M, Duarte J, Báez A, Gómez L. Parámetros fisiotécnicos y requerimientos agroclimáticos de la canola (*Brassica napus* L.) *Agrofaz* 2007;9:13-19.
21. Roupheal Y, Cardarelli M, Rea E, Colla G. The influence of irrigation system and nutrient solution concentration on potted geranium production under various conditions of radiation a temperature. *Scientia Horticulturae* 2008;118(4):328-337.
22. Eppen GD, Gould FJ, Schmidt CP, Moore JH, Weatherford LR. Investigación de operaciones en las ciencias administrativas. Trad. Español. González, RAC, Sánchez, GG. 5th ed. México, DF: Pearson; 2000.
23. Muramatsu M. Risk solver. Versión 11.5. Incline Village, Nevada, EUA: Frontline systems Inc.; 2011.
24. Sánchez DM, Aguirreola J. Relaciones hídricas. En: Azcon D, Talon M, editores. *Fisiología y bioquímica vegetal*. España: Mc Graw-Hill Interamericana de España; 1996:49-90.
25. Villalpando IJF. Metodología de investigación en agroclimatología. Documento de circulación interna mimeografiado. INIA-SARH. Zapopan, Jalisco. 1985.
26. Nájera MDJ, Gutiérrez SRA, Cháirez EFG, Luna GR, Nieto RCA, González SH. Producción y calidad de forraje en mezclas de veza común con cebada, avena y triticale en cuatro etapas fenológicas. *Rev Mex Cienc Pecu* 2016;7(3):275-291.
27. Jiménez GCA. Descripción de variedades de avena cultivadas en México. Campo Experimental Valle de México. CIRCE. INIFAP. SARH. Chapingo, Estado de México. Folleto técnico Núm. 3. 1992.
28. Gutiérrez JM. Cómo producir avena forrajera de temporal en el estado de México. INIFAP. 500 Tecnologías Llave en Mano. INIFAP-SAGAR. Tomo I, México. 1999.
29. Gutiérrez JM. Cómo producir avena forrajera de temporal en el estado de México. INIFAP. 500 Tecnologías Llave en Mano. Serie 1999. Tomo I. INIFAP-SAGAR. México. 1999:17-18.
30. Jasso IR, Faz CR, Berzoza MM, Chávez SN, Nuñez HG, Orozco HG. Requerimientos hídricos y manejo del agua de riego en cultivos forrajeros. Campo Experimental Delicias CIRNOC-INIFAP, Folleto Científico No. 4. 2007.

31. García HRV, Flores GH, Narváez MMP, Osuna CES. Eficiencia en el uso del agua y producción de forraje en avena (*Avena sativa* L.) invernal. Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED Venecia Durango, México. 2016:603-608.
32. Anaya SA, Núñez HG, Cruz CJJ, Faz CR, Rodríguez HK, Figueroa VU, Serrato MHA. Producción, manejo y eficiencia en el uso del agua en explotaciones lecheras de la Región Lagunera en el período 2011-2013. AGROFAZ 2014;14(1):119-128.
33. Núñez HG, Cruz CJJ, Iván SO, Rodríguez HK, Sánchez DJ. Modelo de procesos para el diagnóstico del uso del agua de riego en la producción de forrajes en explotaciones lecheras del sistema intensivo en ambientes cálido y templado. AGROFAZ 2012; 12(4):103-111.
34. Musick JT, Dusek DA. Grain sorghum response to number, timing, and size of irrigations in the Southern High Plains. Trans. ASAE 1971;14(3):401-404.
35. Martin DL, Watts DG, Gilley JR. Model and production function for irrigation management. J Irrigat Drain Eng 1984;110(2):149-164.
36. Santa-Olalla MM, Valero JAJ. Las funciones de producción versus agua. 1ra ed. Madrid, España: Mundi Prensa; 1993.
37. González RF, Herrera PJ, López ST, Cid LG. Respuesta del sorgo al riego en dos épocas de siembra. Función agua rendimiento. Rev Cien Tec Agrop 2011;20(1):40-46.
38. Shuttleworth WJ. Evaporation. In: Maidment DR. editor. Handbook of hydrology. New York, USA: Mc. Graw Hill; 1993.
39. Garay COB. Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes centrales peruanos (No. F06 G37-F). Lima Perú, Instituto Geofísico del Perú. 2009.
40. MaiaI CE, de-MoraisI ERC. Coeficiente de cultura do meloeiro irrigado com água salina estimado por modelo matemático. Ciência Rural 2008;38(5):1273-1278.
41. Dellacanonica C, Bermejillo A, Moradito J. Rendimiento y calidad de un cultivo de avena (*Avena sativa* L.), bajo distintas láminas de riego en el noroeste de Chubut (Argentina). INTA EEA Esquel – Chubut Argentina, 2011 http://www.riegoyfertirriego.com.ar/VI_Jornadas/VI_JARF_TrabajosCompletos/Dellacanonica.pdf. Consultado Feb 15, 2017.