

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Instituto de Ciencias Agrícolas

Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias



**SIMULACIÓN DE SUPERFICIE REGADA CON MODELOS
LOGÍSTICOS DE CRECIMIENTO PARA GENERAR ÍNDICES
DE RIEGO EN TRIGO, ALGODÓN Y ALFALFA EN EL
DISTRITO DE RIEGO 014, RÍO COLORADO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRESENTA

CARLOS HEBERTO CASTRO GONZÁLEZ

DIRECTORA

DRA. MARÍA ISABEL ESCOBOSA GARCÍA

CO - DIRECTOR

DR. MARCO ANTONIO HUEZ LÓPEZ

La presente tesis “**Simulación de superficie regada con modelos logísticos de crecimiento para generar índices de riego en trigo, algodón y alfalfa en el Distrito de Riego 014, Río Colorado**” realizada por el **C. Carlos Heberto Castro González**, y dirigida por la Dra. **María Isabel Escobosa García**, ha sido evaluada y aprobada por el Comité Particular abajo indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Comité Particular

Dra. María Isabel Escobosa García
Directora de tesis

Dr. Marco Antonio Huez López
Co - Director de tesis

Dr. Leonel Avendaño Reyes
Sinodal

Dr. Luis Fernando Escoboza Gracia
Sinodal

Dr. Oscar Alejandro Viramontes Olivas
Sinodal

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California, mi Alma Mater, en especial al Instituto de Ciencias Agrícolas, por brindarme la oportunidad en su momento de realizar mi licenciatura y hoy culminar el doctorado.

Al CONACYT, valiosa Institución Mexicana, por su indispensable apoyo.

A mis apreciables maestros, miembros del comité de tesis; Dra. Ma. Isabel Escobosa García, Dr. Leonel Avendaño Reyes, Dr. Marco A. Huez López, Dr. Fernando Escoboza García y Dr. Oscar A. Viramontes López; por su tiempo y dirección para el cumplimiento de esta meta.

A mis maestros de asignatura Dra. Mónica Avilés Marín y Dr. Carlos Ail Catzim por su atinada labor de docencia.

A las autoridades del Instituto de Ciencias Agrícolas: Director Dr. Roberto Soto Ortiz y al coordinador de Doctorado Dr. Alejandro Manelik García López; por su entusiasta participación en las labores del posgrado.

A la Dra. Cristina Ruiz Alvarado por sus consejos durante este periodo.

A Sandra Luz Rojas Carranza, por su siempre atenta orientación en la coordinación de posgrado

A los técnicos, directivos y funcionarios del Distrito de Riego 014, que día a día hacen posible la entrega del agua a los usuarios y generan la información hidroagrícola.

A mis compañeros del doctorado 2013 - 2015, a todos ellos gracias por su apoyo y agradable convivencia.

Alcanzar esta meta significó un gran esfuerzo que solo pude lograr con al apoyo, comprensión y ayuda de mis hijas Karla, Mónica y Grecia y sobre todo el de mi esposa Feliza por lo que con amor y agradecimiento les dedico este trabajo

CONTENIDO

	PÁGINA
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	X
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
2.1 BIBLIOGRAFIA CITADA.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 3. ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN GENERADOS Y APLICACIÓN DE RESULTADOS.....	18
3.1 ARTÍCULO 1. Función Sigmoide como modelo de predicción para riego en trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>), en el Distrito de Riego 014	18
3.2 ARTÍCULO 2. Evapotranspiración del cultivo de trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>) para siembras de octubre a febrero, en el Distrito de Riego 014.....	33
3.3 ARTÍCULO 3. Modelación del riego en algodón (<i>Gossypium Hirsutum L.</i>) con la función Gompertz de crecimiento, en los Valles de Mexicali y San Luis.	49
3.4 APLICACIÓN DE RESULTADOS. Cálculo del plan de riego para los cultivos de trigo, algodón y alfalfa con la metodología de índices de riego	63
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO	77
ANEXOS	78
ANEXO 1. Memoria de cálculo para la generación de índices de riego en el cultivo de trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>) con la función Gompertz de crecimiento, en los valles de Mexicali y San Luis.....	78
ANEXO 2. Memoria de cálculo para la generación de índices de riego en el cultivo de alfalfa (<i>Medicago sativa L.</i>) con la función Gompertz de crecimiento, en los valles de Mexicali y San Luis.....	

ÍNDICE DE TABLAS

PÁGINA

3.1 ARTÍCULO 1. Función sigmoide como modelo de predicción para riego en trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>), en el Distrito de Riego 014.....	18
Tabla 1. Superficie acumulada regada por decena, ciclo de trigo 2010-2011.	21
Tabla 2. Índices de riego (IR), decenales, por riego y global del cultivo de trigo 2010-2011.....	22
Tabla 3. Suma de cuadrados y significancia de los modelos propuestos.....	25
Tabla 4. Parámetro 1, error de estimación 95% (\hat{E}) y asimetría ($ g_{1i} $).....	26
Tabla 5. Parámetro 2, error de estimación 95% (\hat{E}) y asimetría ($ g_{1i} $).....	27
Tabla 6. Matriz de correlación entre parámetros de los modelos.	27
Tabla 7. Indicadores de bondad de ajuste de los modelos.....	28
Tabla 8. Prueba de las rachas para independencia de los errores $\alpha=0.05$	29
Tabla 9. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk (W) $\alpha= 0.05$	29
Tabla 10. Resumen de indicadores estadísticos.	30
3.2 ARTÍCULO 2. Evapotranspiración del cultivo de trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>) para siembras de octubre a febrero, en el Distrito de Riego 014	33
Tabla 1. Evaporación y evapotranspiración potencial (Eto) mensual en mm.	36
Tabla 2. Superficie regada acumulada de trigo en el primer riego (ha).	37
Tabla 3. Evapotranspiración decenal y total por fecha de establecimiento de trigo (mm).	40
Tabla 4. Análisis de varianza y parámetros obtenidos del modelo de Gompertz.	42
Tabla 5. Verificación de los supuestos del modelo de Gompertz.	42
Tabla 6. Cálculo del índice de riego decenal, para cada fecha de establecimiento.....	44
Tabla 7. Calculo de la evapotranspiración global para trigo.	45
3.3 ARTÍCULO 3. Modelación del riego en algodón (<i>Gossypium Hirsutum L.</i>) con la función Gompertz de crecimiento, en los Valles de Mexicali y San Luis.	49
Tabla 1. Índices de riego acumulados (IRA) utilizados en el análisis de regresión con el Modelo Gompertz.	54
Tabla 2. Resumen del análisis de regresión de los modelos Gompertz.	56
Tabla 3. Análisis del residual de los modelos Gompertz.	57

Tabla 4. Índices de riego acumulados (IRA) estimados con el modelo Gompertz en algodónero.....	58
Tabla 5. Índices de riego decenales (IRD) calculados para algodónero.....	59
3.4 APLICACIÓN DE RESULTADOS. Cálculo del plan de riego para los cultivos de trigo, algodón y alfalfa con la metodología de índices de riego	63
Tabla 1. Índices de riego decenales para trigo*	65
Tabla 2. Índices de riego decenales para algodónero*	66
Tabla 3. Índices de riego decenales para alfalfa*	67
Tabla 4. Calculo del volumen neto, primer riego mes de octubre en trigo.....	68
Tabla 5. Estimado de número de riego, lámina neta y hectáreas riego a partir de índices de riego.	69
Tabla 6. Información resumida del cálculo del plan de riegos.	70
Tabla 7. Volumen neto y bruto decenal.	71
Tabla 8. Gasto requerido diario.	72
Tabla 9. Concentrado índices de riego mensuales en trigo, algodón y alfalfa.....	73
Tabla 10. Concentrado de volumen neto mensual en los cultivos de trigo, algodón y alfalfa.....	73
CAPITULO 4. CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO	77
ANEXO 1. Memoria de cálculo para la generación de índices de riego en el cultivo de trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.) con la función Gompertz de crecimiento, en los valles de Mexicali y San Luis.....	78
Tabla 1. Índices de riego acumulados promedio utilizados para el análisis de regresión.....	80
Tabla 2. Resumen del análisis de regresión de los riegos en trigo.....	80
Tabla 3. Índices de riego acumulados estimados con los modelos.	81
Tabla 4. Índices de riego decenales calculados en trigo.	82
ANEXO 2. Memoria de cálculo para la generación de índices de riego en el cultivo de alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) con la función Gompertz de crecimiento, en los valles de Mexicali y San Luis.....	83
Tabla 1. Parámetros e indicadores estadísticos de los modelos en alfalfa.....	86
Tabla 2. Índices de riego acumulados generados con los modelos en alfalfa.	87
Tabla 3. Índices de riego decenales calculados en alfalfa.....	89

Tabla 4. Índices de riego acumulados de los riegos 1, 2, 3 y 4 de alfalfa para el análisis de regresión.....90

Tabla 5. Índices de riego acumulados de los riegos 5, 6, 7, y 8 de alfalfa para el análisis de regresión.....91

Tabla 6. Índices de riego acumulados de los riegos 9, 10, 11, 12 y 13 de alfalfa para el análisis de regresión.....92

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁGINA

CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	2
Figura 1. Superficie regada diaria y acumulada..	13
3.1 ARTÍCULO 1. Función sigmoide como modelo de predicción para riego en trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>), en el Distrito de Riego 014.....	18
Figura 1. Superficie regada acumulada por riego, trigo 2010-2011.....	22
Figura 2. Índices de riego estimados y observados del riego 1 en los modelos Verhulst y Beta.	30
Figura 3. Índices de riego observados y estimados con el modelo Gompertz.....	31
3.2 ARTÍCULO 2. Evapotranspiración del cultivo de trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>) para siembras de octubre a febrero, en el Distrito de Riego 014	33
Figura 1. Superficie regada acumulada del primer riego en cuatro ciclos de trigo (ha).	38
Figura 2. Coeficientes de cultivo (Kc) para trigo de la primera decena de noviembre.	39
Figura 3. Superficie regada acumulada observada y la estimada con el modelo, para el primer riego de trigo.....	43
3.3 ARTÍCULO 3. Modelación del riego en algodón (<i>Gossypium Hirsutum L.</i>) con la función Gompertz de crecimiento, en los Valles de Mexicali y San Luis.	49
Figura 1. Superficie regada acumulada de nueve riegos en cuatro ciclos agrícolas de algodónero.....	53
Figura 2. Representación de los índices de riego acumulados (IRA) estimados con el modelo Gompertz.	58
Figura 3. Índices de riego decenales (IRD) en los riegos de algodónero.	60
3.4 APLICACIÓN DE RESULTADOS. Cálculo del plan de riego para los cultivos de trigo, algodón y alfalfa con la metodología de índices de riego	63
Figura 1. Índices de riego acumulados en trigo	74
Figura 2. Índices de riego acumulados en algodónero	75
Figura 3. Índices de riego acumulados en alfalfa	75
4. CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO.....	77
ANEXOS	78

ANEXO 1. Memoria de cálculo para la generación de índices de riego en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum L.*) con la función Gompertz de crecimiento, en los valles de Mexicali y San Luis.....78

Figura 1. Índices de riego acumulados en trigo 82

Figura 2. Índices de riego decenales en trigo 83

ANEXO 2. Memoria de cálculo para la generación de índices de riego en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa L.*) con la función Gompertz de crecimiento, en los valles de Mexicali y San Luis..... 84

Figura 1. Índices de riego acumulados en alfalfa 88

Figura 2. Índices de riego decenales en alfalfa 88

RESUMEN

En el Distrito de Riego 014, Río Colorado, para disponer del volumen requerido de agua, la programación se basa en un plan de riegos y para verificar su avance y realizar los cambios y ajustes, se elaboran gráficas que describen la superficie regada acumulada en el tiempo. Este graficado genera curvas sigmoides de comportamiento típico para cada cultivo. Con el fin de simular matemáticamente la representación gráfica del riego, obtener modelos de predicción para programación de riegos en los cultivos de trigo, algodón y alfalfa y generar índices de riego, se realizó el presente estudio, en el que se emplearon tres modelos logísticos de crecimiento para ajustarlos a los datos observados de la superficie regada acumulada durante los ciclos del 2008 al 2013 en los valles de Mexicali, Baja California y San Luis, Sonora. Los modelos fueron el logístico de Verhulst, función Gompertz y función Beta de crecimiento. Para el análisis, los datos de hectáreas regadas acumuladas fueron expresados como fracción de superficie total establecida, definiéndose a dicha fracción como índice de riego. Para lograr los objetivos planteados se realizaron tres estudios en trigo, uno en algodón y otro en alfalfa y con los índices de riego obtenidos se calculó el plan de riego para los cultivos investigados. Los parámetros de las ecuaciones se estimaron con software especializado para regresiones no lineales y en el análisis estadístico se efectuaron prueba de bondad de ajuste, análisis de regresión, análisis de varianza y del residual. En los diferentes estudios el modelo de Gompertz describió adecuadamente en cada riego el comportamiento de la superficie regada acumulada expresada como índices de riego; resultando estadísticamente confiable y cumpliendo con las diferentes restricciones planteadas en el estudio por lo que su utilización para fines de predicción en la elaboración de planes de riego es recomendable.

Palabras clave: riego, índices de riego, función sigmoide, modelos de crecimiento.

ABSTRACT

In the Irrigation District 014, Colorado River, to provide the required volume of water, programming is based on a plan of irrigation and to check their progress and make changes and adjustments are made graphs which describe the irrigated area accumulated in time. These graphs generate sigmoid curves of typical performance for each crop. In order to mathematically simulate the graphical representation of irrigation, obtain predictive models for irrigation scheduling in crops of wheat, cotton and alfalfa and generate irrigation rates, this study was conducted in which three logistic models of growth were used to fit the observed data of the irrigated area accumulated in the valleys of Mexicali, Baja California and San Luis, Sonora, during the agricultural cycles from 2008 to 2013. The models were logistic of Verhulst, Gompertz function and Beta function. For analysis, the data accumulated irrigated in hectares were expressed as fraction of the total surface established, defining that fraction as irrigation rates. To achieve the goals, three studies were conducted in wheat, one in cotton and another one in alfalfa, and with the obtained irrigation rates, the irrigation schedule for the crops investigated was calculated. The parameters of the equations were estimated with specialized software for nonlinear regression and the statistical analysis goodness of fit test, regression analysis, analysis of variance and residual were made. In the different studies Gompertz model adequately described each irrigation behavior of the irrigated area expressed as accumulated irrigation rates, resulting statistically reliable and met the different restrictions raised in the study so that their use for purposes of prediction in the development of irrigation schemes is recommended.

Key words: irrigation, irrigation rates, sigmoid function, growth models.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En el distrito de riego 014, los principales cultivos por superficie establecida y derrama económica que generan son el trigo, algodón y alfalfa. Para el riego se cuenta con agua de gravedad que beneficia a 135,073 has y agua del acuífero para 48,482 has de pozo federal y 22,666 has de pozo particular. El uso del agua de gravedad requiere de una programación estricta, ya que se rige por las normas y restricciones del tratado internacional entre México y Estados Unidos sobre el Río Colorado. Estas restricciones implican gastos específicos mínimos mensuales, reglas para el cambio de volumen de un mes a otro así como una cantidad asignada anual y tiempos reglamentados para realizar la solicitud anual. Ante este panorama y con tendencias a una menor disponibilidad por efectos del cambio climático y sequía en la cuenca del Río Colorado, la solicitud del volumen para los cultivos debe ser cuidadosamente analizado y evitar pedidos no aprovechados por no coincidir el programa con las necesidades de riego. Por ello, el programa de gasto y volumen se debe basar en un plan fundamentado técnicamente en las necesidades hídricas de los cultivos, considerar el manejo usual del riego en la región y cumplir con las normas del tratado que permita un manejo óptimo y racional del agua; ya que la presión y demanda por el recurso es cada vez más intenso por los usuarios urbanos, industriales, ecologistas y agricultores, por lo que la mejora en metodologías de programación del agua de riego en tiempo y volumen es requerida. Una técnica de programación, es a partir de índices de riego que definen el tiempo en que el volumen es requerido para el riego de los cultivos y se obtienen de la observación y registro de la superficie regada en un determinado periodo, sin embargo dichos índices comúnmente se seleccionan en base al criterio y experiencia de los operadores del sistema sin un sustento estadístico. El graficado de la superficie regada acumulada en el tiempo representa una curva sigmoide que puede ser simulada con modelos logísticos de crecimiento, por tanto, el objetivo de este estudio fue simular la superficie regada acumulada de los cultivos de trigo, algodón y alfalfa con modelos logísticos de crecimiento para la generación de índices de riego soportados estadísticamente con fines de predicción y elaboración de planes de riego.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

El Distrito de Riego 014, Rio Colorado

El Distrito de Riego 014, Rio Colorado, hace posible el riego en el valle de Mexicali en Baja California y del valle de San Luis en Sonora y se cuenta con agua de gravedad, cuyo manejo se realiza con la obra hidroagrícola del Distrito y se dispone también con el suministro de agua del acuífero que se explota a través de una batería de pozos profundos, siendo estos 424 pozos federales y 226 pozos particulares (Bernal, 2005).

En esta zona se siembra una amplia gama de cultivos, siendo los principales el trigo, algodón y alfalfa que han ocupado respectivamente 84,186, 28,776 y 26,425 has en promedio del 2010 al 2013 sumado gravedad y pozo federal. Los usuarios con derechos de riego se dividen en tres sistemas siendo estos: usuarios de pozo federal, que usufructúan 48,482 has, los de pozo particular con 22,666 has y los del sistema de gravedad con 135,073 has (DRRC, 2011, 2012, 2013) que casi en su totalidad se riegan con métodos superficiales, utilizando más agua que la de sus requerimientos hídricos demandan, superiores a su dotación volumétrica y en consecuencia compitiendo entre sí por el volumen disponible e incumpliendo los programas de riego para ello dispuestos. La programación del agua para riego se debe basar en un plan de siembra y riegos (CNA, 1998) fundamentado técnicamente en las necesidades hídricas de los cultivos (Catalán et al., 2012), considerar el manejo usual del riego en la región y cumplir con las restricciones propias del Tratado Internacional (CILA, 1944) que rigen el manejo del agua del Rio Colorado. Todo este proceso se debe desarrollar con un uso racional del agua, ya que la presión y demanda por el recurso es cada vez más intensa por los usuarios urbanos, industriales, ecologistas y agricultores (Sánchez, 2004), que ante una disponibilidad fija y con tendencias a la baja por efectos climáticos y sequía en la cuenca del Río Colorado, tendrán que mejorar sus metodologías sobre uso del agua (CILA, 2012).

El distrito de riego esta transferido a los usuarios, se cuenta con 22 módulos de riego que operan la red menor y una Sociedad De Responsabilidad Limitada que maneja la

red mayor, conservando la Comisión Nacional del Agua la operación de la obra de cabeza que comprende desde la recepción del agua en la presa Morelos hasta la represa del kilómetro 27 del canal Reforma (CNA, 2012). La programación del agua de pozo es local y la realiza cada módulo, mientras que la de gravedad se programa en solicitud a nivel internacional. El distrito se maneja con dotación volumétrica, asignando una cantidad por hectárea y una concesión global por módulo de riego (CNA, 1998).

Actualmente la dotación volumétrica es de 11,844 m³/ hectárea (once mil ochocientos cuarenta y cuatro m³/ha), medida en punto de control de modulo, equivalente a 137 litros por segundo en 24 horas (L/seg en 24 h) y la correspondiente a cada usuario depende de la eficiencia en red menor, siendo de 117 L/seg en 24 h, para una eficiencia de 85% (Nota del autor). La dotación volumétrica no considera el tipo de suelo o cultivo, por lo que aun que es un sistema equitativo en cuanto a la cantidad, somete a desventaja a suelos con alta infiltración y cultivos de alta demanda (AUMR, 1997).

El agua con que se irrigan los predios de estos valles provienen de cuatro distintas fuentes que son: a) Agua del Río Colorado regidas por el tratado internacional con USA, b) Aguas del acuífero que se explotan con dos sistemas, el de pozo federal y pozo particular, c) Agua que se entrega por el canal Sánchez Mejorada en la margen izquierda y que proviene de agua de drenaje del valle de Yuma y san Luis Arizona, aguas estas de mala calidad para uso agrícola y d) Aguas del acuífero explotadas en la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado (AUMR, 1997). Estas últimas asignadas al uso urbano de las ciudades fronterizas, pero que por intercambio de agua se utilizan para riego en la margen izquierda en el valle de San Luis y ocasionalmente también en la margen derecha (CNA, 1995).

Evapotranspiración en Cultivos

Las plantas requieren agua para desarrollar sus actividades fisiológicas, como transpiración, fotosíntesis, producción de tejidos, frutos y demás. Cuando la planta no dispone a tiempo, en cantidad y calidad del agua, sus procesos fisiológicos se ven inicialmente disminuidos y si la condición de déficit persiste puede llegar hasta su

muerte por la condición de estrés hídrico a la que fue sometida. Agronómicamente, la cantidad de agua requerida para los cultivos se le denomina Evapotranspiración del Cultivo (Etc) y se define como la cantidad necesaria de agua para que un determinado cultivo pueda realizar sus procesos fisiológicos y produzca económicamente los frutos, semillas o material vegetal para lo que fue cultivada. La evapotranspiración incluye la evaporación de agua desde el suelo en que se cultiva y la transpirada por la planta en sus procesos fisiológicos. El proceso de la evapotranspiración es al inicio del ciclo de una tasa baja y ocurre principalmente por la evaporación desde el suelo ya que este está desnudo, pero a medida que va siendo cubierto por el follaje, el principal consumo es por la transpiración de la planta cuya tasa se va incrementado hasta alcanzar el máximo desarrollo del cultivo para posteriormente mantenerse constante y decrecer hasta nulificarse al alcanzar la etapa de madurez del cultivo (Jensen, 1980). Para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos existen diferentes metodologías que pueden ser directas o indirectas, siendo estas últimas a partir de métodos empíricos que requieren de información climatológica y coeficientes de cultivo, que por la facilidad de su cálculo se puede disponer de esta información para prácticamente todos los cultivos y en cualquier zona agrícola. Estos cálculos se realizan a partir de la Evapotranspiración Potencial (Eto) o Evapotranspiración de Referencia; que se define como la evapotranspiración que registra una superficie de pasto verde, bien regado de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo. Este dato se utiliza como referencia para el cálculo de la evapotranspiración de cada cultivo, utilizando para ellos distintos procedimientos y los coeficientes de cultivo (Snyder, 2007). La Eto generalmente la proporcionan los sistemas de información climatológica regionales como el California Irrigation Management Information System (CIMIS) o el Sistema de Información del Manejo de Agua de Riego de Baja California (SIMARC BC).

Utilizando micro lisímetros se desarrolló un experimento en maíz en Bangladesh, para determinar el coeficiente del cultivo (K_c) para las etapas de; inicio, desarrollo, media temporada y temporada tardía, encontrándose que fueron 0.38, 0.87, 1.36 y 0.75 respectivamente, defiriendo de los de los valores que se obtienen con el procedimiento de FAO, debiéndose lo anterior a que el procedimiento FAO es una recomendación

generalizada para un amplio rango de condiciones y localidades y los del estudio son específicos para el sitio. (Islam y Hossain, 2010).

En base a la ecuación $ET_c = ETo * Kc * Ks$, siendo Evapotranspiración del Cultivo (ET_c), Evapotranspiración Potencial (ETo), Coeficiente de cultivo (Kc) y Factor de extracción de agua del suelo (Ks) respectivamente; se describe un programa para el cálculo de la programación del riego de cítricos en huertas de florida; que está disponible en internet para los productores de cítricos. Este programa ha sido probado experimentalmente durante tres años en seis huertas de cítricos donde los datos de humedad del suelo se tomaban cada media hora, resultando que las estimaciones del modelo de predicción se ajusta a la información directamente recabada en campo. (Morgan *et al.*, 2012).

El procedimiento comúnmente utilizado para estimar el uso consuntivo es el de emplear el coeficiente de cultivo (Kc) referenciado a la evapotranspiración potencial (ETo) para calcular la evapotranspiración del cultivo (ET_c) de la forma $ET_c = ETo * Kc$. (Allen *et al.*, 2005) En el documento FAO-56 se describe otra opción de estimar la evapotranspiración, denominada "Kc Dual", procedimiento útil cuando periodos cortos de tiempo se requieren como lo es para investigación o para programación de riego de un campo en específico. (Allen *et al.*, 2006).

Se describe una metodología de programación de riego desarrollada en Microsoft Excel, denominada ISA, por sus siglas en ingles de "Irrigation Scheduling of Alfalfa" en el que se utiliza la evapotranspiración de referencia (ETo) y el coeficiente de cultivo (Kc) para estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) utilizando los Kc corregidos por precipitación y riegos aplicados. Los Kc se determinan para cada corte de alfalfa y el modelo ISA incluye el cálculo diario de estrés (Ks) basado en el contenido de humedad del suelo. Finalmente el modelo estima el rendimiento del cultivo en base a los ciclos de corte y evapotranspiración. (Snyder y Bali, 2008).

Requerimiento Hídrico de Cultivos.

Para la agricultura bajo riego, los requerimientos de agua de los cultivos, es la suma de todas las cantidades de agua que se utilizan para poder proporcionar a la planta sus necesidades de evapotranspiración, por lo que se deberán de incluir los requerimientos propios de la evapotranspiración, la eficiencia parcelaria que está en función del método de siembra y manejo del riego, y requerimientos de lavado por presencia de sales para desalojarlas fuera de la zona radicular (INIFAP, 2008). Generalmente este último componente no es tomado en cuenta en los cálculos de necesidades, pero no se tiene que perder de vista que las aguas, tanto de gravedad como la de pozo tienen un contenido salino importante y los requerimientos de lavado durante la temporada de riego del cultivo son esenciales para el buen desarrollo y rendimiento de los cultivos.

En el valle de Mexicali, la Etc global del trigo es de 570 mm y considerando un requerimiento de lavado de 120 mm y eficiencia de aplicación de 80% el requerimiento hídrico de este cultivo sería de 862 mm. Para el caso del algodón, este se desarrolla durante los meses más calientes del año con las consecuentes necesidades de evapotranspiración, y se considera como un cultivo de alta demanda entre los cultivos anuales. Su Etc es de 1050 mm que con los supuestos de lavado y eficiencia de riego mencionados su requerimiento total es de 1,462 mm lo cual rebasa la dotación volumétrica asignada por hectárea, por lo que se encuentra en desventaja en cuanto a su asignación de volumen. La alfalfa, se considera en la región como alto consumidor de agua, ya que su permanencia como perenne ocupa del riego durante la mayor parte del año y su producto que es el follaje de la planta es continuamente cortado, induciendo un acelerado rebrote para el siguiente corte, lo cual va acompañado de sus respectivos riegos para lograrlo. La ETc de alfalfa es de 1,890 mm y su requerimiento hídrico total es de 2,512 mm, cantidad que no puede ser suplida con la dotación volumétrica asignada (INIFAP, 2008)

Ventura, *et al.*, (2001) desarrollaron un experimento en hortalizas para probar el funcionamiento de un modelo que estima la evapotranspiración de cultivos en hileras. El

modelo estima la evapotranspiración desde suelo desnudo y desde la vegetación mostrando buen ajuste con la evapotranspiración real de los cultivos medida en tres diferentes cultivos en cinco experimentos, utilizando la evapotranspiración potencial diaria como parámetro de entrada. Para modelar el desarrollo foliar del cultivo se empleó una función sigmoide.

Para que los usuarios de riego del estado de Coahuila puedan estimar las demandas de agua de sus cultivos y determinen cuando aplicar los riegos, Catalán *et al.*, (2012) desarrollaron un programa de computo denominado DRIEGO COAHUILA. El programa realiza la programación del riego de 54 cultivos distintos, a partir del balance de agua en el suelo a nivel diario y sus componentes como evapotranspiración (ETr), riego (R), percolación (D) y lluvia efectiva (P), resolviendo el modelo $\Delta\theta=R+P-ETr-D$, donde $\Delta\theta$ es cambio del contenido de agua del suelo. El programa se realizó en el lenguaje de programación Borland Delphi 7.0.

Estrés Hídrico en Plantas

El estrés hídrico es causado por una deficiente provisión de agua a la planta, pero también aun con excesos como encharcamientos, lluvias o riegos muy frecuentes que afectan sus procesos fisiológicos. Las plantas a lo largo de su desarrollo experimentan algún grado de estrés por déficit hídrico, que en forma natural puede ser causado por la baja precipitación, la baja capacidad de retención de los suelos que no alcanzan a almacenar el agua precipitada, excesiva salinidad que aumenta la presión osmótica, temperaturas extremas, baja presión de vapor atmosférica o una combinación de estos factores. Por otra parte, una tercera parte de la superficie del planeta se considera como árida o semiárida con precipitaciones muy baja que para su cultivo es imprescindible el riego. Por ello el déficit hídrico se considera como el principal limitante del crecimiento de las plantas, actuando como una fuerza selectiva de primer grado para la evolución y distribución de las especies vegetales (Moreno, 2009). En general, las condiciones ambientales que limitan la disponibilidad del agua para las plantas,

como las heladas, la salinidad y la sequía, involucran tres factores principales como: el momento del año en el que se presenta (verano o invierno), su intensidad (ligera o severa), y su duración (días, meses, años). Así mismo el efecto será menos o mayor según sea la condición de la planta y su estado de desarrollo (Covarrubias, 2007).

La sequía se puede definir como un fenómeno temporal con la característica de escasez de agua en la que esta no es suficiente para satisfacer las necesidades de las plantas, animales y al ser humano. La causa principal de la sequía es la falta de lluvias o su disminución en grado inferior al promedio esperado en un periodo dado. Las sequias prolongadas es uno de los fenómenos naturales que mayores daños causan la humanidad, ya que afecta la producción de alimentos llegando incluso a la aparición de hambre, migración y pobreza (Covarrubias, 2007). Sequia meteorológica, se le llama a la que se presenta durante un periodo en donde la precipitación registrada es menor al promedio para ese periodo y lugar. A la sequía que se presenta cuando en un determinado periodo los escurrimientos superficiales y la disponibilidad de agua subterránea son menores al promedio registrado para esa zona y periodo, se le denomina sequia hidrológica; y a la falta de la humedad necesaria para producir un cultivo se le nombra sequia agrícola (SEGOB, 2015). El valle de Mexicali y San Luis, dependen para su riego, de las captaciones en el sistema de presas del Rio Colorado, por lo que la sequía preocupante para la región seria la que suceda en la cuenca del Colorado en el vecino país del norte. En las reuniones binacionales de México y Estados Unidos relativas al manejo del agua en la cuenca del colorado el tema del cambio climático es preocupante, al grado que ya en el acta 319 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA, 2012), se prevén medidas de restricción según sea el comportamiento de los escurrimientos y niveles de almacenamiento en presas. De darse los recortes en asignación por motivo de sequía, traerá el consecuente estrés hídrico en la zona.

Modelos Logísticos de Crecimiento

Los modelos clásicos de crecimiento, tales como el Logístico, Gompertz y Richards siguen siendo ampliamente utilizados para describir procesos biológicos. Estas

ecuaciones definen curvas sigmoides, en las que la tasa de crecimiento es baja al inicio, máxima en el punto de inflexión y después decrece tendiendo a cero en la asíntota superior, contándose con software especializado que permite el ajuste de estos modelos a partir de los datos observados. (Birch, 1999).

Los modelos de crecimiento que consideran al tiempo como variable independiente, describen adecuadamente fenómenos biológicos como el crecimiento de poblaciones, propagación de enfermedades, desarrollo vegetal, mercadotecnia, economía y otras actividades realizadas por el hombre que requieren de un tiempo considerable para realizarse. La calibración de los modelos para ajustarlos a la información recabada y la estimación de sus parámetros es recomendable realizarlo con el uso de software especializado para modelos no lineales (Das, 2013).

La función logística en su forma más simple está dada por la ecuación: $Y=1/(1+e^x)$ donde e es el número de Euler, x puede variar desde menos infinito hasta infinito, mientras que Y se valora entre cero y uno, que al graficarla representa una curva conocida como sigmoide (Kirchhoff, 2012).

De acuerdo con Alonso *et al.*, (2003) el modelo logístico tiene implícitas tres fases en su desarrollo, siendo estas: una fase de crecimiento exponencial, una fase de crecimiento lineal y una tercera fase final de crecimiento total o absoluto. Basado en este modelo desarrollaron un experimento en Chile jalapeño para diagnosticar el cuánto y cuándo regar y aplicar fertilizante. En sus resultados, se concluye que el modelo logístico utilizado describe con mucha precisión el comportamiento del crecimiento vegetal con altos coeficientes de determinación indicando la bondad del modelo para utilizarse con fines de predicción. Mencionando también que en la actualidad se sugiere el uso de modelos simples, a fin de disminuir el tiempo y el trabajo utilizado convencionalmente en la investigación en fertirriego. El uso de estos modelos solo requiere de su validación y dependiendo de su confiabilidad estadística, se sugiere su uso o rechazo para los objetivos propuestos. Así, el modelo logístico adopta en el tiempo un comportamiento similar al crecimiento de los cultivos y debido a la simplicidad de su manejo, permite la obtención de resultados rápidos y confiables, haciendo más ágil la labor de investigación en este campo del conocimiento.

Para estimar el desarrollo de cultivos Yin et al., (2003) compararon siete funciones, siendo estas: Función Beta de Crecimiento, dos funciones expo lineales y cuatro funciones clásicas de crecimiento que describen el comportamiento sigmoide, siendo estas últimas la función Logística de Verhulst, Richards, Gompertz y la de Weibull; utilizando información de seis genotipos de trigo en dos ambientes climáticos en los que se evaluó el llenado del grano, desarrollo de la planta y producción de biomasa a distintas etapas del proceso que se ajustó a los siete modelos. Todos los modelos describieron exitosamente el comportamiento sigmoide del fenómeno y en el caso del llenado del grano, en los siete modelos se obtuvo R^2 mayor de 0.97 al comparar valores estimados y observados. La función beta de crecimiento tuvo buen ajuste para diferenciar los genotipos en los ambientes climáticos en el proceso de desarrollo, y dicha función predice una tasa cero de crecimiento al inicio y final del proceso.

En un estudio para determinar el requerimiento hídrico del pimentón (*Capsicum annum*), en la zona Candelaria-Valle de Cauca (Colombia); la evapotranspiración acumulada (ET) se ajustó a un modelo logístico, resultando $ET = 425.24 / (1 + 20.21 e^{-0.04281 * t})$ donde: e = número de Euler y t = tiempo en días, cuya grafica describió una curva sigmoide y concluyendo que los resultados permitieron sugerir una guía para la programación del riego ya que se obtuvo información adicional como el coeficiente de cultivo, profundidad efectiva de raíces, porcentaje de cobertura y láminas de riego por aplicar (Gómez *et al.*, 2010).

Para modelar el crecimiento de la población de áfidos en la India, se utilizó un modelo determinístico no lineal de la expresión $N(t) = ae^{-bt} (1 + de^{-bt})^{-2} + \epsilon$, en donde **a**, **b** y **d** son los parámetros estimados en el estudio, **t** es el tiempo y **e** es el número de Euler. El análisis de regresión se logró con la opción interactiva Levenberg-Marquardt para modelos no lineales. El examen del residual, pruebas de bondad de ajuste y comprobación de supuestos del modelo fueron realizado para validarlo estadísticamente. Concluyendo que el modelo propuesto fue exitoso para describir la dinámica de población de áfidos (Prajneshu, 1998).

Para modelar la curva de lactancia en ganado vacuno, Fathi et al., (2008) utilizaron seis funciones matemáticas, entre ellas, cuatro funciones de crecimiento (logística, Gompertz, Schumacher y Morgan) así como otras dos ecuaciones (Wood y Dijkstra). La información utilizada fue la producción diaria de 215 ejemplares de la raza Holstein Iraní. Cada ecuación se ajustó a la producción máxima mensual de 330 días de cada ejemplar, para un total de 215 curvas empleando el procedimiento PROC NLIN de SAS para la estimación de los parámetros. Entre las conclusiones se menciona que en base al criterio de bondad de ajuste de los modelos, los empíricos de crecimiento (Gompertz, Schumacher y Morgan) simulan adecuadamente la lactancia mensual estudiada pero sin una diferencia significativa entre las funciones probadas.

Para el caso de regresiones no lineales, cuando el error estándar es grande y por lo tanto intervalos de confianza amplios, se deberá analizar con detenimiento el modelo generado. Una causa puede ser que los parámetros estén correlacionados. En algunos programas especializados para regresiones no lineales se reporta la “matriz de correlación entre parámetros”, para ayudar a diagnosticar este problema. Utilizando como indicador los valores de esta matriz, valores absolutos mayores de 0.9 implican que el modelo se define con ambigüedades y no es estadísticamente confiable con fines de predicción (Motulsky y Christopoulos, 2003).

Un estudio sobre difusión de telefonía móvil en la India describe la aplicación de los modelos no lineales. Para obtener sus parámetros se requieren procesos iterativos y para el diagnóstico de estos modelos se recomienda calcular el coeficiente de determinación (R^2), media del error absoluto (MEA), media del cuadrado del error (MCE) y como indispensable comprobar los supuestos del modelo de independencia y normalidad a partir del análisis del residual sugiriendo el uso de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y la de Shapiro-Wilk, respectivamente (Das, 2013).

Conociendo el comportamiento sigmoide de graficar el carbono orgánico total (COT) contra el carbón activado granulado (CAG) se realizó un estudio para evaluar el modelo logístico en el funcionamiento del CAG en tratamiento de agua de Cincinnati (Ohio),

empleándose un modelo de la forma $f(t) = a/(1+be^{-dt})$, analizándose con regresión no lineal para estimar sus parámetros con el procedimiento modificado Gauss-Newton con el método de Hartley basado en un proceso iterativo de mínimos cuadrados. Entre sus conclusiones se menciona que los parámetros fueron adecuadamente obtenidos con la metodología empleada y que el modelo se puede emplear para simular cambios en los flujos de entrada y salida (Li *et al.*, 2012).

Con información climatológica del Distrito de Riego 014 se calcularon las unidades calor acumuladas (UCa) para emplearse en la estimación del desarrollo de la mosquita blanca (*Bemisia spp.*) con fines de predecir sus poblaciones, generándose funciones logísticas que permiten estimar las UCa en la zona de influencia de cada estación climatológica. Para la estación de Delta en el valle de Mexicali, se obtuvo un modelo logístico que estima $UCa = 4,482.77/(1+46.13 e^{-0.614t})$ donde *e* es el número de Euler, *t* es el tiempo en meses. Las gráficas de la información de UCa contra el tiempo generaron curvas sigmoides. Empleando esta función y con sus respectivos parámetros, se obtuvieron modelos para cada estación climatológica estudiada, comprobándose su validez estadística para emplearse con fines de predicción de UCa (Guzmán y Sosa, 1994).

Para un estudio de germinación y dormancia en hierba de la pradera (*Limnanthes alba*) se empleó la función logística de Richards y Gompertz para modelar el porcentaje de germinación en el tiempo. El procedimiento empleado para el análisis de regresión fue el de NLIN para regresiones no lineales de SAS con la opción iterativa de Marquardt y empleando la información que el programa proporciona como error estándar y matriz de correlación entre parámetros. Los coeficientes de determinación obtenidos fueron altos siendo desde 0.93 hasta 0.99 en los diferentes ensayos. El procedimiento de NLIN para este estudio fue altamente exitoso para describir los perfiles de germinación tanto con la función Gompertz como con la de Richards (Cheng y Gordon, 2007).

Índices de Riego y Superficie Regada

Castro y García, (1998) presentaron un manual de operación para utilizar un sistema de cómputo de un programa en Excel con rutinas tipo macro para el cálculo del plan de riegos en el Distrito de riego 014. El proceso se basa en proporcionar superficie, láminas de riego y eficiencias, para en base a la metodología de índices de riego de cada cultivo, calcular los volúmenes requeridos por decena durante el ciclo. Mencionando como ventaja que la utilización de índices de riego permite realizar modificaciones de manera fácil y rápida para acortar o aumentar intervalos y modificar el número de riegos por aplicar.

El plan de riegos elaborado para los cultivos del distrito de riego 014, rio colorado es calculado en base a la metodología de índices de riego que se representan con el porcentaje de avance de la superficie regada acumulada en el tiempo. Estos índices han sido seleccionados empíricamente sin sustento estadístico en base al a observación de ciclos anteriores (DRRC, 2010b, 2011b, 2012b).

En el distrito de riego 014, es usual efectuar un seguimiento a la forma en que avanza en la aplicación de los riegos, para lo cual se registra diariamente la superficie que se riega de determinado cultivo y riego. Para ello se elaboran graficas que muestren fácilmente dicha información, como se ejemplifica en la Figura 1, donde se muestra la superficie regada diaria que en su grafica se aprecia una curva de tipo normal, mientras que la superficie acumulada describe una curva sigmoide (DRRC, 2011c).

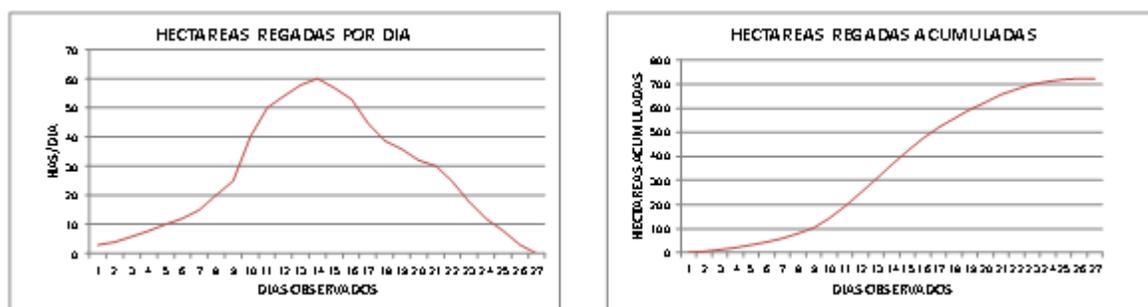


Figura 1. Superficie regada diaria y acumulada

2.1 BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. and Smith M. 2006. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome 1998.
- Allen R. G., Pereira L. S., Smith M., Raes D. and James W. 2005. FAO-56 Dual crop coefficient method for estimating evaporation, from soil and application extensions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. January 2005.
- Allen R.G., Pruitt O. W., Raes D., Smith M. and Pereira L.S. 2005. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, 131 (1): 14-23.
- AUMR, 1997. Asociación de usuarios del módulo de riego no. 1 A. C. Tres años de progreso. II Consejo de administración y vigilancia. San Luis Rio Colorado Sonora, Folleto para usuarios.
- Alonso B. M., Tijerina Ch. L., Sánchez G. P., Martínez G. A., Aceves N. L. y Escalante E. J. A. 2003. Modelo logístico: Herramienta para diagnosticar el cuanto y cuando fertigar. Terra Latinoamericana, 2 (21): 225-231.
- Bernal R. F. A. 2005. Retos internacionales para el manejo del agua del bajo río colorado. En: Cortez, L. A. A., Scott, W., Márquez, Ch. M. Seguridad, agua y desarrollo: El futuro de la frontera México-Estados Unidos. El Colegio de la Frontera Norte, 383-384.
- Birch C. 1999. A new logistic sigmoid growth equation compared with Richards growth equation. Annals of Botany 83: 713-723.
- Cheng C. and Gordon I. L. 2000. The Richards function and quantitative analysis of germination and dormancy in meadow foam (*Limnanthes alba*). Seed Science Research, 10(03): 265-277.
- Castro, G. C. H. y García, A. L. A. 1998. Sistema para el cálculo del plan de riegos. Manual de operación. Versión 1998. San Luis Rio Colorado Sonora. Folleto para usuarios.
- Catalán V. E. A., Villa C. M. M., Inzunza I. M. A., Román L. A. y González B. J. L. 2012. Calculo de demandas de agua y programación del riego de cultivos en Coahuila. Agrofaz, 12 (3): 123-131.
- CNA, 1995. Comisión Nacional Del Agua. Salinidad de suelos y aguas de la zona del distrito de riego 014 en Sonora. Gerencia regional del noroeste. Subgerencia de riego drenaje. Cd. Obregón, Sonora.

- CNA, 1998. Comisión Nacional del Agua. Anexos del título de concesión. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP. Capítulo II. De la operación.
- CNA, 2012. Comisión Nacional del Agua. Manifestación de impacto ambiental. Modernización de la red de riego agrícola del distrito de riego 014, río Colorado, valle de Mexicali. En colaboración con ingeniería Dennis y Cisco consultores ambientales.
- CILA, 1944. Comisión Internacional de Límites y Aguas. Tratado sobre aguas internacionales, celebrado entre México y Los Estados Unidos. Artículo 15. Secretaría de Relaciones Exteriores, México.
- CILA. 2012. Comisión Internacional de Límites y Aguas. Acta 319. III-3. Distribución de volumen en condiciones de presas con elevaciones bajas. Secretaría de Relaciones Exteriores. México.
- Covarrubias R. A. A. 2007. Sobrevivir al estrés: Como responden las plantas a la falta de agua. *Biotecnología*, 14: 253-262.
- Das P. K. 2013. Nonlinear Statistical Model and its Applications to Diffusion of Mobile Telephony in India. *Annals of Pure and Applied Mathematics*, 1 (5): 64-70.
- DRRC. 2011a. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP de CV. Informe del año agrícola 2010-2011. Mexicali B. C.
- _____. 2012a. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP de CV. Informe del año agrícola 2011-2012. Mexicali B. C.
- _____. 2013a. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP de CV. Informe del año agrícola 2012-2013. Mexicali B. C.
- _____. 2010b. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP de CV. 2010. Plan de riegos distrital. Sistema de gravedad 2010-2011. Mexicali B. C.
- _____. 2011b. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP de CV. 2010. Plan de riegos distrital. Sistema de gravedad 2011-2012. Mexicali B. C.
- _____. 2012b. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP de CV. 2010. Plan de riegos distrital. Sistema de gravedad 2012-2013. Mexicali B. C.
- _____. 2011c. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP de CV. 2011. Taller de operación y planeación del riego 2011-2012.
- Fathi N. M. H., France J., Odongo N. E., Lopez S., Bannink A. and Kebreab E. 2008. Modeling the lactation curve of dairy cows using differentials of growth functions. *Journal of Agricultural Science*, 146: 633-641.
- Gómez E. A., Rojas P. H., Vallejo C. F. A. y Estrada S. E. I. 2010. Determinación del requerimiento hídrico del pimentón en el municipio de Candelaria, departamento del Valle del Cauca. *Acta Agronómica*, 59(4): 442-448.

- Guzmán R. S. D. y Sosa C. J. 1994. La información climatológica del DDR 002 Río Colorado: Su uso en relación con la mosquita blanca (*Bemisia spp.*) folleto técnico no. 7. SARH. INIFAP. CIANO. Campo experimental valle de Mexicali.
- INIFAP. 2008. Necesidades Hídricas De Los Principales Cultivos En El Estado De Baja California. Campo experimental valle de Mexicali, folleto técnico no. 13.
- Islam M. S. And Hossan M. A. 2010. Determination of crop co-efficient of hybrid maize by lysimeter study. Bangladesh J. Agril. Res. 35 (1): 77-82.
- Jensen M. E. 1980. Design and operation of farm Irrigation system. The American Society of Agricultural Engineers.
- Kirchhoff W. H, 2012. Logistic function profile fit: A least-squares program for fitting interface profiles to extended logistic function. Journal of Vacuums Science Technology, A 30 (5):1-11.
- Moreno F. L. P. 2009. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. Agronomía Colombiana, 27(2): 179-191.
- Morgan K. T., Hanlon E. A. y Obreza T. A. 2012. A web-based irrigation scheduling model to improve wáter use efficiency and reduce nutrient leaching for Florida citrus. Document SL286, Soil and Water Science Departament, Florida Cooperative Extension Service, University Of Florida.
- Prajneshu. 1998. Nonlinear statical models for aphid population growth. IASRI, New Delhi. Journal of Indian Society of Agriculture Statistics. 51(1):73-80.
- Sánchez M. V. 2004. El revestimiento del canal todo americano. ¿Competencia o cooperación por el agua en la frontera México- Estados Unidos? El colegio de la Frontera Norte. 13-23.
- Snyder R. L. and Bali K. M. 2008. Irrigation Of Alfalfa Using Evapotranspiration. Proceedings, 2008 California Alfalfa And Forage Simposium And Western Seed Conference.
- Ventura F., Faber B. A., Bali K. M., Snyder R.L., Spano D., Pierpalo D. and Schulbach K. F. 2001. Model For Estimating Evaporation And Transpiration From Row Crops. Journal Of Irrigation And Darinage Engineering. 4: 339-345.
- Yin X., Goudrian J., Latinga E. A., Vos J. and Spiertz H. J. 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. Annals of Botany, 91: 361-371.

PÁGINAS ELECTRÓNICAS.

- Li Z., Buchberger S. G., Clark R. M., Yang Y. J. and Swertfeger J. 2012. Evaluation of the logistic model for GAC performance in water treatment. Journal- American Water Works Association. <http://dx.doi.org/10.5942/jawwa.2012.104.0120>. 6 junio 2014.

Motulsky H. J. and Christopoulos A. 2003. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression, a practical guide to curve fitting. GraphPad Software INC., San Diego CA, www.graphpad.com. 5 septiembre 2014.

SEGOB. 2015. Sequias. En <http://www.atlasnacionalde riesgos.gob.mx>.

Sneyder R.L. 2007. Basic Irrigation Scheduling (BIS). Revised April 2007. En http://biomet.ucdavis.edu/irrigation_scheduling/bis/BIS.htm. 3 septiembre 2014.

CAPÍTULO 3. ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN GENERADOS Y APLICACIÓN DE RESULTADOS

Como logros de esta investigación, se generaron tres artículos científicos, una aplicación de resultados y dos memorias de cálculo. Las memorias de cálculo se muestran en los anexos 1 y 2.

3.1 ARTÍCULO 1. Función sigmoide como modelo de predicción para riego en trigo (*Triticum aestivum* L.), en el Distrito de Riego 014

Sigmoid function as prediction model for irrigation in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Irrigation District 014

Carlos Heberto Castro González^{1*}, Luis Fernando Escoboza García¹, Leonel Avendaño Reyes¹, María Isabel Escobosa García¹, Marco Antonio Huez López², Oscar Alejandro Viramontes Olivas³

¹Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California.

²Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora.

³Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua.

^{1*}Autor para correspondencia: castrogz@hotmail.com

**Enviado a: Investigación y Ciencia Universidad Autónoma de Aguascalientes, 06
enero 2016.**

RESUMEN

En el Distrito de Riego 014, Río Colorado, para disponer del volumen requerido de agua, la programación se basa en un plan de riegos y para verificar su avance y realizar los cambios y ajustes, se elaboran gráficas que describen la superficie regada acumulada en el tiempo. Este graficado genera curvas sigmoides de comportamiento típico para cada cultivo. Con el fin de fundamentar matemáticamente la representación gráfica del riego y obtener modelos de predicción para programación de riegos en trigo

(*Triticum aestivum L.*); se realizó el presente estudio, en el que se emplearon tres modelos de la función sigmoide para ajustarlos a los datos observados de la superficie regada acumulada en los valles de Mexicali Baja California y San Luis Sonora, durante el ciclo 2010-2011. Los modelos fueron el logístico de Verhulst, función Gompertz y función Beta de crecimiento. Los parámetros de las ecuaciones se estimaron con software especializado para regresiones no lineales y en el análisis estadístico se efectuaron: pruebas de bondad de ajuste, análisis de varianza y del residual. Tanto el modelo logístico de Verhulst como la función Gompertz describieron adecuadamente el comportamiento de la superficie regada en el tiempo, por lo que su utilización es estadísticamente confiable para fines de predicción en la elaboración de planes de riego.

Palabras clave: función sigmoide, trigo, riego, agua, programación.

INTRODUCCIÓN

Durante los ciclos agrícolas del 2010 al 2013, en los valles de Mexicali, Baja California y de San Luis Río Colorado, Sonora, se cultivaron en promedio por ciclo: 118,301 ha con agua de gravedad y 48,327 ha con el sistema de pozo federal. Para esos ciclos la cédula media de cultivos establecida fue de 84,186 ha de trigo, 28,776 de algodón, 26,425 de alfalfa y 27,240 en otros como hortalizas, frutales y sorgos. Para el riego se cuenta con agua de gravedad, cuyo manejo se realiza con la obra hidráulica e infraestructura del Distrito de Riego 014, Río Colorado y con el suministro de agua del acuífero (Bernal, 2005). Al trigo se le aplican en total de 5.36 riegos con una lámina neta de 94 cm, estableciéndose en los meses de octubre a enero y con una temporada de riego desde mediados de octubre a la tercera decena de abril, y su cosecha a partir del 10 de mayo (DRRC, 2011). El establecimiento de los cultivos se basa en un plan de siembra y riegos (CNA, 1998) que debe fundamentarse técnicamente en las necesidades hídricas de los cultivos (DRRC, 2010) considerar el manejo usual del riego en la región y cumplir con las restricciones propias del tratado (CILA, 1944) que rigen el manejo del agua del Río Colorado. Todo este proceso se debe desarrollar en un uso racional del agua, ya que la presión y demanda por el recurso es cada vez más intensa por los usuarios urbanos, industriales, ecologistas y

agricultores (Sánchez, 2004), que ante una disponibilidad fija y con tendencias a la baja por efectos climáticos y sequía en la cuenca del Río Colorado, tendrán que mejorar sus metodologías sobre uso del agua (CILA, 2012).

Una vez establecidos los cultivos, los organismos encargados de la distribución y entrega de agua a los usuarios elaboran gráficas en las que se representa la superficie regada acumulada en el tiempo, para observar el avance del riego, compararlo con lo programado y así realizar los cambios y ajustes en los pedidos de agua. Este comportamiento gráfico se representa como una curva sigmoide (Kirchhoff, 2012), y puede ser simulada con modelos empíricos de la función sigmoide o logísticos (Birch, 1999) que al obtenerse sus ecuaciones y parámetros, puede ser utilizado con fines de predicción (Alonso *et al.*, 2003) en la elaboración de los planes de riego. Expresando la superficie regada acumulada como fracción de la superficie total establecida de un cultivo, se obtiene los Índices de Riego, que permiten representar cualquier dimensión de superficie con fines de programación

Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar tres modelos para ajustarlos a los datos observados de la superficie regada de trigo del ciclo 2010-2011 en el Distrito de Riego 014, siendo estos modelos: Función Gompertz, Modelo Logístico de Verhulst y Función Beta de Crecimiento (Yin *et al.*, 2003), para seleccionar el modelo más apropiado en base análisis estadísticos de regresiones no lineales y su posterior utilización con fines de predicción en planes de riego del cultivo de trigo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recurrió a la información hidroagrícola del Distrito de Riego Rio Colorado SRL de IP de CV, referente al ciclo agrícola 2010 -2011, del cultivo de trigo establecido en el sistema de agua de gravedad, la cual fue una superficie de 63,161 ha físicas y 325,725 hectáreas riego, cuya información se concentra en la Tabla 1. Las hectáreas riego se refieren a la suma de las hectáreas físicas que se riegan en cada riego y el índice global de riego es la suma de los índices por riego y se obtiene también de dividir las hectáreas riego entre las hectáreas físicas.

Tabla 1. Superficie acumulada regada por decena, ciclo de trigo 2010-2011.

DECENA DEL MES	RIEGO 1	RIEGO 2	RIEGO 3	RIEGO 4	RIEGO 5	RIEGO 6	RIEGO 7	RIEGO 8	RIEGO 9
I OCT.	34.00	-	-	-	-	-	-	-	-
II OCT.	236.73	-	-	-	-	-	-	-	-
III OCT.	1,578.73	13.00	-	-	-	-	-	-	-
I NOV.	5,396.51	26.00	-	-	-	-	-	-	-
II NOV.	14,803.35	79.00	-	-	-	-	-	-	-
III NOV.	28,197.57	152.00	-	-	-	-	-	-	-
I DIC.	39,324.63	686.66	6.00	-	-	-	-	-	-
II DIC.	47,282.29	2,316.81	6.00	-	-	-	-	-	-
III DIC.	51,507.89	4,140.11	16.00	24.00	-	-	-	-	-
I ENE.	55,858.12	10,475.64	66.00	24.00	-	-	-	-	-
II ENE.	59,268.30	24,790.91	651.50	24.00	-	-	-	-	-
III ENE.	61,354.27	40,694.02	4,074.03	66.00	-	-	-	-	-
I FEB.	62,248.08	48,996.56	14,522.75	443.35	-	-	-	-	-
II FEB.	62,693.87	55,067.50	29,445.81	1,998.05	30.00	-	-	-	-
III FEB.	62,883.87	58,005.95	39,385.30	6,276.60	144.85	-	-	-	-
I MAR.	62,965.87	60,059.64	48,139.03	17,853.68	995.60	14.00	-	-	-
II MAR.	63,059.07	61,040.00	55,548.17	33,108.22	5,563.66	284.65	12.00	64.00	-
III MAR.	63,136.57	61,649.96	59,528.00	45,763.40	17,293.81	1,850.45	137.00	64.00	-
I ABR.	63,152.07	61,862.06	60,943.40	53,867.38	31,792.52	6,916.78	705.86	170.00	-
II ABR.	63,152.07	61,938.06	61,646.65	58,522.59	44,066.73	15,740.23	2,141.21	353.00	5.00
III ABR.	63,160.57	61,975.56	61,933.05	60,252.65	50,193.77	19,676.81	2,937.60	413.00	25.00
I MAY.		61,990.56	62,008.05	60,587.65	52,029.80	21,555.93	3,349.60	472.00	27.00
II MAY.		62,000.06		60,626.65	52,252.80	21,689.43	3,407.40	488.00	
III MAY.		62,008.06		60,629.65		21,689.43	3,415.40	498.00	
I JUN.		62,010.06		60,636.65		21,700.43	3,415.40		
II JUN.						21,708.43	3,421.40		
III JUN.						21,710.43			
Ha Por riego	63,161	62,010	62,008	60,637	52,253	21,710	3,421	498	27

Para el análisis del estudio, los datos de hectáreas regadas acumuladas fueron expresados como fracción de superficie total establecida, definiéndose a dicha fracción como Índice de Riego (IR), que para este estudio es el valor entre 0 y 1 que representa una cantidad de hectáreas regadas en un determinado tiempo, siendo $IR = 1$, cuando se riega la superficie total establecida. La unidad de tiempo utilizada fue la decena (diez días) y los índices decenales y por riego se muestra en la tabla 2. Para efectos de cálculo de parámetros y análisis estadístico, los riegos se inician con la decena 1, ya que los riegos fueron analizados de forma independiente.

Tabla 2. Índices de riego (IR), decenales, por riego y global del cultivo de trigo 2010-2011.

DECENAS	RIEGO 1	RIEGO 2	RIEGO 3	RIEGO 4	RIEGO 5	RIEGO 6	RIEGO7	RIEGO 8	RIEGO 9	IR GLOBAL	HARIEGO
1	0.00054	0.00021	0.00009	0.000380	0.00047	0.00022	0.00019	0.00101	0.00008		
2	0.00375	0.00041	0.00009	0.000380	0.00229	0.00451	0.00217	0.00101	0.00040		
3	0.02500	0.00125	0.00025	0.000380	0.01576	0.02930	0.01118	0.00269	0.00043		
4	0.08544	0.00241	0.00104	0.001045	0.08809	0.10951	0.03390	0.00559			
5	0.23438	0.01087	0.01031	0.007019	0.27381	0.24921	0.04651	0.00654			
6	0.44644	0.03668	0.06450	0.031634	0.50336	0.31154	0.05303	0.00747			
7	0.62261	0.06555	0.22993	0.099375	0.69769	0.34129	0.05395	0.00773			
8	0.74860	0.16586	0.46621	0.282671	0.79470	0.34340	0.05407	0.00788			
9	0.81551	0.39251	0.62357	0.524191	0.82377	0.34340	0.05407				
10	0.88438	0.64429	0.76217	0.724556	0.82730	0.34358	0.05417				
11	0.93838	0.77575	0.87948	0.852864		0.34370					
12	0.97140	0.87187	0.94249	0.926568		0.34373					
13	0.98555	0.91839	0.96490	0.953960							
14	0.99261	0.95090	0.97603	0.959264							
15	0.99562	0.96643	0.98057	0.959881							
16	0.99692	0.97608	0.98175	0.959929							
17	0.99839	0.97944		0.960040							
18	0.99962	0.98064									
19	0.99987	0.98124									
20	0.99987	0.98148									
21	1.00000	0.98163									
22		0.98175									
23		0.98178									
IR, POR RIEGO	1.00000	0.98178	0.98175	0.96004	0.82730	0.34373	0.05417	0.00788	0.00043	5.15709	
Has. REGADAS	63,161	62,010	62,008	60,637	52,253	21,710	3,421	498	27		325,725

Al graficar la información de la superficie regada acumulada de la Tabla 1, se obtienen curvas de tipo sigmoide para cada riego, como se aprecia en la Figura 1.

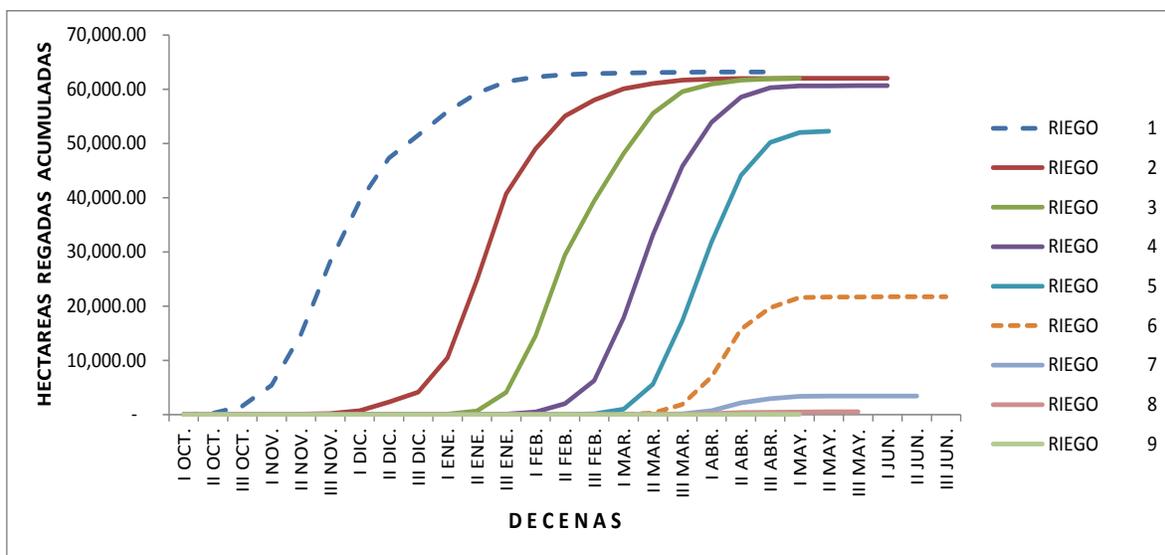


Figura 1. Superficie regada acumulada por riego, trigo 2010-2011.

Este comportamiento de las curvas de riego es la parte central del estudio, que consistió en obtener el modelo de predicción de la superficie regada acumulada en cada riego, analizándose los tres los siguientes modelos:

1. Modelo logístico de Verhulst: $y = \frac{y_{max}}{1+e^{-k(t-t_i)}}$
2. Función Gompertz: $y = y_{max} e^{-e^{-k(t-t_i)}}$
3. Función beta de crecimiento:

$$y = y_{max} \left(1 + \frac{t_m - t}{t_m - t_i}\right) \left(\frac{t}{t_m}\right)^{\frac{t_m}{t_m - t_i}} \quad \text{para } 0 \leq t_i < t_m$$

Dónde:

<i>y</i>	Valor en la ordenada (variable dependiente: índice de riego).
<i>y_{max}</i>	Valor máximo de <i>y</i> .
<i>k</i>	Constante de curvatura del modelo.
<i>t</i>	Tiempo.
<i>t_i</i>	Tiempo de inflexión y máxima tasa de crecimiento de <i>y</i> .
<i>t_m</i>	Tiempo máximo.
<i>e</i>	Número de Euler.

Para la obtención de los parámetros de los modelos se recurrió al auxilio de software especializado para regresiones no lineales, usando el procedimiento NLIN de SAS 9.2 (SAS, 2008) con las opciones Marquardt-Hougaard y análisis univariado, alimentándolo con los datos observados en cada riego y la solución matemática de las ecuaciones; que además de los parámetros genera la estimación de límites de confianza al 95%, error estándar, grado de asimetría (skewness), matriz de correlación, análisis de varianza para el modelo y pruebas de normalidad. Con los datos observados y estimados de cada uno de los modelos, se determinaron los indicadores de bondad de ajuste como media del error absoluto (MEA), media del cuadrado del error (MCE) y el coeficiente de determinación para modelos no lineales (R^2). Para la verificación de normalidad e independencia de los errores se realizó un análisis del residual con las pruebas de Shapiro-Wilk y prueba de las rachas respectivamente.

El criterio para la selección del modelo más apropiado se basó en el cumplimiento de las siguientes restricciones:

1. Que el modelo fuese estadísticamente significativo en el análisis de varianza.
2. Que los parámetros obtenidos presentaran aceptables indicadores de límites de confianza y asimetría.
3. Que el análisis de estimados y observados cumpliera las pruebas de bondad de ajuste de MEA, MCE y R^2 .
4. Que los parámetros de los modelos no fuesen correlacionados.
5. Que los modelos cumplieran con los supuestos de normalidad e independencia en el análisis del residual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los nueve riegos aplicados, se descartó del estudio el riego 9, ya que el porcentaje de aplicación fue muy bajo (0.043%) y con solo tres datos observados que imposibilitó un análisis estadístico confiable de ese riego.

En la revisión de la información utilizada (Tabla 1), se observa que en la parte final de los riegos, éste se registra tardíamente, ya que aun cuando la temporada de riego termina, se siguen ingresando datos. Al margen de estas dos consideraciones, se realizó el análisis de la información, mostrándose en la tabla 3 el concentrado de los resultados del análisis de varianza de los tres modelos propuestos.

Tabla 3. Suma de cuadrados y significancia de los modelos propuestos.

MODELO	S.C. MODELO	S.C. TOTAL	RIEGO 1	S.C. MODELO	S.C. TOTAL	RIEGO 5
	GL=2	GL=21	Pr>F	GL=2	GL=10	Pr>F
Gompertz	13.41720	13.41880	<.0001	2.81450	2.81770	<.0001
Verhulst	13.40520	13.41880	<.0001	2.81700	2.81770	<.0001
Beta	13.21950	13.41880	<.0001	2.79390	2.81770	<.0001
MODELO	GL=2	GL=23	RIEGO 2	GL=2	GL=12	RIEGO 6
Gompertz	12.33410	12.33720	<.0001	0.87820	0.87870	<.0001
Verhulst	12.33230	12.33720	<.0001	0.87860	0.87870	<.0001
Beta	11.98630	12.33720	<.0001	0.85730	0.87870	<.0001
MODELO	GL=2	GL=16	RIEGO 3	GL=2	GL=10	RIEGO 7
Gompertz	6.71310	6.71500	<.0001	0.01790	0.01790	<.0001
Verhulst	6.70620	6.71500	<.0001	0.01790	0.01790	<.0001
Beta	6.61540	6.71500	<.0001	0.01760	0.01790	<.0001
MODELO	GL=2	GL=17	RIEGO 4	GL=2	GL=8	RIEGO 8
Gompertz	7.06820	7.07120	<.0001	0.00026	0.00026	<.0001
Verhulst	7.07000	7.07120	<.0001	0.00026	0.00026	<.0001
Beta	6.91080	7.07120	<.0001	0.00026	0.00026	<.0001

GL: Grados de Libertad; SC: Suma de Cuadrados

En los tres modelos se aprecia que en el análisis de varianza de cada uno de ellos y en todos los riegos, los modelos son altamente significativos ya que en la fuente de variación atribuida al modelo se obtiene un valor de $P < .0001$.

Analizando el parámetro 1, en la Tabla 4 se confirma con certeza estadística del 95 % que los parámetros obtenidos en los tres modelos y en los ocho riegos son confiables. Revisando en la misma tabla la medida de asimetría, se puede ver que para el modelo Beta en el parámetro 1, el valor $|g_{1i}| > 1.0$ que lo sitúa como un parámetro con comportamiento no lineal considerable, que lo hace de baja certidumbre para fines de predicción. En cuanto al modelo de Gompertz en este parámetro, presenta tres riegos con valor $|g_{1i}| > 0.25$ y cinco riegos por debajo de ese valor, mientras que el de Verhulst solo muestra un riego con valor $|g_{1i}| > 0.25$ y siete riegos con valor menor a 0.25; que indica para este parámetro al modelo de Verhulst como el mejor calificado; indicando que el modelo tiene propiedades razonablemente cercanas al de una

regresión lineal, que indica mínima varianza, distribución normal y con intervalos de confianza seguros para la construcción de inferencias.

Tabla 4. Parámetro 1, error de estimación 95% (\hat{E}) y asimetría ($|g_{1i}|$).

MODELO	PARAMETRO 1	\hat{E} 95% (\pm)	$ g_{1i} $	PARAMETRO 1	\hat{E} 95% (\pm)	$ g_{1i} $
RIEGO 1				RIEGO 5		
Gompertz	0.5190	0.0179	0.0741	0.8810	0.7663	0.2562
Verhulst	0.7429	0.0776	0.2207	1.2621	1.1833	0.1211
Beta	16.5606	1.5700	1.1544	9.0918	8.5301	1.2835
RIEGO 2				RIEGO 6		
Gompertz	0.6640	0.0345	0.1127	1.1623	0.1503	0.3053
Verhulst	0.9432	0.0640	0.1468	1.6475	0.0860	0.0998
Beta	18.9991	1.5623	1.2432	9.7916	1.3657	1.7502
RIEGO 3				RIEGO 7		
Gompertz	0.6111	0.0302	0.1030	1.2003	0.1120	0.1474
Verhulst	0.8648	0.0943	0.2286	1.6877	0.1679	0.1941
Beta	14.1439	0.8399	1.1916	8.2644	1.2086	1.8268
RIEGO 4				RIEGO 8		
Gompertz	0.7407	0.0499	0.1419	0.8588	0.2806	0.5817
Verhulst	1.0544	0.0464	0.0930	1.1655	0.2885	0.4269
Beta	14.8940	0.9696	1.2800	7.0997	0.9323	1.6977

Parametro 1: Gompertz y Verhulst= k, Beta = t m.

Asimetría (Skewness de la opción Hougaard de nlin procedure de SAS 9.2)

En la tabla 5, se analiza el parámetro 2, señalándose que su estimado, cumple en general en los tres modelos y en todos los riegos con los límites de confianza obtenidos al 95%, y la medida de asimetría es $|g_{1i}| < 0.1$ en todos los casos de riego y modelos; esto indica que este parámetro muestra un comportamiento estadístico muy cercano a un modelo lineal.

De este análisis de límites de confianza, y asimetría de los dos parámetros, se deduce que los modelos Gompertz y Verhulst son confiables para obtener predicciones y más recomendables que el modelo Beta.

Tabla 5. Parámetro 2, error de estimación 95% (\hat{E}) y asimetría ($|g_{1i}|$).

MODELO	PARAMETRO 2	\hat{E} 95% (\pm)	$ g_{1i} $	PARAMETRO 2	\hat{E} 95% (\pm)	$ g_{1i} $
RIEGO 1				RIEGO 5		
Gompertz	5.6531	0.0563	(0.0079)	5.0877	0.1251	(0.0242)
Verhulst	6.5379	0.1590	(0.0002)	5.6224	0.0562	(0.0001)
Beta	4.7899	2.2036	(0.0588)	6.2604	0.4841	(0.1684)
RIEGO 2				RIEGO 6		
Gompertz	8.8062	0.0663	(0.0119)	4.0556	0.0924	(0.0368)
Verhulst	9.4883	0.0817	0.0000	4.4475	0.0364	0.0003
Beta	9.7838	1.8824	(0.0365)	4.0923	1.8080	(0.6689)
RIEGO 3				RIEGO 7		
Gompertz	7.6156	0.0685	(0.0110)	3.3715	0.0656	(0.0243)
Verhulst	8.3984	0.1432	(0.0000)	3.7548	0.0669	(0.0024)
Beta	9.3104	0.7895	(0.1900)	3.4934	1.5496	(0.6871)
RIEGO 4				RIEGO 8		
Gompertz	8.2494	0.0771	(0.0148)	2.9294	0.8687	(0.0608)
Verhulst	8.8789	0.0475	(0.0000)	3.4402	0.2376	(0.0021)
Beta	9.8627	0.9962	(0.2134)	3.3751	0.8421	(0.6518)

Parametro 2: Gompertz, Verhulst y Beta = t_i

Asimetría (Skewness de la opción Hougaard de nlin procedure de SAS 9.2)

En cuanto a la correlación entre parámetros, en la tabla 6 se muestra que en el modelo de Gompertz existe una mayor correlación entre parámetros que entre los parámetros de los modelos Verhulst y Beta, pero los valores presentados en todos los casos permiten inferir que la contribución al resultado del modelo de cada uno de los parámetros es independiente.

Tabla 6. Matriz de correlación entre parámetros de los modelos.

NO. RIEGO	PARAMETRO 1	GOMPERTZ	VERHULST	BETA
		PARAMETRO 2	PARAMETRO 2	PARAMETRO 2
RIEGO 1	PARAMETRO 1	0.3191	0.0015	(0.2908)
RIEGO 2	PARAMETRO 1	0.3192	0.0000	(0.0177)
RIEGO 3	PARAMETRO 1	0.3191	0.0000	0.0947
RIEGO 4	PARAMETRO 1	0.3187	0.0000	0.1496
RIEGO 5	PARAMETRO 1	0.3197	0.0004	0.1106
RIEGO 6	PARAMETRO 1	0.3501	(0.0031)	(0.1163)
RIEGO 7	PARAMETRO 1	0.2885	0.0123	(0.1430)
RIEGO 8	PARAMETRO 1	0.3165	0.0087	(0.3498)

Al revisar los indicadores de bondad de ajuste obtenidos del análisis de datos observados y estimados con los modelos, en la Tabla 7, se muestra un R^2 mayor a 0.98

en los modelos Gompertz y de Verhulst y en el caso del modelo Beta, este indicador es mayor a 0.91. Se observa también que consistentemente, el modelo Beta presenta el menor valor de ese indicador.

Tabla 7. Indicadores de bondad de ajuste de los modelos.

MODELO	MEA*	MCE**	R ²	MODELO	MEA*	MCE**	R ²
Riego 1				Riego 5			
Gompertz	0.0063	0.0001	0.9995	Gompertz:	0.0149	0.0040	0.9973
Verhulst	0.0176	0.0007	0.9956	Verhulst	0.0074	0.0001	0.9994
Beta	0.0795	0.0105	0.9350	Beta	0.0407	0.0030	0.9801
Riego 2				Riego 6			
Gompertz	0.0062	0.0015	0.9993	Gompertz:	0.0041	0.0000	0.9979
Verhulst	0.0092	0.0002	0.9988	Verhulst	0.0016	0.0000	0.9996
Beta	0.1005	0.0167	0.9172	Beta	0.0358	0.0021	0.9118
Riego 3				Riego 7			
Gompertz	0.0076	0.0001	0.9993	Gompertz:	0.0005	0.0000	0.9989
Verhulst	0.0168	0.0006	0.9969	Verhulst	0.0005	0.0000	0.9988
Beta	0.0646	0.0071	0.9648	Beta	0.0050	0.0000	0.9273
Riego 4				Riego 8			
Gompertz	0.0098	0.0020	0.9990	Gompertz:	0.0003	0.0000	0.9798
Verhulst	0.0062	0.0001	0.9996	Verhulst	0.0002	0.0000	0.9890
Beta	0.0786	0.0107	0.9478	Beta	0.0004	0.0000	0.9717

* MEA (media del error absoluto), **MCE (media del cuadrado del error)

Para el caso de la MEA y MCE en los riegos 1, 2 y 3, se aprecia que el modelo Gompertz presenta los menores valores, lo cual es deseable, mientras que el modelo Verhulst en los riegos 4, 5, 6 y 8, esos valores son también los más bajos. En el riego 7 se aprecia similitud en los modelos Gompertz Y Verhulst. Para todos los indicadores el modelo Beta es el menos recomendable al comparase con los otros dos modelos. De acuerdo a este análisis, sería indistinto recomendar el modelo Gompertz o el de Verhulst para utilizarse como modelo de predicción de índices de riego.

Para validar los supuestos de normalidad e independencia del modelo se realizó un examen del residual; practicándose la prueba de las rachas (run test) para comprobar la independencia de los errores, mostrándose en la Tabla 8, donde se describe que el modelo Gompertz presenta independencia entre errores en cuatro riegos, el de Verhulst en tres riegos y el modelo Beta en un riego.

Tabla 8. Prueba de las rachas para independencia de los errores $\alpha=0.05$

	GOMPERTZ			VERHULST			BETA		
	r	r crítico	se acepta	r	r crítico	se acepta	r	r crítico	se acepta
Riego 1	5	4	H0	3	3	H1	4	6	H1
Riego 2	5	5	H1	5	3	H0	4	7	H1
Riego 3	5	3	H0	3	2	H0	4	4	H1
Riego 4	3	2	H0	5	5	H1	2	5	H1
Riego 5	3	-	-	4	2	H0	4	2	H0
Riego 6	3	-	-	0	-	-	2	3	H1
Riego 7	5	2	H0	0	-	-	2	2	H1
Riego 8	5	-	-	4	-	-	5	-	H1

En cuanto a la verificación de normalidad con la prueba de Shapiro–Wilk presentada en la Tabla 9, indica que el modelo de Gompertz mostro características de distribución normal del residual en 5 riegos, el de Verhulst en cuatro riegos y el modelo Beta en 7 riegos.

Tabla 9. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk (W) $\alpha= 0.05$

Riego 1 (n=21, Wt=0.908)		Riego 5 (n=10, Wt=0.842)	
Gompertz	0.893	Gompertz	0.944
Verhulst	0.887	Verhulst	0.939
Beta	0.902	Beta	0.958
Riego 2 (n=23, Wt=0.914)		Riego 6 (n=12, Wt=0.859)	
Gompertz	0.757	Gompertz	0.858
Verhulst	0.852	Verhulst	0.852
Beta	0.956	Beta	0.950
Riego 3 (n=16, Wt=0.887)		Riego 7 (n=10, Wt=0.842)	
Gompertz	0.905	Gompertz	0.851
Verhulst	0.840	Verhulst	0.885
Beta	0.950	Beta	0.912
Riego 4 (n=17, Wt=0.892)		Riego 8 (n=8, Wt=0.818)	
Gompertz	0.941	Gompertz	0.881
Verhulst	0.960	Verhulst	0.854
Beta	0.958	Beta	0.963

En base a los distintos análisis expresados y resumidos en la Tabla 10, tanto el modelo Gompertz como el de Verhulst muestran aceptables condiciones estadísticas para ser utilizados como modelos de predicción de índices de riego, cuyos parámetros se muestran en la tablas 4 y 5, siendo sus ecuaciones:

$$\text{Modelo de Verhulst: } y = \frac{y_{\max}}{1+e^{-k(t-t_i)}}$$

$$\text{Modelo Gompertz } y = y_{\max} e^{-e^{-k(t-t_i)}}$$

Tabla 10. Resumen de indicadores estadísticos.

INDICADORES	GOMPERTZ	VERHULST	BETA
ANDEVA DEL MODELO	P<.0001	P<.0001	P<.0001
PARÁMETRO 1			
L.C. 95%	Confiable	Confiable	Confiable
ASIMETRÍA	$ g_{1i} < 0.25$ en 5 riegos	$ g_{1i} < 0.25$ en 7 riegos	$ g_{1i} > 1.0$ en 8 riegos
PARÁMETRO 2			
L.C. 95%	Confiable	Confiable	Confiable
ASIMETRÍA	$ g_{1i} < 0.1$	$ g_{1i} < 0.1$	$ g_{1i} < 0.1$
CORRELACIÓN			
ENTRE PARAMETROS	<0.35	<0.012	<0.15
BONDAD DE AJUSTE			
MEA	<.01153	<.01536	<.07194
MCE	<0.00015	<.00057	<.0048
R ²	0.98 a 0.99	0.98 a 0.99	0.91 a .98
EXAMEN DEL RESIDUAL			
RACHAS	Independencia en 4 riegos	Independencia en 3 riegos	Independencia en 1 riego
SHAPIRO - WILK	Normalidad en 5 riegos	Normalidad en 4 riegos	Normalidad en 7 riegos

En la Figura 2, se presenta el comportamiento típico que presentaron los modelos Verhulst y el Beta; donde se aprecia que el modelo Beta, aunque algunos indicadores de ajuste fueron buenos, su expresión gráfica no fue muy cercana entre observados y estimados. En la Figura 3 se muestra el comportamiento gráfico del modelo Gompertz para los ocho riegos. En estas graficas se aprecia una sobre posición muy estrecha entre las curvas de datos observados y los estimados.

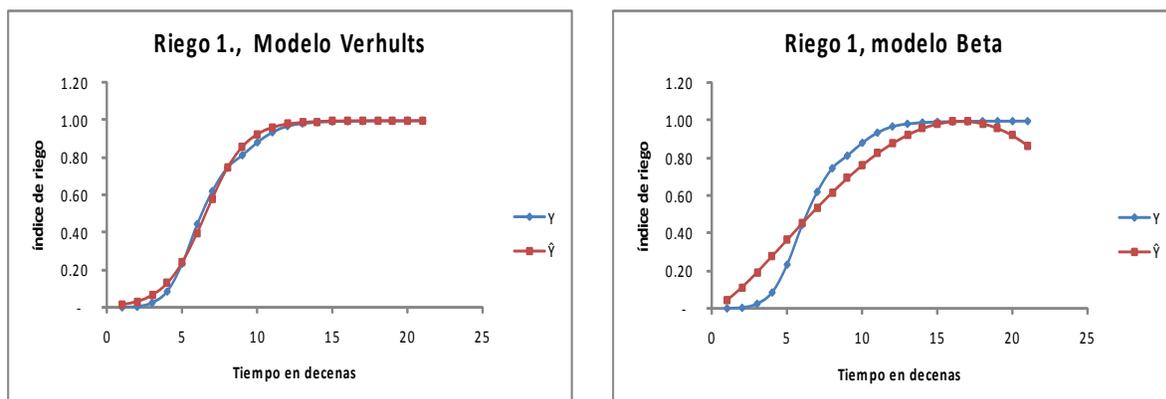


Figura 2. Índices de riesgo estimados y observados del riego 1 en los modelos Verhulst y Beta.

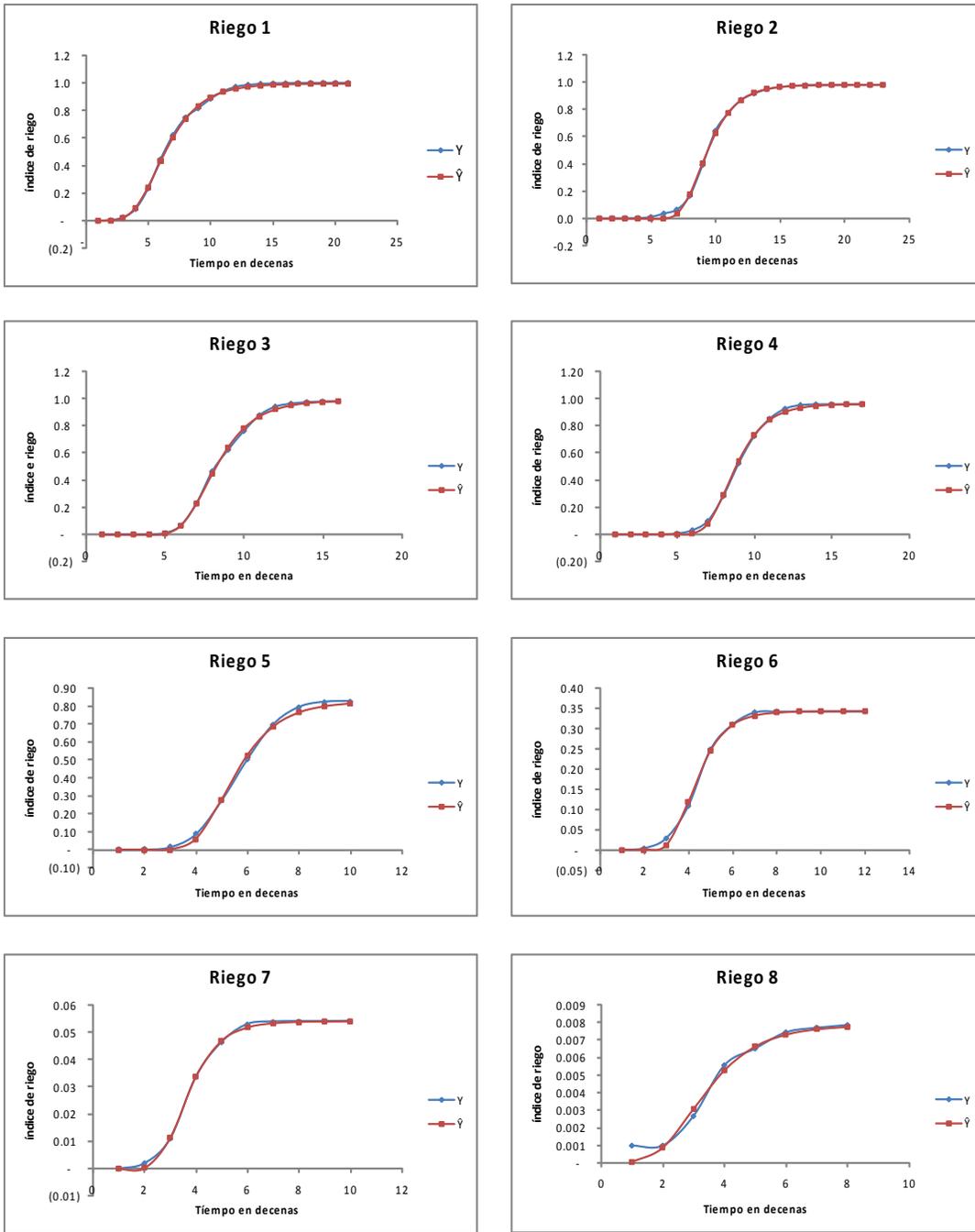


Figura 3. Índices de riesgo observados y estimados con el modelo Gompertz.

CONCLUSIONES.

El modelo Gompertz y Verhulst permitieron estimar adecuadamente los índices de riesgo con fines de predicción, por lo que esta metodología puede ser utilizada para la

elaboración de planes de riego en el cultivo de trigo. Esto se afirma considerando que fueron los modelos que cumplieron con las restricciones estadísticas establecidas en este estudio. Se recomienda el análisis del comportamiento en otros ciclos agrícolas del cultivo.

LITERATURA CITADA

- Alonso B. M., Tijerina Ch. L., Sánchez G. P., Martínez G. A., Aceves N. L. y Escalante E. J. A. 2003. Modelo logístico: Herramienta para diagnosticar el cuanto y cuando fertigar. *Terra Latinoamericana*, 2 (21): 225-231.
- Bernal R. F. A. 2005. Retos internacionales para el manejo del agua del bajo río colorado. En: Cortez, L. A. A., Scott, W., Márquez, Ch. M. Seguridad, agua y desarrollo: El futuro de la frontera México-Estados Unidos. *El Colegio de la Frontera Norte*, 383-384.
- Birch C. 1999. A new logistic sigmoid growth equation compared with Richards growth equation. *Annals of Botany* 83: 713-723.
- CNA, 1998. Comisión Nacional del Agua. Anexos del título de concesión. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP. Capítulo II. De la operación.
- CILA, 1944. Comisión Internacional de Límites y Aguas. Tratado sobre aguas internacionales, celebrado entre México y Los Estados Unidos. Artículo 15. Secretaría de Relaciones Exteriores, México.
- _____. 2012. Comisión Internacional de Límites y Aguas. Acta 319. III-3. Distribución de volumen en condiciones de presas con elevaciones bajas. Secretaría de Relaciones Exteriores. México.
- DRRC. 2011. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP de CV. Informe del año agrícola 2010-2011. Mexicali B. C.
- _____. 2010. Distrito de Riego Río Colorado SRL de IP de CV. 2010. Plan de riegos distrital. Sistema de gravedad 2010-2011. Mexicali B. C.
- Kirchhoff, W. H, 2012. Logistic function profile fit: A least-squares program for fitting interface profiles to extended logistic function. *Journal of Vacuums Science Technology*, A 30 (5):1-11.
- Sánchez M. V. 2004. El revestimiento del canal todo americano. ¿Competencia o cooperación por el agua en la frontera México- Estados Unidos? *El colegio de la frontera norte*. 13-23.
- SAS Institute Inc.2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide. Cary, NC, USA.
- Yin X., Goudrian J., Latinga E. A., Vos J. and Spiertz H. J. 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany*, 91: 361-371.

3.2 ARTÍCULO 2. Evapotranspiración del cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) para siembras de octubre a febrero, en el Distrito de Riego 014

Wheat crop (*Triticum aestivum* L.) evapotranspiration for sowings from october until february, in the 014 Irrigation District

Carlos Heberto Castro González^{1*}, María Isabel Escobosa García¹, Leonel Avendaño Reyes¹, Luis Fernando Escoboza García¹, Oscar Alejandro Viramontes Olivas², Marco Antonio Huez López³.

¹Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California.

²Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua.

³Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora.

^{1*}Autor para correspondencia: castrogz@hotmail.com

Enviado a: Revista Biológico Agropecuario Tuxpan, 21 septiembre 2015.

Publicado volumen 4; numero 6. Julio – diciembre 2015.

RESUMEN

En los valles de Mexicali y San Luis Rio Colorado en el Noroeste de México; el trigo se establece en una amplia gama de fechas de siembra; por lo que la determinación de la evapotranspiración con fines de programación y cálculo de volumen de agua para el riego, debe considerar las distintas condiciones climáticas y la superficie a establecer en cada fecha. Con el fin de obtener la evapotranspiración global del cultivo de trigo para siembra de octubre a febrero, se realizó el presente estudio utilizando la metodología de evapotranspiración potencial y coeficientes de cultivo; mientras que la estimación de la superficie a establecer en cada fecha se simulo con el modelo logístico de Gompertz, empleando información de la superficie regada acumulada del primer riego con datos de cuatro ciclos de trigo. Los parámetros del modelo se obtuvieron con software especializado para regresiones no lineales y en el análisis estadístico se efectuaron: prueba de bondad de ajuste, verificación de linealidad, análisis de varianza y del residual para comprobar los supuestos del modelo. La

evapotranspiración más baja con 444.0 mm fue para las siembras de la segunda decena de febrero, la más alta con 559.6 mm para las de la primera decena de noviembre y la evapotranspiración global del ciclo resultó de 524.9 mm para las siembras de octubre a febrero. La función Gompertz describió adecuadamente el comportamiento de la superficie regada acumulada en el tiempo, y su utilización es estadísticamente confiable para fines de predicción de superficie a establecer para el cálculo de la evapotranspiración global del cultivo con la metodología propuesta.

Palabras clave: Trigo., riego, modelo de crecimiento, regresión no lineal.

ABSTRACT

In the Mexicali and San Luis valleys in the Northwest of Mexico, wheat is established in a wide range of dates of sowing, so that the determination of evapotranspiration with purposes of programming and calculation of water volume for the irrigation, must consider the different climatic conditions and the surface to be established every date. In order to obtain the global evapotranspiration of the cultivation of wheat for sowing from October until February, the present study was realized using the methodology of potential evapotranspiration and coefficients of cultivation, while the estimation of the surface to be established in every date was simulated with the Gompertz logistic model, which represents the behavior of the piled up watered surface of the first irrigation, using information of four cycles of wheat and obtaining its parameters with software specialized for nonlinear regressions. The lowest evapotranspiration with 444.0 mm was for the sowings of the second on the tenth of February and the highest with 559.6 mm for those of the first on the tenth of November. The global evapotranspiration of the cycle resulted from 525.0 mm for the sowings from October until February. The Gompertz function described appropriately the trend of the watered surface accumulated in the time, and its use resulted statistically reliable for surface prediction to establish the calculation of the global evapotranspiration of the cultivation with the proposed methodology.

Key words: Wheat, irrigation, growth model, non linear regression.

INTRODUCCIÓN

El Distrito de Riego 014, Río Colorado; proporciona el riego al valle de Mexicali en Baja California y al de San Luis Río Colorado en Sonora y para su riego cuenta con agua de gravedad proveniente del Río Colorado y con agua subterránea aportada por su acuífero (Bernal, 2005) para atender 206,221 has con derechos de riego. En la cedula de cultivos destacan el trigo, algodón y alfalfa, siendo el cultivo de trigo el más importante por su superficie, que en promedio de los ciclos agrícolas del 2008 al 2014 se establecieron 66,782 hectáreas con agua de gravedad. La programación del agua para riego se basa en un plan de siembra y riego (CNA, 1998) que debe fundamentarse técnicamente en las necesidades hídricas de los cultivos (Catalán *et al.*, 2012) considerar el manejo usual del riego en la región y cumplir con las restricciones propias del tratado (CILA, 1944) que rigen el manejo del agua del Río Colorado. Todo este proceso se debe desarrollar en un esquema de uso racional del agua, ya que la presión y demanda por el recurso es cada vez más intensa por los usuarios urbanos, industriales, ecologistas y agricultores (Sánchez, 2004), que ante una disponibilidad fija y con tendencias a la baja por efectos climáticos y sequía en la cuenca del Río Colorado (CILA, 2012), se tendrán que mejorar las metodologías sobre uso del agua y optimizar los procesos de programación en la solicitud del agua en tiempo y volumen, para que estos coincidan cuando los cultivos los están demandando y el recurso sea óptimamente utilizado (Ventura *et al.*, 2001). La elaboración de un plan de riegos requiere incluir la evapotranspiración de los cultivos (Gómez *et al.*, 2010) que se sustente en datos climatológicos y coeficientes de cultivo (Allen, *et al.*, 2005) y que en su cálculo incluya las distintas condiciones climáticas (Abdrabbo *et al.*, 2014) que se presentan cuando se cultivan grandes superficies ya que estas se establecen en una amplia gama de fechas de siembra que para el caso del trigo en el Distrito de Riego 014, puede haber hasta 5 meses entre las primera y última fecha. La identificación de los requerimientos hídricos de cada fecha de establecimiento se puede lograr analizando el comportamiento de la aplicación del primer riego ya que este determina el inicio del ciclo de cultivo de cada fecha. Al graficar la superficie regada acumulada del primer riego se obtiene una curva sigmoide (Kirchhoff, 2012) factible de ser simulada con modelos empíricos conocidos como modelos logísticos de crecimiento (Birch, 1999) y que al obtener las ecuaciones y parámetros, se puede utilizar con fines

de predicción (Alonso *et al.*, 2003) de la superficie regada acumulada. Por tanto el objetivo de este estudio fue obtener la evapotranspiración global del cultivo de trigo para siembra del 01 de octubre al 20 de febrero, utilizando la metodología de evapotranspiración potencial y coeficientes de cultivo (Allen *et al.*, 2006), en tanto que para estimar la superficie a establecer en cada fecha se empleó el modelo logístico de Gompertz (Yin *et al.*, 2003) cuyos parámetros se estimaron con software especializado para regresiones no lineales (Cheng y Gordon, 2007). La hipótesis planteada fue: que la combinación de la información de evapotranspiración con la estimación de superficie de siembra obtenida con el modelo logístico; permite calcular la evapotranspiración global del cultivo de trigo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo, (Etc) se recurrió a la información de evapotranspiración potencial (Eto) generada en cinco estaciones meteorológicas (Andrade, San Luis, Zacatecas, Nuevo León y Mexicali) del Sistema de información para el manejo del agua de riego en Baja California (SIMARBC), ubicadas en el valle de Mexicali. Esta información con observaciones de cuatro años, se presenta en la Tabla 1, donde también se muestran los datos de la evaporación del Sistema Meteorológico Nacional de la estación Bataquez del Valle de Mexicali, como promedio de los años 1951-2010.

Tabla 1. Evaporación y evapotranspiración potencial (Eto) mensual en mm.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ags.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual.
2010 Eto.	64.46	69.90	137.80	164.54	197.37	226.80	186.63	213.47	181.79	119.02	91.94	58.41	1,712.12
2011 Eto.	81.91	84.31	137.06	165.60	211.54	230.96	232.77	212.23	165.51	132.58	77.31	60.65	1,792.42
2012 Eto.	77.48	86.49	130.56	163.53	205.57	217.93	211.35	193.25	155.94	128.36	67.40	62.76	1,700.61
2013 Eto.	70.42	87.63	136.46	179.27	169.57	200.78	205.60	195.10	159.42	128.65	76.02	68.01	1,676.94
Eto promedio	73.57	82.08	135.47	168.24	196.01	219.12	209.09	203.51	165.66	127.15	78.17	62.46	1,720.53
Eto diaria	2.37	2.93	4.37	5.61	6.32	7.30	6.74	6.56	5.52	4.10	2.61	2.01	
Evaporación	93.60	109.80	168.20	220.00	295.10	312.00	323.20	285.90	234.40	161.50	119.70	84.80	2,408.20

Los coeficientes de cultivo (Kc) y evapotranspiración del cultivo (Etc) se calcularon con la metodología y programa denominado "Basic Irrigation Scheduling" (Snyder *et al.*, 2007), que fundamenta su procedimiento de acuerdo al documento FAO 56, de la ONU (Allen *et al.*, 2006) y al cual se puede acceder en (http://biomet.ucdavis.edu/irrigation_scheduling/bis/BIS.htm) y que básicamente calcula la Etc como resultado del producto de la evapotranspiración potencial multiplicado por el coeficiente de cultivo (Etc= Eto*Kc). Para el cálculo en esta hoja de Excel se requiere la Eto promedio diaria mensual en milímetros, la evaporación mensual en milímetros y el inicio y terminación del ciclo de cultivo (Abdrabbo *et al.*, 2014). Como inicio de ciclo se utilizaron los días 01, 11 y 21 del mes para la decena correspondiente y los días 10, 20 y 31 del mes de mayo para la terminación de ciclo. Para realizar los análisis tendientes a la obtención del modelo de predicción de superficie regada acumulada del primer riego, se empleó información del Distrito De Riego 014, sobre el cultivo de trigo establecido en el sistema de agua de gravedad, de los ciclos agrícolas referidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Superficie regada acumulada de trigo en el primer riego (ha).

Ciclo	TIEMPO EN DECENAS													
	1ª Oct.	2ª Oct.	3ª Oct.	1ª Nov.	2ª Nov.	3ª Nov.	1ª Dic.	2ª Dic.	3ª Dic.	1ª Ene.	2ª Ene.	3ª Ene.	1ª Feb.	2ª Feb.
2008-2009	78.5	395.5	2,033.5	5,688.5	14,468.7	28,515.2	42,891.4	54,361.0	60,705.4	65,551.9	68,116.2	69,336.8	69,919.8	70,327.3
2010-2011	34.0	236.7	1,578.7	5,396.5	14,803.4	28,197.6	39,324.6	47,282.3	51,507.9	55,858.1	59,268.3	61,354.3	62,248.1	62,693.9
2011-2012	72.5	178.0	798.5	2,412.3	7,510.0	18,955.9	31,261.2	40,805.0	48,225.2	54,365.4	57,965.0	59,941.4	60,569.9	61,117.4
2012-2013	110.0	337.0	1,225.2	3,891.0	11,679.8	24,092.5	37,769.4	49,702.9	56,747.6	60,412.0	63,401.9	64,925.5	65,789.5	66,198.5

Al graficar esa información, se obtuvieron las curvas sigmoides que se aprecian en la Figura 1. Este comportamiento de curva (Guzmán y Sosa, 1994) se tomó de base para obtener el modelo de predicción de la superficie regada acumulada del primer riego, analizándose con el modelo logístico de crecimiento conocido como "Función Gompertz" (Yin *et al.*, 2003) que matemáticamente se expresa:

$$\text{Función Gompertz: } y = y_{\max} e^{-e^{-k(t-t_{\text{inf}})}}$$

Dónde: (y) Variable dependiente (superficie regada acumulada); (ymax) Valor máximo de y; (k) Constante de curvatura del modelo; (t) Tiempo (variable independiente); (t inf) Tiempo de inflexión y (e) Número de Euler.

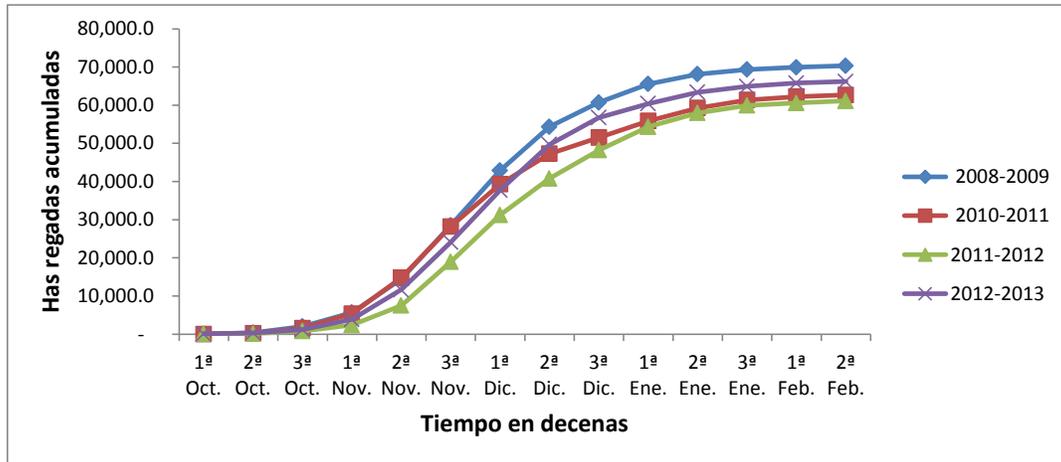


Figura 1. Superficie regada acumulada del primer riego en cuatro ciclos de trigo (ha).

La característica de estas funciones es que gráficamente describen una curva sigmoide (en forma de S), que en términos de crecimiento en relación al tiempo, inicia con una tasa baja, luego se incrementa a un máximo en el punto de inflexión para posteriormente decrecer al mínimo o suspender su crecimiento en la asíntota superior (Posada *et al.* 2011). El objetivo principal en el análisis del modelo es la obtención de sus parámetros y que estos sean precisos y confiables, para lo cual se acudió a software especializado para regresiones no lineales (Fathi *et al.*, 2008), usando los procedimientos NLIN y MODEL de SAS 9.2 (SAS, 2008) alimentándolo con los datos observados de superficie regada acumulada. El procedimiento genera los valores asintóticos de los parámetros, su estimación de límites de confianza, error estándar, grado de asimetría, % de sesgo, correlación entre parámetros, coeficiente de determinación y un análisis de varianza para el modelo. Adicionalmente se realizó un análisis del residual para comprobar los supuestos de homoestabilidad, normalidad, independencia de los errores y correlación entre estos, para lo cual se realizaron las pruebas de White, Breusch-Pagan, Shapiro-Wilk, de las rachas (run test) y de Godfrey, respectivamente. El indicador de bondad de ajuste utilizado fue el coeficiente de

determinación R^2_{aj} . La metodología de cálculo para determinar la Etc del trigo en forma global que incluya todas las fechas de siembra en un solo valor, se desarrolló en tres pasos:

1. Se determinó la ETC de cada decena en cada una de las fechas de siembra.
2. Se Determina el modelo de predicción de superficie regada acumulada y con este se obtienen los índices de riego.
3. Con el índice de riego y el Etc de cada decena del ciclo de cultivo, se calcula la Etc global.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el procedimiento descrito de cálculo de evapotranspiración de cultivo ($Etc = Eto * Kc$) se obtuvieron valores diarios para los tres términos, pero para el análisis, la información se concentró en forma decenal, como se aprecia en la Figura 2, donde se ejemplifican los Kc obtenidos, para la superficie establecida durante la primera decena de noviembre.

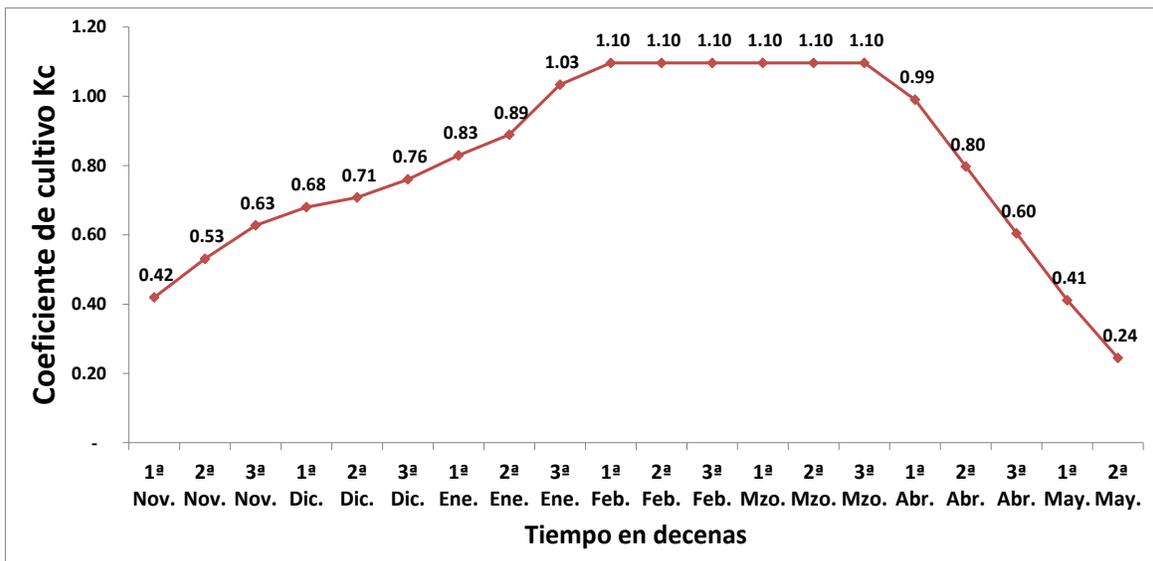


Figura 2. Coeficientes de cultivo (Kc) para trigo de la primera decena de noviembre.

La evapotranspiración del cultivo (Etc) se obtuvo para cada ciclo de cultivo, determinado por su fecha de establecimiento (se asumió como fecha de siembra la decena en que se aplicó el primer riego) desde la primera decena de octubre a la segunda decena de febrero; y fecha de madurez a cosecha durante el mes de mayo, de lo que resultaron 14 fechas de establecimiento y ciclos de cultivo desde 222 a 110 días. La Etc decenal y por fecha de establecimiento se muestra en la Tabla 3, donde se observa que la máxima evapotranspiración se obtuvo para el ciclo de la primera decena de noviembre con una Etc de 559.6 milímetros y la mínima para la segunda decena de febrero con 444.0 milímetros.

Tabla 3. Evapotranspiración decenal y total por fecha de establecimiento de trigo (mm).

Decenas de desarrollo	Fechas de establecimiento del cultivo														
	1ª Oct.	2ª Oct.	3ª Oct.	1ª Nov.	2ª Nov.	3ª Nov.	1ª Dic.	2ª Dic.	3ª Dic.	1ª Ene.	2ª Ene.	3ª Ene.	1ª Feb.	2ª Feb.	
1ª Oct.	15.4														
2ª Oct.	13.8	13.8													
3ª Oct.	13.5	13.5	13.5												
1ª Nov.	12.9	12.9	12.9	12.9											
2ª Nov.	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9										
3ª Nov.	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4									
1ª Dic.	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3								
2ª Dic.	15.5	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3							
3ª Dic.	20.7	18.7	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3						
1ª Ene.	23.0	21.3	19.3	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.4					
2ª Ene.	25.8	25.8	24.5	21.0	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	20.6	20.6				
3ª Ene.	30.2	30.4	30.2	28.6	26.1	24.0	23.0	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9			
1ª Feb.	29.2	29.4	29.2	29.3	28.8	27.3	24.5	21.8	20.5	20.4	20.4	20.4	20.4		
2ª Feb.	31.9	32.1	31.9	32.0	31.8	32.0	31.2	29.0	25.5	21.3	21.1	21.1	21.1	21.1	
3ª Feb.	28.6	28.8	28.6	28.7	28.5	28.7	28.4	28.7	27.4	22.0	19.1	18.6	18.6	18.6	
1ª Mzo.	40.6	40.8	40.6	40.7	40.4	40.7	40.3	40.7	40.3	38.2	33.5	28.3	25.2	25.0	
2ª Mzo.	45.6	46.5	46.3	46.5	46.1	46.4	46.1	46.4	46.0	46.5	46.1	42.0	34.6	27.8	
3ª Mzo.	48.0	50.8	52.0	57.3	56.9	57.3	56.8	57.3	56.7	57.3	57.8	57.2	55.6	48.6	
1ª Abr.	38.2	40.5	41.3	51.4	53.5	55.3	56.1	56.9	56.4	56.8	57.3	56.7	57.6	56.9	
2ª Abr.	31.0	33.0	33.3	44.1	46.1	48.1	50.6	53.2	56.0	60.3	60.9	60.2	61.2	60.4	
3ª Abr.	22.4	24.0	23.7	34.9	36.4	37.9	39.8	41.6	44.0	59.8	61.9	62.6	63.8	63.0	
1ª May.	14.7	15.3	15.0	24.6	25.6	26.4	27.6	28.6	30.1	47.3	49.9	53.4	59.0	60.8	
2ª May.				15.2	15.5	15.7	16.0	16.2	16.6	33.1	34.7	36.9	41.2	42.2	
3ª May.										17.1	17.5	18.1	20.2	19.4	
Etc total	543.7	534.7	516.6	559.6	548.5	538.5	524.8	513.4	498.1	542.1	523.7	498.5	478.6	444.0	
Ciclo en días	222	212	202	191	191	181	171	161	151	151	141	131	120	110	

La información analizada de superficie regada acumulada y establecida, expuesta en la Tabla 2 y Figura 1, se contabilizó hasta la segunda decena de febrero, ya que es la fecha más tardía en que se pueden esperar cosechas medianamente rentables, aun cuando se reportan riegos más tardíos en los informes mencionados del distrito de riego. Dicha información expresada en miles de hectáreas (y) que transformada a la raíz cuadrada (y') es la que se utilizó para la obtención del modelo. La transformación a raíz cuadrada ($y' = \sqrt{y}$) se efectuó, en virtud de que en las pruebas iniciales se detectó inconsistencia de varianza constante del residual, recurriéndose a la transformación mencionada para corregirla y practicar el análisis completo.

En la Tabla 4, se muestran los análisis estadísticos realizados al modelo de predicción obtenido para superficie regada acumulada, donde se aprecia que es estadísticamente significativo ya que para la fuente de variación atribuida a la regresión se obtiene un valor de $P < 0.0001$. Analizando la medida de asimetría de los parámetros **k** y **tin**, resultaron con valor 0.25, lo que muestran que el modelo tiene propiedades razonablemente cercanas al comportamiento lineal, que indica varianza uniforme, aproximada distribución normal y seguro para la construcción de inferencias, lo cual se confirma con el indicador % de sesgo ya que alcanzan ambos parámetros valores inferiores a 1.0%. En cuanto a los indicadores de los parámetros, se aprecia que el parámetro **k** es más amplio en su estimación ya que sus límites de confianza se sitúan $\pm 6.62\%$ en relación al estimado, mientras que el parámetro **tin** se limita en $\pm 2.68\%$ sobre su estimado. También se aprecia que los valores de los parámetros entre los límites de confianza no incluyen el valor "0" por lo que son significativamente diferentes de "0" al nivel 0.05% de significancia. Utilizando los valores de la matriz de correlación como indicadores de correlación entre parámetros, donde valores cercanos a 1, reflejan interdependencia mientras que valores bajos indican independencia entre estos (Motulsky y Christopoulos, 2003), en este análisis, la correlación fue de 0.3190, que muestra que cada parámetro actúa de forma independiente en la contribución a la respuesta estimada.

Tabla 4. Análisis de varianza y parámetros obtenidos del modelo de Gompertz.

FUENTE VARIACIÓN	GL	SC	CM	VALOR F	APROX Pr>F
MODELO	2.00	1,986.80	993.40	9,147.33	<0.0001
ERROR	54.00	5.8647	0.1086		
TOTAL NO CORREGIDO	56.00	1,992.60			
TOTAL CORREGIDO	55.00	489.62			

PARÁMETRO	ERROR		LIMITES		ASIMETRÍA	% DEL SESGO
	ESTIMADO	ESTANDAR	DE CONFIANZA 95%			
k	0.4530	0.0150	0.4230	0.4830	0.1458	0.1100
tin^f	4.6049	0.0616	4.4813	4.7284	(0.0159)	(0.00)

	k	tin^f
k	1.00000	0.31900
tin^f	0.31900	1.00000

MATRIZ DE CORRELACIÓN

Para comprobar el cumplimiento de los supuestos de errores normalmente distribuidos, independencia entre estos y varianza constante, se practicaron las pruebas no paramétricas del residual (SAS, 1996) que se muestran en la Tabla 5, en la que se aprecia que se da cumplimiento a cada uno de los supuestos requeridos para soportar la veracidad del modelo. La varianza constante (Homoestabilidad) se verificó con las pruebas de White y la de Breusch-Pagan, las cuales no mostraron evidencia para rechazar la hipótesis nula de varianza constante. La distribución normal de los errores se revisó con la prueba de Shapiro-Wilk, que arrojó confirmación de normalidad. La independencia entre errores se comprobó con la prueba de las rachas (run test) y la correlación entre residuos se analizó con una prueba más específica para regresiones no lineales como lo es la de Godfrey, mostrando no correlación entre residuos.

Tabla 5. Verificación de los supuestos del modelo de Gompertz.

RESULTADO	NORMALIDAD	INDEPENDENCIA		HETEROCEDASTICIDAD		CORRELACION	BONDAD
	SHAPIRO- WILK	PRUEBA DE LAS RACHAS		WHITE	BREUSCH-PAGAN	GODFREY	DE AJUSTE
	Valor p	Z	Zt	pr>chi ²	pr>chi ²	Pr>LM	R ² aj.
OBTENIDO	0.1431	0.2981	1.96	0.1841	0.9128	0.2700	0.9878
RECOMENDABLE	>0.05	Z < Zt		>0.05	>0.05	p>0.05	>0.7

Por lo anterior se concluye que el modelo de estimación de superficie regada acumulada es estadísticamente confiable para efectos de predicción y en el uso del objetivo de este estudio, con las siguientes definiciones:

$$y' = \sqrt{y}$$

$$\hat{y}' = y_{\max} e^{-e^{-k(t-t_{\text{inf}})}}$$

$$\hat{y}' = (8.3864 e^{-e^{-0.4530(t-4.6049)}})^2$$

\hat{y}' =miles de ha.

Siendo sus parámetros $k=0.4530$, $t_{\text{inf}} = 4.6049$ y $y_{\max}=8.3864$. En la figura 3, se presenta el comparativo de comportamiento entre los datos observados y los estimados de superficie regada acumulada.

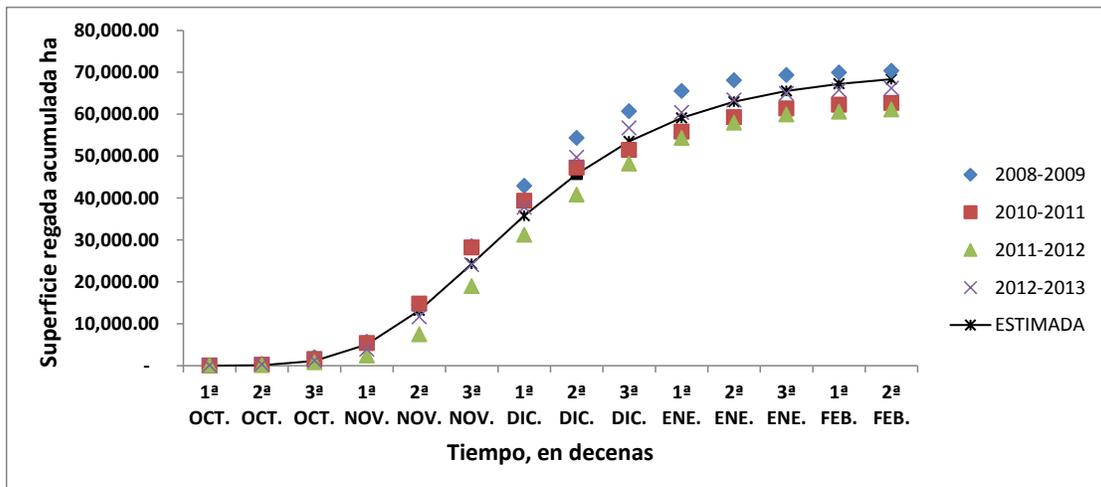


Figura 3. Superficie regada acumulada observada y la estimada con el modelo, para el primer riego de trigo.

El índice de riego acumulado (IRA) es la fracción de la superficie regada acumulada (vgr. IRA de 1ª decena de enero = $(59,117.80 \text{ ha} / 68,360.98 \text{ ha})=0.864789$) mientras que el índice de riego decenal (IRD) es la diferencia entre estos e indica que proporción del total se regó en esa decena (vgr. IRA de 1ª decena de enero = $(0.864789-0.782889)=0.0819$) tal y como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Cálculo del índice de riego decenal, para cada fecha de establecimiento.

Decena de establecimiento	Has. Sembradas acumuladas*	Índice riego acumulado	Índice riego decenal
1ª Oct.	2.52	0.000037	0.000037
2ª Oct.	104.82	0.001533	0.001497
3ª Oct.	1,122.39	0.016419	0.014885
1ª Nov.	5,066.96	0.074121	0.057702
2ª Nov.	13,209.66	0.193234	0.119113
3ª Nov.	24,290.80	0.355331	0.162097
1ª Dic.	35,778.58	0.523377	0.168046
2ª Dic.	45,765.63	0.669470	0.146093
3ª Dic.	53,519.03	0.782889	0.113418
1ª Ene.	59,117.80	0.864789	0.081900
2ª Ene.	62,977.72	0.921252	0.056464
3ª Ene.	65,561.57	0.959050	0.037797
1ª Feb.	67,259.03	0.983880	0.024831
2ª Feb.	68,360.98	1.000000	0.016120
* <i>Estimada con el modelo.</i>			1.000000

Para el cálculo de la evaporación global del cultivo, mostrada en la Tabla 7, el procedimiento fue:

- a) Se determina la superficie total a establecer. (50,000 ha para el ejemplo).
- b) La superficie a establecer en cada decena es el producto de multiplicar el IRD por la superficie total (vgr. Para la 1a decena de enero (superficie= $0.08190 \times 50,000 \text{ ha}$)=4,095.00 ha).
- c) El volumen en miles de metros cúbicos de cada decena se obtiene de multiplicar la Etc de cada fecha de establecimiento por la superficie establecida en cada decena (vgr. Volumen para 1a decena de enero ($4,095.0 \text{ ha} \times 542.1 \text{ mm}$)/100=22,198.995 miles m^3).

- d) La Etc global se obtiene de dividir el volumen total entre la superficie total (Etc global= (262,481.244 miles m³ / 50,000.00 ha)*100=524.962 mm).

Tabla 7. Calculo de la evapotranspiración global para trigo.

Fechas de siembra	Indice decenal	Has por establecer	Etc mm	Vol. Miles m³
1 ^a Oct.	0.000037	1.85	543.7	10.058
2 ^a Oct.	0.001497	74.85	534.7	400.223
3 ^a Oct.	0.014885	744.25	516.6	3,844.796
1 ^a Nov.	0.057702	2,885.10	559.6	16,145.020
2 ^a Nov.	0.119113	5,955.65	548.5	32,666.740
3 ^a Nov.	0.162097	8,104.85	538.5	43,644.617
1 ^a Dic.	0.168046	8,402.30	524.8	44,095.270
2 ^a Dic.	0.146093	7,304.65	513.4	37,502.073
3 ^a Dic.	0.113418	5,670.90	498.1	28,246.753
1 ^a Ene.	0.081900	4,095.00	542.1	22,198.995
2 ^a Ene.	0.056464	2,823.20	523.7	14,785.098
3 ^a Ene.	0.037797	1,889.85	498.5	9,420.902
1 ^a Feb.	0.024831	1,241.55	478.6	5,942.058
2 ^a Feb.	0.016120	806.00	444.0	3,578.640
Total	1.00000	50,000.00		262,481.244
Etc global			524.962	

Nota: Se utiliza ejemplo de cálculo con 50,000 has.

Para efectos de ejemplo en la Tabla 7 se empleó una superficie de 50,000 ha, para obtener la Etc global, pero se puede estimar con cualquier superficie, el resultado será el mencionado, el cual sería el dato a utilizar con fines de programación de riego. Este dato de Etc (524.962 mm), permitirá realizar cálculos de plan de riegos y estimar las eficiencias parcelarias específicas por predio al comparar la Etc con las láminas de riego aplicadas. Es importante señalar que el requerimiento hídrico total del cultivo, es la suma de la Etc, el requerimiento de lavado y el volumen perdido por eficiencia del método de riego, los cuales tendrán que ser considerados para el cálculo de volúmenes totales en un plan de riegos.

CONCLUSIONES

La evapotranspiración global del cultivo de trigo a nivel distrito de riego 014, resulto según este estudio de 524.962 mm, para las siembras del 01 de octubre al 20 de febrero. La metodología para el cálculo de la evapotranspiración de cada decena de establecimiento es de uso común y muy conocida, sin embargo la estimación de la evapotranspiración global para toda la gama de fechas de siembra utilizando índices de riego, se resuelve satisfactoriamente, ya que el modelo Gompertz permitió estimar adecuadamente la superficie regada acumulada y con esta la obtención de los índices de riego con fines de predicción, y cumplir con el objetivo proyectado de calcular la Etc global del cultivo de trigo. Por lo que esta metodología es adecuada para la obtención de la Etc global del trigo, lo cual se afirma considerando que el modelo propuesto, cumplió con las restricciones estadísticas para modelos no lineales, demostradas en este estudio.

LITERATURA CITADA

- Abdrabbo M. A. A., Ouda S. and Noreldin T. 2013. Modeling the irrigation schedule on wheat under climate change conditions. *Nature and Science*, 11(5):10-18.
- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. and Smith M. 2006. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome 1998.
- Allen R.G., Pruitt O. W., Raes D., Smith M. and Pereira L.S. 2005. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, 131 (1): 14-23.
- Alonso B. M., Tijerina Ch. L., Sánchez G. P., Martínez G. A., Aceves N. L. y Escalante E. J. A. 2003. Modelo logístico: Herramienta para diagnosticar el cuanto y cuando fertigar. *Terra Latinoamericana*, 2 (21): 225-231.
- Bernal R. F. A. 2005. Retos internacionales para el manejo del agua del bajo río colorado. En: Cortez, L. A. A., Scott, W., Márquez, Ch. M. Seguridad, agua y desarrollo: El futuro de la frontera México-Estados Unidos. *El Colegio de la Frontera Norte*, 383-384.
- Birch C. 1999. A new logistic sigmoid growth equation compared with Richards growth equation. *Annals of Botany*, 83: 713-723.

- Cheng C. and Gordon I. L. 2000. The Richards function and quantitative analysis of germination and dormancy in meadow foam (*Limnanthes alba*). *Seed Science Research*, 10(03): 265-277.
- Catalán V. E. A., Villa C. M. M., Inzunza I. M. A., Román L. A. y González B. J. L. 2012. Calculo de demandas de agua y programación del riego de cultivos en Coahuila. *Agrofaz*, 12 (3): 123-131.
- CNA, 1998. Comisión Nacional del Agua. Anexos del título de concesión. Distrito de Riego Rio Colorado SRL de IP. Capítulo II. De la operación.
- CILA, 1944. Comisión Internacional de Límites y Aguas. Tratado sobre aguas internacionales, celebrado entre México y Los Estados Unidos. Artículo 15. Secretaria de Relaciones Exteriores, México.
- _____. 2012. Comisión Internacional de Límites y Aguas. Acta 319. III-3. Distribución de volumen en condiciones de presas con elevaciones bajas. Secretaria de Relaciones Exteriores. México.
- Fathi N. M. H., France J., Odongo N. E., Lopez S., Bannink A. and Kebreab E. 2008. Modeling the lactation curve of dairy cows using differentials of growth functions. *Journal of Agricultural Science*, 146: 633-641.
- Gómez E. A., Rojas P. H., Vallejo C. F. A. y Estrada S. E. I. 2010. Determinación del requerimiento hídrico del pimentón en el municipio de Candelaria, departamento del Valle del Cauca. *Acta Agronómica*, 59(4): 442-448.
- Guzmán R. S. D. y Sosa C. J. 1994. La información climatológica del DDR 002 Río Colorado: Su uso en relación con la mosquita blanca (*Bemisia spp.*) folleto técnico no. 7. SARH. INIFAP. CIANO. Campo experimental valle de Mexicali.
- Kirchhoff W. H, 2012. Logistic function profile fit: A least-squares program for fitting interface profiles to extended logistic function. *Journal of Vacuums Science Technology*, A 30 (5):1-11.
- Posada O. S., Rosero N. R., Rodríguez N. y Costa C. A. 2011. Estimación de parámetros de curvas de crecimiento de ganado Nellore criado en confinamiento *Revista MVZ Córdoba*, 3(16): 2701-2711.
- SAS Institute Inc.1996. Forecasting examples for business and economics using the SAS ® System. Cary, NC: SAS institute, 312 – 319.
- SAS Institute Inc.2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide. The NLIN procedure. Cary, NC, USA. 4262-4336.
- Sánchez M. V. 2004. El revestimiento del canal todo americano. ¿Competencia o cooperación por el agua en la frontera México- Estados Unidos? *El colegio de la frontera norte*. 13-23.

Ventura F., Faber B. A., Bali K. M., Snyder R.L., Spano D., Pierpalo D. and Schulbach K. F. 2001. Model For Estimating Evaporation And Transpiration From Row Crops. Journal Of Irrigation And Drainage Engineering. 4: 339-345.

Yin X., Goudrian J., Latinga E. A., Vos J. and Spiertz H. J. 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. Annals of Botany, 91: 361-371.

PÁGINAS ELECTRÓNICAS.

Motulsky H. J. and Christopoulos A. 2003. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression, a practical guide to curve fitting. GraphPad Software INC., San Diego CA, www.graphpad.com. 5 septiembre 2014.

Snyder R.L. 2007. Basic Irrigation Scheduling (BIS). Revised April 2007. En http://biomet.ucdavis.edu/irrigation_scheduling/bis/BIS.htm. 3 septiembre 2014.

3.3 ARTÍCULO 3. Modelación del riego en algodón (*Gossypium Hirsutum L.*) con la función Gompertz de crecimiento, en los Valles de Mexicali y San Luis.

Carlos Heberto Castro González^{1*}, María Isabel Escobosa García¹, Leonel Avendaño Reyes¹, Luis Fernando Escoboza García¹, Oscar Alejandro Viramontes Olivas², Marco Antonio Huez López³.

¹Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California.

²Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua.

³Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora.

^{1*}Autor para correspondencia: castrogz@hotmail.com

Enviado a: Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 17 septiembre 2015.

RESUMEN

En el Distrito de Riego 014, Río Colorado, para disponer del volumen requerido de agua, la programación se basa en un plan de riegos y para verificar su avance y realizar los cambios y ajustes, se elaboran gráficas que describen la superficie regada acumulada en el tiempo. Este graficado genera curvas sigmoides de comportamiento típico para cada cultivo. Con el fin de fundamentar matemáticamente la representación gráfica del riego y obtener modelos de predicción para programación de riegos en algodónero (*Gossypium Hirsutum L.*), se realizó el presente estudio, en el que se empleó el modelo Gompertz de la función sigmoide para ajustarlo a los datos observados de la superficie regada acumulada de cuatro ciclos agrícolas y de nueve riegos aplicados en cada ciclo, en los valles de Mexicali Baja California y San Luis Río Colorado Sonora. Los parámetros de las ecuaciones se estimaron con software especializado para regresiones no lineales y en el análisis estadístico se efectuaron: prueba de bondad de ajuste, análisis de regresión, análisis de varianza y del residual. El modelo de Gompertz describió adecuadamente en cada riego el comportamiento de la superficie regada acumulada expresada como índices de riego en algodónero y resultado

estadísticamente confiable con $R^2 > 0.95$ en los nueve riegos por lo que su utilización para fines de predicción en la elaboración de planes de riego es recomendable.

Palabras clave: función Gompertz, algodónero, programación de riego.

ABSTRACT

In the Irrigation District 014, Colorado River, to provide the required volume of water, programming is based on a plan of irrigation and to check their progress and make changes and adjustments are made graphs which describe the irrigated area accumulated in time. . These graphs generate sigmoid curves of typical performance for each crop. In order to mathematically simulate the graphical representation of irrigation and to obtain predictive models for irrigation scheduling in cotton crop (*Gossypium Hirsutum L.*); the present study was realized, in which was used the Gompertz model of the sigmoid function to fitted to the observed information of the accumulated irrigation area of four agricultural cycles in the Mexicali and San Luis valleys and nine irrigations on each cycle. The parameters of the equations were estimated with specialized software for nonlinear regression and the statistical analysis goodness of fit test, regression analysis, analysis of variance and residual were made to verify the assumptions of the model. The Gompertz model adequately described each irrigation behavior of the irrigated area expressed as accumulated irrigation rates in cotton crop, resulting statistically reliable whit coefficient of determination (R^2) more than 0.95 in the nine irrigations and met the different restrictions raised in the study so that their use for purposes of prediction in the development of irrigation schemes is recommended.

Key words: Gompertz function, cotton crop, irrigation scheduling.

INTRODUCCIÓN

Durante los ciclos agrícolas del 2009 al 2013, en los valles de Mexicali, Baja California y de San Luis Río Colorado, Sonora, se cultivaron en promedio por ciclo: 120,504 ha con agua de gravedad y 48,313 ha con el sistema de pozo federal. La cédula media de cultivos establecida fue de 86,958 ha de trigo, 26,534 ha de algodón, 27,261 ha de alfalfa y 28,064 has con otros cultivos como hortalizas, frutales y sorgos. Para el

riego se cuenta con agua de gravedad, cuyo manejo se realiza con la obra hidráulica e infraestructura del Distrito de Riego 014, Río Colorado y con el suministro de agua del acuífero (Bernal, 2005). Al algodónero se le aplican en total de 6.54 riegos con una lámina bruta de 132 cm, estableciéndose en los meses de febrero a marzo y con una temporada de riego desde mediados de enero a la segunda decena de septiembre, y su cosecha a partir de septiembre. El establecimiento de los cultivos se basa en un plan de siembra y riegos (CNA, 1998) que debe fundamentarse técnicamente en las necesidades hídricas de los cultivos (Catalán *et al.*, 2012), considerar el manejo usual del riego en la región y cumplir con las restricciones propias del tratado (CILA, 1944) que rigen el manejo del agua del Río Colorado. Todo este proceso se debe desarrollar en un uso racional del agua, ya que la presión y demanda por el recurso es cada vez más intensa por los usuarios urbanos, industriales, ecologistas y agricultores (Sánchez, 2004), que ante una disponibilidad fija y con tendencias a la baja por efectos climáticos y sequía en la cuenca del Río Colorado (CILA, 2012), tendrán que mejorar sus metodologías sobre uso del agua y optimizar los procesos de programación en la solicitud del agua en tiempo y volumen, para que estos coincidan cuando los cultivos lo están demandando y el recurso sea óptimamente utilizado (Ventura *et al.*, 2014).

Una vez establecidos los cultivos, los organismos encargados de la distribución y entrega de agua a los usuarios, elaboran gráficas en las que se representa la superficie regada acumulada en el tiempo, para observar el avance del riego, compararlo con lo programado y así realizar los cambios y ajustes en los pedidos de agua. Este comportamiento gráfico se representa como una curva sigmoide (Kirchhoff, 2012), y puede ser simulada con modelos empíricos de la función sigmoide conocidos como logísticos de crecimiento (Birch, 1999) que al obtener sus ecuaciones y parámetros, puede ser utilizado con fines de predicción (Alonso *et al.*, 2003) en la elaboración de los planes de riego.

Por tanto, el objetivo de este estudio fue modelar con la función de Gompertz (Yin *et al.*, 2003) los riegos aplicados en algodónero con información de 4 ciclos agrícolas, y fundamentar matemática y estadísticamente la representación gráfica del riego y obtención de modelos que permitan utilizarlos con fines de predicción para la aplicación del agua de riego, a partir de la utilización de software especializado para regresiones

no lineales. En el estudio, la superficie regada acumulada se expresó como fracción de la superficie total establecida, denominando a dicha fracción índice de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para lograr los objetivos propuestos en el estudio, se recurrió a la información de superficie regada acumulada de cada riego en algodón del Distrito de Riego 014, referente a los ciclos agrícolas 2009, 2011, 2012 y 2013, del cultivo establecido en el sistema de agua de gravedad, la cual fue una superficie física de 9,262, 17,883, 15,733 y 11,257 ha respectivamente de cada ciclo agrícola, que graficadas presentan curvas sigmoides (Guzmán y Sosa, 1994) mostradas en la Figura 1.

Para el análisis del estudio, los datos de hectáreas regadas acumuladas fueron expresados como fracción de la superficie total regada por riego, definiéndose a dicha fracción como Índice de Riego Acumulado (IRA), que para este estudio tiene el valor entre 0 y 1, siendo $IRA=1$, cuando se riega la superficie física total establecida.

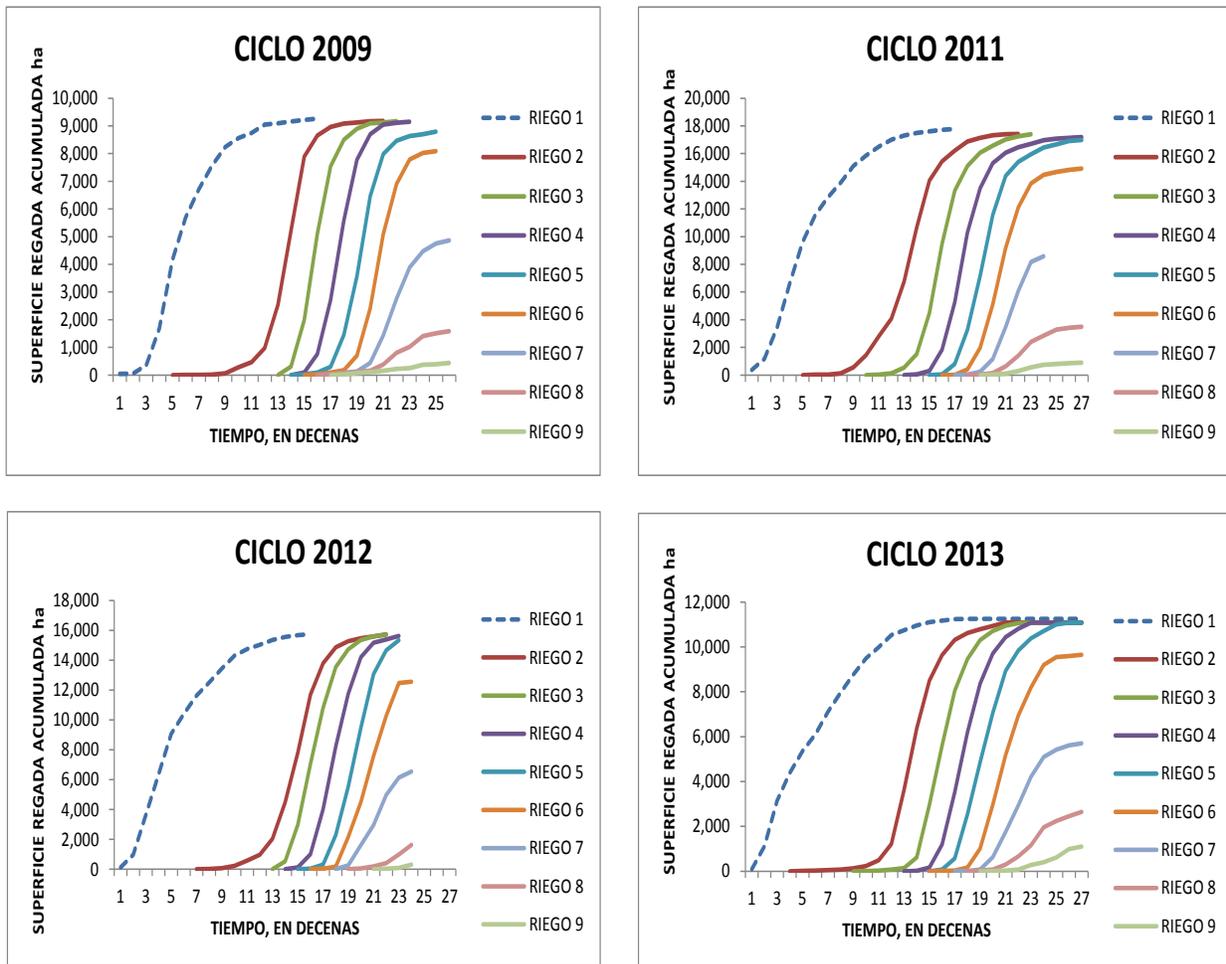


Figura 1. Superficie regada acumulada de nueve riegos en cuatro ciclos agrícolas de algodónero.

La conveniencia de la utilización de índices y no la superficie en hectáreas, es que nos permiten analizar varios ciclos aunque estos sean diferentes en superficie y en consecuencia efectuar predicciones para distintas superficies, siempre y cuando se encuentren entre los rangos evaluados. La unidad de tiempo en la información disponible es la decena (diez días).

En la Tabla 1 se muestran los índices de riego acumulados por decena y riego, utilizados en el análisis de regresión, los cuales son el promedio de los Índices de Riego Acumulados de los cuatro ciclos en estudio.

Tabla 1. Índices de riego acumulados (IRA) utilizados en el análisis de regresión con el Modelo Gompertz.

NO.	DECENA	RIEGO 1	RIEGO 2	RIEGO 3	RIEGO 4	RIEGO 5	RIEGO 6	RIEGO 7	RIEGO 8	RIEGO 9
1	1ª Ene.	0.0100								
2	2ª Ene.	0.0580								
3	3ª Ene.	0.1857								
4	1ª Feb.	0.3367								
5	2ª Feb.	0.5109	0.0013							
6	3ª Feb.	0.6172	0.0014							
7	1ª Mzo.	0.7045	0.0023							
8	2ª Mzo.	0.7753	0.0039							
9	3ª Mzo.	0.8431	0.0133							
10	1ª Abr.	0.8920	0.0366	0.0008						
11	2ª Abr.	0.9240	0.0720	0.0020						
12	3ª Abr.	0.9558	0.1258	0.0065						
13	1ª May.	0.9712	0.2761	0.0214						
14	2ª May.	0.9836	0.5032	0.0515	0.0019					
15	3ª May.	0.9918	0.7231	0.2298	0.0121	0.0027				
16	1ª Jun.	0.9972	0.8505	0.5074	0.0888	0.0054	0.0021			
17	2ª Jun.	0.9992	0.9182	0.7415	0.2893	0.0369	0.0039	0.0029	0.0025	
18	3ª Jun.	1.0000	0.9544	0.8668	0.5635	0.1777	0.0169	0.0037	0.0069	0.0026
19	1ª Jul.		0.9693	0.9286	0.7719	0.3923	0.1031	0.0124	0.0051	0.0073
20	2ª Jul.		0.9797	0.9602	0.8912	0.6444	0.2738	0.0676	0.0090	0.0047
21	3ª Jul.		0.9863	0.9764	0.9428	0.8237	0.5021	0.1733	0.0289	0.0079
22	1ª Ags.		0.9898	0.9854	0.9619	0.8964	0.6741	0.3043	0.0626	0.0122
23	2ª Ags.			0.9813	0.9762	0.9316	0.7848	0.4107	0.1025	0.0221
24	3ª Ags.				0.9545	0.9386	0.8241	0.4582	0.1476	0.0344
25	1ª Sep.				0.9601	0.9546	0.8490	0.4973	0.1820	0.0474
26	2ª Sep.				0.9638	0.9674	0.8429	0.5120	0.1935	0.0610
27	3ª Sep.				0.9669	0.9555	0.8482	0.5066	0.2158	0.0741
	IRA TOTAL	1.0000	0.9898	0.9854	0.9669	0.9555	0.8482	0.5066	0.2158	0.0741

El comportamiento de las curvas de riego (Figura 1) es la parte central del estudio, que consistió en obtener el modelo de predicción de la superficie regada acumulada en cada riego, analizándose con el modelo logístico de crecimiento conocido como función Gompertz: $y = y_{max} e^{-e^{-k(t-t_{inf})}}$ Dónde: (y) Variable dependiente (índice de riego acumulado); (y_{max}) Valor máximo de y; (k) Constante de curvatura del modelo; (t) Tiempo (variable independiente); (t_{inf}) Tiempo de inflexión y (e) Número de Euler.

La característica de estas funciones es que gráficamente describen una curva sigmoide (en forma de S), que en términos de crecimiento en relación al tiempo, inicia con una tasa baja, luego se incrementa a un máximo en el punto de inflexión para posteriormente decrecer al mínimo o suspender su crecimiento en la asíntota superior (Posada *et al.*, 2011). El objetivo principal en el análisis del modelo es la obtención de sus parámetros y que estos sean precisos y confiables, para lo cual se acudió a software especializado (Cheng y Gordon, 2007) para regresiones no lineales (Fathi *et*

al., 2008), usando los procedimientos NLIN y MODEL de SAS 9.2 (SAS, 2008) alimentándolo con los datos de índice de riego acumulados obtenidos de la superficie regada acumulada. El procedimiento genera los valores asintóticos de los parámetros, su estimación de límites de confianza, error estándar, grado de asimetría, matriz de correlación, coeficiente de determinación y un análisis de varianza para el modelo (Das, 2013). Adicionalmente se realizó un análisis del residual para comprobar los supuestos de homoestabilidad, normalidad e independencia de los errores para lo cual se realizaron las prueba de White, Breusch-Pagan, Shapiro-Wilk y las rachas (run test), respectivamente. El criterio para la aceptación del modelo se basó en el cumplimiento de las siguientes restricciones:

1. Que en el análisis de varianza, la fuente de variación atribuida al modelo fuese estadísticamente significativa y con bondad de ajuste aceptable.
2. Que los parámetros obtenidos presentaran adecuados indicadores de límites de confianza y grado de asimetría $|g1i| < 0.25$.
3. Que los modelos cumplieran con los supuestos de normalidad, independencia y varianza constante en el análisis del residual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los resultados del análisis de regresión del modelo con los valores de los parámetros, sus límites de confianza, asimetría, resultado del ANDEVA y matriz de correlación entre parámetros. En los nueve riegos se aprecia que en el análisis de varianza de cada uno de ellos, el modelo fue altamente significativo ya que la fuente de variación atribuida al modelo se obtiene un valor $P < .0001$. En cuanto al error de estimación, se confirma con certeza estadística del 95 % que los parámetro obtenidos en los en los nueve riegos son confiables, ya que no incluyen el valor de cero en ninguno de los casos. Revisando en el mismo cuadro, la medida de asimetría para el caso del parámetro **k**, se puede observar que el valor de asimetría se sitúa entre 0.10 y 0.25 (a excepción del riego 9) que los ubica como parámetros con comportamiento razonablemente cercano al lineal. Para el parámetro **tin**, en todos los riegos el valor fue < 0.10 que lo considera de mínima varianza,

distribución normal y con intervalos de confianza seguros para la construcción de inferencias. En cuanto a la matriz de correlación entre parámetros se encontraron valores menores a 0.33, por lo que la contribución al resultado del modelo de cada parámetros se considera independiente (Motulsky y Christopoulos, 2003).

Tabla 2. Resumen del análisis de regresión de los modelos Gompertz.

RIEGO NO.	PARÁMETRO K			PARÁMETRO t inf.			ANDEVA	MATRIZ
	ESTIMADO	Ê 95 % (±)	ASIMETRÍA	ESTIMADO	Ê 95 % (±)	ASIMETRÍA	Valor p	CORRELACIÓN
RIEGO 1	0.3968	0.0203	0.1051	4.2606	0.1090	(0.0128)	<.0001	0.3216
RIEGO 2	0.6463	0.0604	0.1974	13.2818	0.1224	(0.0212)	<.0001	0.3190
RIEGO 3	0.8083	0.0347	0.0901	15.4543	0.0450	(0.0095)	<.0001	0.3207
RIEGO 4	0.8272	0.0545	0.1384	17.2008	0.0676	(0.0136)	<.0001	0.3196
RIEGO 5	0.7793	0.0600	0.1563	18.7552	0.0837	(0.0174)	<.0001	0.3190
RIEGO 6	0.7826	0.0662	0.1693	20.1077	0.0917	(0.0177)	<.0001	0.3181
RIEGO 7	0.7995	0.0763	0.1931	20.9328	0.1091	(0.0209)	<.0001	0.3181
RIEGO 8	0.6061	0.0833	0.2482	22.3408	0.1860	(0.0288)	<.0001	0.3152
RIEGO 9	0.5495	0.1839	0.5330	23.2580	0.4676	(0.0645)	<.0001	0.2970

Ê 95 % (±): Error de estimación del parámetro en los límites de confianza al 95%.

ASIMETRÍA: Valor de Skewness, en el procedimiento NLIN de SAS.

Para confirmar la validez estadística del modelo se realizó un análisis del residual (SAS, 1996) comprobando los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia del modelo para evitar obtener conclusiones con un modelo espurio. El resumen del análisis se muestra en la Tabla 3.

La verificación de normalidad con la prueba de Shapiro–Wilk indica que en ocho riegos la información analizada proviene de una distribución normal, mientras que en el riego 2 el indicador quedo en el umbral marginal cercano a 0.05. En el análisis de independencia de errores, con la prueba de las rachas (run test) se comprobó que éstos, en los 9 modelos son independientes no correlacionados. En las pruebas de heterocedasticidad, la prueba de White solo rechaza la homoestabilidad en los riegos 2 y 4, no así la prueba de Breusch-Pagan que no rechaza la varianza constante en ningún riego. Referente al coeficiente de determinación R^2 , en 8 riegos fue superior a 0.99 y en el riego 9 de 0.95, por lo que el ajuste del modelo a los datos es estrecho.

Tabla 3. Análisis del residual de los modelos Gompertz.

RIEGO NO.	NORMALIDAD	INDEPENDENCIA		HETEROCEDASTICIDAD		BONDAD
	SHAPIRO- WILK Valor p	PRUEBA DE LAS RACHAS r rt		WHITE pr>chi ²	BREUSCH-PAGAN pr>chi ²	DE AJUSTE R ² aj.
RIEGO 1	0.2556	Z =1.31	Zt=1.96	0.2093	0.0691	0.9980
RIEGO 2	0.0356	3	2	0.0341	0.1732	0.9975
RIEGO 3	0.3422	3	2	0.6621	0.1622	0.9996
RIEGO 4	0.5454	5	3	0.0297	0.5538	0.9989
RIEGO 5	0.1509	5	2	0.1088	0.4788	0.9986
RIEGO 6	0.5835	3	2	0.1021	0.9141	0.9984
RIEGO 7	0.1793	Z =1.04	Zt=1.96	0.9983	0.3198	0.9992
RIEGO 8	0.5972	5	2	0.5813	0.2237	0.9944
RIEGO 9	0.8163	3	2	0.3117	0.3623	0.9578
RECOMENDABLE	>0.05	r>rt, Z <Zt		>0.05	>0.05	>0.7

En base a los distintos análisis expresados, el modelo Gompertz muestra aceptables condiciones estadísticas para ser utilizado como modelo de predicción de índices de riego y modelación del riego en algodónero.

En la Tabla 4 se presentan los índices de riego acumulado (IRA) estimados de cada riego y en la Figura 2, la representación gráfica de esta información. La figura 2, muestra el comportamiento de curvas sigmoides de cada uno de los riegos expresados como índices de riego acumulados estimados con los modelos, en las que se aprecia la similitud de comportamiento con la información original de la Figura 1.

Los índices de riego decenales (IRD) no son acumulados y nos indican la superficie que se riega en cada decena y su obtención es a partir de la diferencia entre dos índices acumulados consecutivos, información útil para detectar los periodos con máxima intensidad de demanda de riego. Estos índices riego decenales (IRD) se muestran la Tabla 5.

Tabla 4. Índices de riego acumulados (IRA) estimados con el modelo Gompertz en algodónero.

NO. DECENA	RIEGO 1	RIEGO 2	RIEGO 3	RIEGO 4	RIEGO 5	RIEGO 6	RIEGO 7	RIEGO 8	RIEGO 9
1 1ª Ene.	0.0261								
2 2ª Ene.	0.0861								
3 3ª Ene.	0.1922								
4 1ª Feb.	0.3299								
5 2ª Feb.	0.4744								
6 3ª Feb.	0.6056								
7 1ª Mzo.	0.7138								
8 2ª Mzo.	0.7971								
9 3ª Mzo.	0.8586								
10 1ª Abr.	0.9025	0.0002							
11 2ª Abr.	0.9334	0.0125							
12 3ª Abr.	0.9547	0.1003	-						
13 1ª May.	0.9693	0.2982	0.0007						
14 2ª May.	0.9793	0.5279	0.0385	-					
15 3ª May.	0.9860	0.7120	0.2317	0.0020	-				
16 1ª Jun.	0.9906	0.8329	0.5157	0.0650	0.0002	-			
17 2ª Jun.	0.9936	0.9042	0.7367	0.2969	0.0188	0.0000	-		
18 3ª Jun.	0.9957	0.9440	0.8636	0.5770	0.1577	0.0047	0.0000	-	
19 1ª Jul.		0.9655	0.9270	0.7715	0.4182	0.0785	0.0041	0.0001	0.0000
20 2ª Jul.		0.9770	0.9567	0.8760	0.6541	0.2858	0.0545	0.0035	0.0002
21 3ª Jul.		0.9831	0.9703	0.9261	0.8030	0.5158	0.1804	0.0227	0.0023
22 1ª Ags.		0.9863	0.9764	0.9488	0.8822	0.6757	0.3140	0.0631	0.0101
23 2ª Ags.			0.9791	0.9590	0.9212	0.7644	0.4059	0.1104	0.0234
24 3ª Ags.				0.9634	0.9396	0.8088	0.4572	0.1497	0.0381
25 1ª Sep.				0.9654	0.9482	0.8300	0.4831	0.1768	0.0505
26 2ª Sep.				0.9662	0.9521	0.8398	0.4956	0.1936	0.0594
27 3ª Sep.				0.9666	0.9540	0.8444	0.5015	0.2034	0.0652
IRA TOTAL	0.9957	0.9863	0.9791	0.9666	0.9540	0.8444	0.5015	0.2034	0.0652

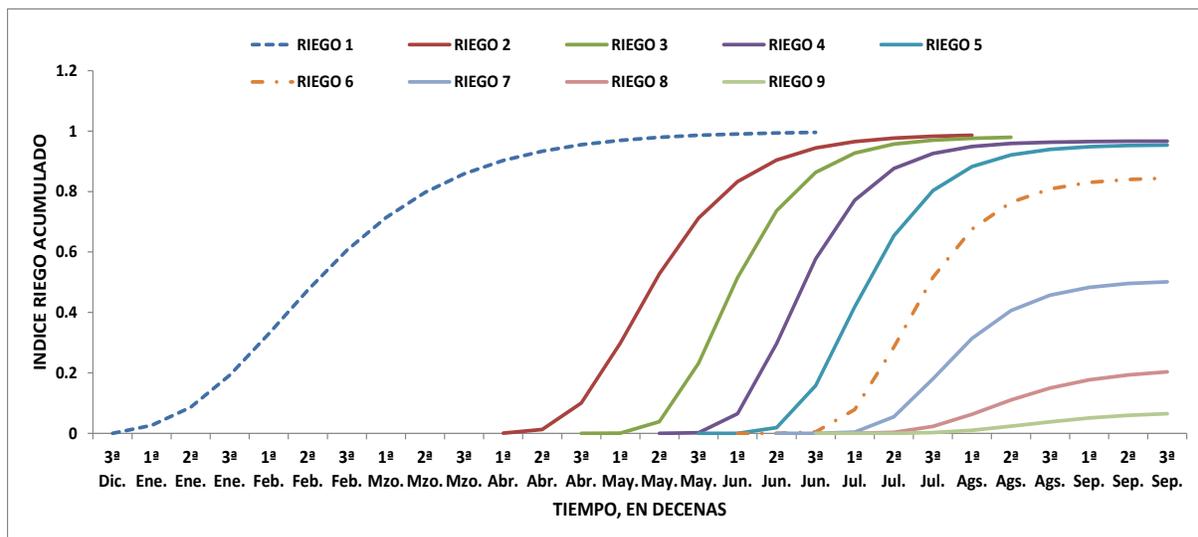


Figura 2. Representación de los índices de riego acumulados (IRA) estimados con el modelo Gompertz.

Tabla 5. Índices de riego decenales (IRD) calculados para algodónero.

NO. DECENA	RIEGO 1	RIEGO 2	RIEGO 3	RIEGO 4	RIEGO 5	RIEGO 6	RIEGO 7	RIEGO 8	RIEGO 9
1 1ª Ene.	0.0261								
2 2ª Ene.	0.0600								
3 3ª Ene.	0.1061								
4 1ª Feb.	0.1377								
5 2ª Feb.	0.1445								
6 3ª Feb.	0.1313								
7 1ª Mzo.	0.1081								
8 2ª Mzo.	0.0834								
9 3ª Mzo.	0.0615								
10 1ª Abr.	0.0440	0.0002							
11 2ª Abr.	0.0308	0.0123							
12 3ª Abr.	0.0213	0.0877							
13 1ª May.	0.0146	0.1979	0.0007						
14 2ª May.	0.0100	0.2297	0.0378						
15 3ª May.	0.0068	0.1841	0.1932	0.0020					
16 1ª Jun.	0.0046	0.1209	0.2841	0.0630	0.0002				
17 2ª Jun.	0.0031	0.0713	0.2210	0.2319	0.0187	0.0000			
18 3ª Jun.	0.0021	0.0398	0.1269	0.2801	0.1389	0.0047	0.0000		
19 1ª Jul.		0.0215	0.0634	0.1945	0.2605	0.0739	0.0041	0.0001	0.0000
20 2ª Jul.		0.0115	0.0297	0.1045	0.2359	0.2072	0.0504	0.0035	0.0002
21 3ª Jul.		0.0061	0.0136	0.0500	0.1490	0.2300	0.1259	0.0192	0.0021
22 1ª Ags.		0.0032	0.0061	0.0228	0.0792	0.1599	0.1336	0.0405	0.0077
23 2ª Ags.			0.0027	0.0101	0.0389	0.0888	0.0919	0.0473	0.0133
24 3ª Ags.				0.0045	0.0184	0.0444	0.0513	0.0393	0.0147
25 1ª Sep.				0.0020	0.0086	0.0211	0.0259	0.0271	0.0124
26 2ª Sep.				0.0009	0.0040	0.0098	0.0125	0.0168	0.0089
27 3ª Sep.				0.0004	0.0018	0.0046	0.0059	0.0098	0.0058
IRA TOTAL	0.9957	0.9863	0.9791	0.9666	0.9540	0.8444	0.5015	0.2035	0.0652

En la Figura 3, se presentan los índices de riego decenales (IRD) donde se aprecian los máximos de superficie regada por riego. Como ejemplo, analizando el primer riego se nota que la máxima demanda es durante las decenas de la primera a la tercera de febrero.

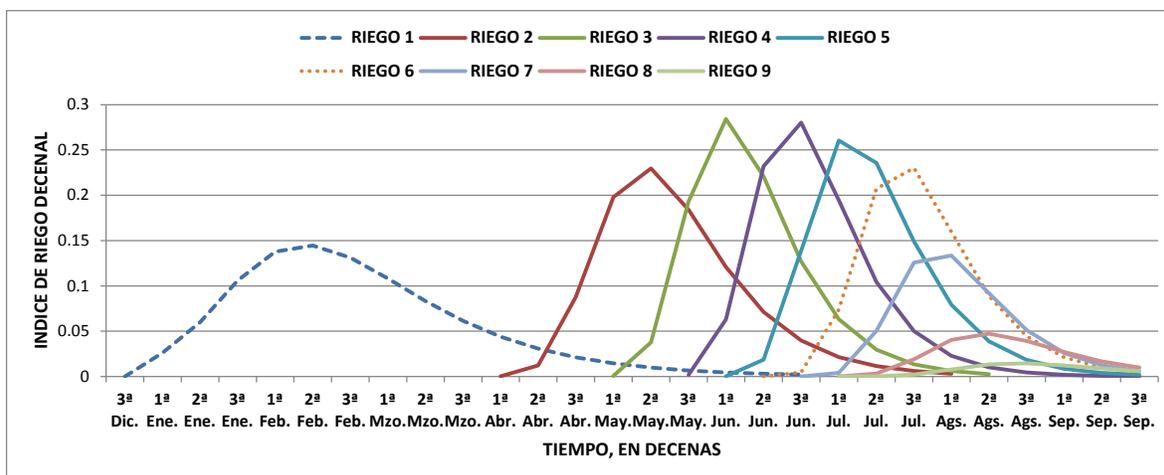


Figura 3. Índices de riego decenales (IRD) en los riegos de algodónero.

La utilidad práctica del modelo ($y = y_{max} e^{-k(t-t_{inf})}$), cuyos parámetros se muestran en la Tabla 2, es la interpretación de los índices de riego acumulados (IRA) en datos de hectáreas regadas acumuladas ya que la multiplicación del IRA por la superficie física a establecer estima la superficie acumulada a regar en una determinada decena y de un riego específico. Como ejemplo tomamos de la Tabla 4, el IRA del cuarto riego en la segunda decena de julio, que es de 0.8760 y para una superficie hipotética de 13,000 ha a establecer en un determinado ciclo, la superficie regada acumulada sería de: $0.8760 \cdot 13,000 = 11,388$ ha.

El índice de riego decenal (IRD), muestra la superficie a regar por decena. Tomando como ejemplo de la Tabla 5, el IRD de la segunda decena de julio, del cuarto riego que es 0.1045 y para una superficie hipotética a establecer de 13,000 ha, la superficie a regar en esa decena sería: $0.1045 \cdot 13,000 = 1,358.5$ ha. Tanto la información de superficie a regar por decena como la acumulada, son básicas para el cálculo de volumen de agua a programar en la elaboración de planes de riego ya que en el distrito de riego 014, el cálculo debe ser acertado por no contarse con una presa que permita amortiguar los cambios a corto plazo y el pedido se hace para un año completo.

CONCLUSIONES.

El modelo de Gompertz permitió estimar adecuadamente en cada riego los índices de riego acumulado y decenal con fines de predicción, por lo que esta metodología puede ser utilizada para la elaboración de planes de riego en el cultivo de algodón, ya que a partir de los índices se estima adecuadamente la superficie regada acumulada y superficie regada por decena. Esto se afirma considerando que los modelos propuestos cumplieron con las restricciones estadísticas para modelos no lineales demostradas en este estudio.

LITERATURA CITADA

- Alonso B. M., Tijerina Ch. L., Sánchez G. P., Martínez G. A., Aceves N. L. y Escalante E. J. A. 2003. Modelo logístico: Herramienta para diagnosticar el cuanto y cuando fertigar. *Terra Latinoamericana*, 2 (21): 225-231.
- Bernal R. F. A. 2005. Retos internacionales para el manejo del agua del bajo río colorado. En: Cortez, L. A. A., Scott, W., Márquez, Ch. M. Seguridad, agua y desarrollo: El futuro de la frontera México-Estados Unidos. El Colegio de la Frontera Norte, 383-384.
- Birch C. 1999. A new logistic sigmoid growth equation compared with Richards growth equation. *Annals of Botany*, 83: 713-723.
- Cheng C. and Gordon I. L. 2000. The Richards function and quantitative analysis of germination and dormancy in meadow foam (*Limnanthes alba*). *Seed Science Research*, 10(03): 265-277.
- Catalán V. E. A., Villa C. M. M., Inzunza I. M. A., Román L. A. y González B. J. L. 2012. Calculo de demandas de agua y programación del riego de cultivos en Coahuila. *Agrofaz*, 12 (3): 123-131.
- CNA, 1998. Comisión Nacional del Agua. Anexos del título de concesión. Distrito de Riego Rio Colorado SRL de IP. Capítulo II. De la operación.
- CILA, 1944. Comisión Internacional de Límites y Aguas. Tratado sobre aguas internacionales, celebrado entre México y Los Estados Unidos. Artículo 15. Secretaria de Relaciones Exteriores, México.
- _____. 2012. Comisión Internacional de Límites y Aguas. Acta 319. III-3. Distribución de volumen en condiciones de presas con elevaciones bajas. Secretaria de Relaciones Exteriores. México.

- Das P. K. 2013. Nonlinear Statistical Model and its Applications to Diffusion of Mobile Telephony in India. *Annals of Pure and Applied Mathematics*, 1 (5): 64-70.
- Fathi N. M. H., France J., Odongo N. E., Lopez S., Bannink A. and Kebreab E. 2008. Modeling the lactation curve of dairy cows using differentials of growth functions. *Journal of agricultural science*, 146: 633-641.
- Guzmán R. S. D. y Sosa C. J. 1994. La información climatológica del DDR 002 Río Colorado: Su uso en relación con la mosquita blanca (*Bemisia spp.*) folleto técnico no. 7. SARH. INIFAP. CIANO. Campo experimental valle de Mexicali.
- Kirchhoff W. H, 2012. Logistic function profile fit: A least-squares program for fitting interface profiles to extended logistic function. *Journal of Vacuums Science Technology*, A 30 (5):1-11.
- Posada O. S., Rosero N. R., Rodríguez N. y Costa C. A. 2011. Estimación de parámetros de curvas de crecimiento de ganado Nellore criado en confinamiento *Revista MVZ Córdoba*, 3(16): 2701-2711.
- SAS Institute Inc.1996. Forecasting examples for business and economics using the SAS® System. Cary, NC: SAS institute, 312 – 319.
- SAS Institute Inc.2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide. The NLIN procedure. Cary, NC, USA. 4262-4336.
- Sánchez M. V. 2004. El revestimiento del canal todo americano. ¿Competencia o cooperación por el agua en la frontera México- Estados Unidos? *El colegio de la frontera norte*. 13-23.
- Ventura F., Faber B. A., Bali K. M., Snyder R.L., Spano D., Pierpalo D. and Schulbach K. F. 2001. Model For Estimating Evaporation And Transpiration From Row Crops. *Journal Of Irrigation And Drainage Engineering*. November- December 2001, 339-345.
- Yin X., Goudrian J., Latinga E. A., Vos J. and Spiertz H. J. 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany*, 91: 361-371.

PÁGINAS ELECTRÓNICAS.

- Motulsky H. J. and Christopoulos A. 2003. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression, a practical guide to curve fitting. GraphPad Software INC., San Diego CA, www.graphpad.com. 5 septiembre 2014.

3.4 APLICACIÓN DE RESULTADOS. Cálculo del plan de riego para los cultivos de trigo, algodón y alfalfa con la metodología de índices de riego

INTRODUCCIÓN

Se presenta una hoja de cálculo en Excel (Castro y García, 1998)* en una versión actualizada para calcular el plan de riegos a partir de información de entrada como superficie, láminas de riego, eficiencia mensual del distrito, cultivos e índices de riego decenales. En esta corrida el cálculo se genera para los cultivos de trigo, algodón y alfalfa, utilizando información del distrito de riego 014. Los índices de riego empleados fueron los obtenidos en el presente estudio. El programa procesa la información para dos niveles de operación, siendo el volumen bruto el que se entrega a red mayor y el volumen neto el que se entrega a la red menor. La información de salida se concentra como:

- a) Resumen del cálculo
- b) Superficie física mensual y acumulada
- c) Láminas de riego netas mensuales y acumuladas
- d) Volumen neto mensual y acumulado
- e) Hectáreas riego mensuales y acumuladas
- f) Láminas de riego brutas mensuales y acumuladas
- g) Volumen bruto y mensual acumulado

*citado página 14

INFORMACIÓN DE ENTRADA

Cultivos y superficie: trigo: 65,000 ha, algodón: 16,000 ha, alfalfa: 20,000 ha.

Láminas de riego en m:

Cultivo	Riego 1	Riego 2	Riego 3	Riego 4	Riego 5	Riego 6	Riego 7
Trigo	0.200	0.190	0.180	0.180	0.170	0.150	0.150

Cultivo	Riego 1	Riego 2	Riego 3	Riego 4	Riego 5	Riego 6	Riego 7	Riego 8
ALGODONERO	0.240	0.220	0.210	0.210	0.210	0.160	0.160	0.160

Cultivo	Riego 1	Riego 2	Riego 3	Riego 4	Riego 5	Riego 6	Riego 7	Riego 8	Riego 9	Riego 10	Riego 11	Riego 12
Alfalfa	0.220	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170

Eficiencia mensual de conducción (%) en red mayor del distrito:

OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	GRAL
84	91	91	93	94	94	94	94	92	91	82	80	90

Índices de riego decenales:

En el programa se introducen los índices de riego decenales que se señalan en las Tablas 1, 2 y 3. Estos índices se generaron con el modelo Gompertz descritos en artículo 3 y anexos 1 y 2 de este estudio, para los cultivos de algodón, trigo y alfalfa respectivamente.

Tabla 1. Índices de riego decenales para trigo*

Cultivo	Decena	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Total
Trigo	1	-	0.04777	0.19471	0.06627	0.01383	-	-	-	
Riego 1	2	0.00013	0.13459	0.15261	0.04017	0.00798	-	-	-	
	3	0.00585	0.19708	0.10455	0.02373	0.01073	-	-	-	
Suma		0.00598	0.37944	0.45187	0.13017	0.03254	-	-	-	1.00000

Trigo	1	-	-	-	0.10659	0.17291	0.03518	0.00525	-	
Riego 2	2	-	-	0.00050	0.21102	0.11026	0.01888	0.00274	-	
	3	-	-	0.01842	0.22620	0.06387	0.00998	0.00144	-	
Suma		-	-	0.01892	0.54381	0.34704	0.06404	0.00943	-	0.98324

Trigo	1	-	-	-	-	0.10868	0.17197	0.03376	0.00488	
Riego 3	2	-	-	-	0.00047	0.21489	0.10825	0.01792		
	3	-	-	-	0.01837	0.22791	0.06196	0.00939		
Suma		-	-	-	0.01884	0.55148	0.34218	0.06107	0.00488	0.97845

Trigo	1	-	-	-	-	-	0.16864	0.13015	0.01561	
Riego 4	2	-	-	-	-	0.00064	0.26144	0.06789	0.00726	
	3	-	-	-	-	0.03238	0.21540	0.03307	0.00336	
Suma		-	-	-	-	0.03302	0.64548	0.23111	0.02623	0.93584

Trigo	1	-	-	-	-	-	0.00020	0.25175	0.04591	
Riego 5	2	-	-	-	-	-	0.02507	0.18624	0.02000	
	3	-	-	-	-	-	0.16512	0.09927	0.00850	
Suma		-	-	-	-	-	0.19039	0.53726	0.07441	0.80206

Trigo	1	-	-	-	-	-	0.00001	0.06410	0.05808	
Riego 6	2	-	-	-	-	-	0.00155	0.09159	0.03563	
	3	-	-	-	-	-	0.01992	0.08271	0.02033	
Suma		-	-	-	-	-	0.02148	0.23840	0.11404	0.37392

Trigo	1	-	-	-	-	-	-	0.00804	0.00823	
Riego 7	2	-	-	-	-	-	0.00011	0.01249	0.00502	
	3	-	-	-	-	-	0.00209	0.01165	0.00283	
Suma		-	-	-	-	-	0.00220	0.03217	0.01609	0.05045

*Obtenidos de memoria de cálculo anexo 1.

Tabla 2. Índices de riego decenales para algodónero*

Cultivo	Decena	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Total
Algodonero	1	0.0261	0.1377	0.1081	0.0440	0.0146	0.0046	-	-	-	
Riego 1	2	0.0600	0.1445	0.0834	0.0308	0.0100	0.0031	-	-	-	
	3	0.1061	0.1313	0.0615	0.0213	0.0068	0.0064	-	-	-	
Suma		0.1922	0.4134	0.2529	0.0961	0.0313	0.0140	-	-	-	1.0000

Algodonero	1	-	-	-	0.0002	0.1979	0.1209	0.0215	0.0032	-	
Riego 2	2	-	-	-	0.0123	0.2297	0.0713	0.0115	-	-	
	3	-	-	-	0.0877	0.1841	0.0398	0.0061	-	-	
Suma		-	-	-	0.1003	0.6117	0.2320	0.0391	0.0032	-	0.9863

Algodonero	1	-	-	-	-	0.0007	0.2841	0.0634	0.0061	-	
Riego 3	2	-	-	-	-	0.0378	0.2210	0.0297	0.0027	-	
	3	-	-	-	-	0.1932	0.1269	0.0136	-	-	
Suma		-	-	-	-	0.2317	0.6320	0.1067	0.0088	-	0.9791

Algodonero	1	-	-	-	-	-	0.0630	0.1945	0.0228	0.0020	
Riego 4	2	-	-	-	-	-	0.2319	0.1045	0.0101	0.0009	
	3	-	-	-	-	0.0020	0.2801	0.0500	0.0045	0.0004	
Suma		-	-	-	-	0.0020	0.5750	0.3491	0.0374	0.0032	0.9666

Algodonero	1	-	-	-	-	-	0.0002	0.2605	0.0792	0.0086	
Riego 5	2	-	-	-	-	-	0.0187	0.2359	0.0389	0.0040	
	3	-	-	-	-	-	0.1389	0.1490	0.0184	0.0018	
Suma		-	-	-	-	-	0.1577	0.6453	0.1366	0.0144	0.9540

Algodonero	1	-	-	-	-	-	-	0.0739	0.1599	0.0211	
Riego 6	2	-	-	-	-	-	0.0000	0.2072	0.0888	0.0098	
	3	-	-	-	-	-	0.0047	0.2300	0.0444	0.0046	
Suma		-	-	-	-	-	0.0047	0.5111	0.2930	0.0355	0.8444

Algodonero	1	-	-	-	-	-	-	0.0041	0.1336	0.0259	
Riego 7	2	-	-	-	-	-	-	0.0504	0.0919	0.0125	
	3	-	-	-	-	-	0.0000	0.1259	0.0513	0.0059	
Suma		-	-	-	-	-	0.0000	0.1804	0.2768	0.0443	0.5015

Algodonero	1	-	-	-	-	-	-	0.0001	0.0405	0.0271	
Riego 8	2	-	-	-	-	-	-	0.0035	0.0473	0.0168	
	3	-	-	-	-	-	-	0.0192	0.0393	0.0098	
Suma		-	-	-	-	-	-	0.0228	0.1270	0.0537	0.2035

*Obtenidos del artículo 3.

Tabla 3. Índices de riego decenales para alfalfa*

Cultivo	Decena	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Total
Alfalfa	1	0.1775	0.1235	0.0683	0.0278	0.0102	0.0036	0.0012	-	-	-	-	-	
Riego 1	2	0.1199	0.1074	0.0516	0.0200	0.0072	0.0025	0.0029	-	-	-	-	-	
	3	0.1297	0.0876	0.0382	0.0143	0.0051	0.0018	-	-	-	-	-	-	
Suma		0.4271	0.3184	0.1581	0.0620	0.0224	0.0079	0.0041	-	-	-	-	-	1.0000
Alfalfa	1	-	0.0530	0.0774	0.0700	0.0492	0.0302	0.0173	0.0095	0.0051	0.0028	0.0015	-	
Riego 2	2	0.0515	0.0648	0.0779	0.0636	0.0423	0.0252	0.0142	0.0078	0.0042	0.0022	0.0012	-	
	3	0.0394	0.0731	0.0751	0.0564	0.0359	0.0209	0.0116	0.0063	0.0034	0.0018	-	-	
Suma		0.0910	0.1909	0.2304	0.1900	0.1273	0.0763	0.0431	0.0236	0.0127	0.0068	0.0026	-	0.9947
Alfalfa	1	-	-	0.0123	0.0589	0.0873	0.0728	0.0459	0.0253	0.0130	0.0065	-	-	
Riego 3	2	-	0.0016	0.0250	0.0737	0.0860	0.0638	0.0380	0.0204	0.0103	0.0051	-	-	
	3	-	0.0047	0.0416	0.0834	0.0807	0.0546	0.0311	0.0163	0.0082	0.0041	-	-	
Suma		-	0.0063	0.0789	0.2160	0.2539	0.1913	0.1151	0.0619	0.0316	0.0157	-	-	0.9706
Alfalfa	1	-	-	-	0.0004	0.0272	0.0952	0.0952	0.0564	0.0269	0.0118	0.0050	0.0021	
Riego 4	2	-	-	-	0.0027	0.0512	0.1043	0.0830	0.0448	0.0206	0.0088	0.0037	0.0015	
	3	-	-	0.0000	0.0105	0.0763	0.1034	0.0695	0.0349	0.0156	0.0066	0.0028	-	
Suma		-	-	0.0000	0.0137	0.1546	0.3029	0.2478	0.1362	0.0631	0.0272	0.0114	0.0036	0.9604
Alfalfa	1	-	-	-	-	0.0001	0.0185	0.0953	0.1009	0.0574	0.0257	0.0105	0.0041	
Riego 5	2	-	-	-	-	0.0009	0.0423	0.1085	0.0872	0.0446	0.0191	0.0077	0.0030	
	3	-	-	-	-	0.0054	0.0710	0.1093	0.0720	0.0341	0.0142	0.0056	0.0022	
Suma		-	-	-	-	0.0064	0.1318	0.3131	0.2601	0.1361	0.0590	0.0238	0.0093	0.9395
Alfalfa	1	-	-	-	-	-	0.0002	0.0261	0.0981	0.0868	0.0445	0.0186	0.0072	
Riego 6	2	-	-	-	-	-	0.0017	0.0525	0.1039	0.0721	0.0337	0.0136	0.0052	
	3	-	-	-	-	0.0000	0.0088	0.0796	0.0988	0.0575	0.0252	0.0099	0.0038	
Suma		-	-	-	-	0.0000	0.0107	0.1581	0.3008	0.2164	0.1034	0.0422	0.0162	0.8478
Alfalfa	1	-	-	-	-	-	-	0.0036	0.0435	0.0800	0.0645	0.0363	0.0176	
Riego 7	2	-	-	-	-	-	0.0001	0.0113	0.0612	0.0791	0.0547	0.0288	0.0135	
	3	-	-	-	-	-	0.0007	0.0253	0.0741	0.0733	0.0451	0.0226	0.0104	
Suma		-	-	-	-	-	0.0008	0.0402	0.1788	0.2324	0.1643	0.0878	0.0415	0.7458
Alfalfa	1	-	-	-	-	-	-	0.0000	0.0091	0.0535	0.0625	0.0379	0.0177	
Riego 8	2	-	-	-	-	-	-	0.0004	0.0217	0.0632	0.0554	0.0300	0.0134	
	3	-	-	-	-	-	-	0.0025	0.0382	0.0658	0.0467	0.0232	0.0100	
Suma		-	-	-	-	-	-	0.0029	0.0690	0.1826	0.1645	0.0911	0.0412	0.5514
Alfalfa	1	-	-	-	-	-	-	-	0.0013	0.0219	0.0445	0.0361	0.0199	
Riego 9	2	-	-	-	-	-	-	0.0000	0.0047	0.0324	0.0443	0.0304	0.0156	
	3	-	-	-	-	-	-	0.0002	0.0118	0.0405	0.0411	0.0249	0.0121	
Suma		-	-	-	-	-	-	0.0002	0.0178	0.0948	0.1299	0.0914	0.0477	0.3818
Alfalfa	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0062	0.0244	0.0264	0.0165	
Riego 10	2	-	-	-	-	-	-	-	0.0007	0.0122	0.0275	0.0235	0.0133	
	3	-	-	-	-	-	-	-	0.0023	0.0189	0.0280	0.0200	0.0105	
Suma		-	-	-	-	-	-	-	0.0030	0.0373	0.0798	0.0699	0.0404	0.2304
Alfalfa	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0005	0.0122	0.0168	0.0086	
Riego 11	2	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0024	0.0164	0.0143	0.0063	
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0067	0.0178	0.0113	0.0045	
Suma		-	-	-	-	-	-	-	-	0.0096	0.0464	0.0424	0.0194	0.1178
Alfalfa	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0079	0.0079	0.0079	
Riego 12	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0079	0.0079	0.0079	
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0005	0.0079	0.0079	0.0079	
Suma		-	-	-	-	-	-	-	-	0.0005	0.0237	0.0237	0.0237	0.0715

*Obtenidos de memoria de cálculo anexo 2.

SALIDAS DEL PROGRAMA

Con la información de entrada se corre el programa y se obtiene la información que a continuación se presenta en las principales salidas del programa. El algoritmo básico de la solución en el programa es el uso del índice de riego decenal, ya que determina la mayoría de los términos a definir. Primeramente se calcula el volumen neto por decena, que se ejemplifica en la Tabla 4, con el cálculo para el primer riego de trigo en las tres decenas de octubre:

Tabla 4. Calculo del volumen neto, primer riego mes de octubre en trigo.

DECENA	INDICE DECENAL	SUPERFICIE FISICA	LAMINA DE RIEGO	VOLUMEN NETO MILES M ³
1ª Oct.	-	65,000.00	0.20	-
2ª Oct.	0.00013	65,000.00	0.20	16.90
3ª Oct.	0.00585	65,000.00	0.20	760.50
				777.40

Este resultado de 777.40 millares de m³, aparece en el concentrado de la Tabla 10, para el mes y decenas mencionadas y a partir de estos cálculos se reacomoda la información en forma mensual, decenal o total.

En la Tabla 5, el número de riegos es la sumatoria de los índices totales de riego, la lámina neta resulta de la multiplicación de la lámina programada por el índice y la hectáreas riego son el producto de multiplicar la superficie física por el número de riegos. Estas determinaciones hacen ver la utilidad e importancia de los índices de riego para el cálculo y programación de volúmenes para riego.

Tabla 5. Estimado de número de riego, lámina neta y hectáreas riego a partir de índices de riego.

RIEGO	ALFALFA			ALGODÓN			TRIGO		
	LAMINA PROGRAMADA m	ÍNDICE RIEGO TOTAL	LAMINA NETA m	LAMINA PROGRAMADA m	ÍNDICE RIEGO TOTAL	LAMINA NETA m	LAMINA PROGRAMADA m	ÍNDICE RIEGO TOTAL	LAMINA NETA m
1	0.22	1.0000	0.22	0.24	1.0000	0.24	0.2	1	0.20
2	0.18	0.9947	0.18	0.22	0.9863	0.22	0.19	0.98324	0.19
3	0.18	0.9706	0.17	0.21	0.9761	0.20	0.18	0.97845	0.18
4	0.18	0.9604	0.17	0.21	0.9666	0.20	0.18	0.93584	0.17
5	0.18	0.9395	0.17	0.21	0.9540	0.20	0.17	0.80206	0.14
6	0.18	0.8478	0.15	0.16	0.8444	0.14	0.15	0.37392	0.06
7	0.17	0.7458	0.13	0.16	0.5015	0.08	0.15	0.0545	0.01
8	0.17	0.5514	0.09	0.16	0.2035	0.03			
9	0.17	0.3818	0.06						
10	0.17	0.2304	0.04						
11	0.17	0.1178	0.02						
12	0.17	0.0715	0.01						
NO. RIEGOS		7.8117			6.4324			5.1280	
LAMINA NETA			1.43			1.31			0.93
SUPERFICIE FISICA HAS		20,000.00			16,000.00			65,000.00	
HAS RIEGO		156,234.00			102,918.40			333,320.65	

Algunas definiciones de términos se describen a continuación:

Has físicas	Es la superficie total a establecer del cultivo.
Has riego	Es la suma de las ocasiones que se riega cada hectárea física.
Numero de riegos	Es el total de ocasiones que se riega la superficie física total.
Volumen neto	Es el volumen que se pretende entregar o aplicar
Volumen bruto	Es el volumen requerido para poder entregar el volumen neto. Esta afectado por la eficiencia de conducción.

Tabla 6. Información resumida del cálculo del plan de riegos.

RESUMEN CEDULA - VOLUMEN									
SISTEMA : GRAVEDAD									
CULTIVOS	HECTAREAS FISICAS	HECTAREAS RIEGO	NO. DE RIEGO	VOL. BRUTO MILES M3	VOL. NETO MILES M3	L. R. B. MTS.	L. R. N. MTS.	VOL.NETO MILES LPS/24HRS.	% EF.
GRAVEDAD									
OTOÑO-INVIERNO									
TRIGO	65,000	333,058	5.12	640,552.088	597,458.810	0.99	0.92	6,915.03	93%
CARTAMO	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
CEBADA	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
RYE GRASS	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
CEBOLLIN	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
VARIOS	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
SUBTOTAL	65,000	333,058		640,552.088	597,458.810	0.99	0.92	6,915.03	
PRIMAVERA-VERANO									
ALGODONERO	16,000	102,964	6.44	230,387.319	209,201.152	1.44	1.31	2,421.31	91%
SORGO GRANO TEMP.	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
SORGO GRANO TAR	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
SORGO FORR. TEMP.	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
SORGO FORR. TAR.	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
MAIZ TEMPRANO	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
MAIZ TARDIO	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
CEBOLLIN TEMPRANO	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
CEBOLLIN TARDIO	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
VARIOS TEMPRANO	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
VARIOS TARDIOS	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
SUBTOTAL	16,000	102,964		230,387.319	209,201.152	1.44	1.31	2,421.31	91%
PERENNES									
ALFALFA	20,000	156,230	7.81	311,977.956	283,545.556	1.56	1.42	3,281.78	91%
ESPARRAGO	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
VID	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
FRUTALES	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
BERMUDA	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
VARIOS	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
SUB TOTAL	20,000	156,230		311,977.956	283,545.556	1.56	1.42	3,281.78	91%
CICLO ANTERIOR									
CULTIVOS TARDIOS	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
SUB TOTAL	-	-		-	-	-	-	-	0%
TOTAL GRAVEDAD	101,000	592,252		1,182,917.363	1,090,205.518	1.17	1.08	12,618.12	92%
				P.C. SRL	P.C. MODULOS				
GRAN TOTAL	101,000	592,252		1,182,917.363	1,090,205.518	1.17	1.08	12,618.119	92%

Tabla 7. Volumen neto y bruto decenal.

RESUMEN DE VOLUMENES BRUTOS Y NETOS POR DECENA							
Mes	Decena	GRAVEDAD (MILES M3)		POZO FEDERAL (MILES M3)		GRAVEDAD	
		Vol. Bruto	Vol. Neto			M3/SEG NETO	M3/SEG BRUTO
Octubre	1	9,298.667	7,810.880	-	-	9.040	10.762
	2	8,506.595	7,145.540	-	-	8.270	9.846
	3	9,389.452	7,887.140	-	-	8.299	9.879
	Suma	27,194.714	22,843.560	-	-	8.529	10.153
Noviembre	1	14,892.066	13,551.780	-	-	15.685	17.236
	2	27,041.341	24,607.620	-	-	28.481	31.298
	3	35,466.725	32,274.720	-	-	37.355	41.049
	Suma	77,400.132	70,434.120	-	-	27.174	29.861
Diciembre	1	34,667.582	31,547.500	-	-	36.513	40.125
	2	28,434.780	25,875.650	-	-	29.949	32.911
	3	23,896.890	21,746.170	-	-	22.881	25.144
	Suma	86,999.253	79,169.320	-	-	29.558	32.482
Enero	1	30,816.814	28,659.637	-	-	33.171	35.668
	2	42,537.493	39,559.868	-	-	45.787	49.233
	3	46,544.630	43,286.506	-	-	45.546	48.974
	Suma	119,898.937	111,506.011	-	-	41.632	44.765
Febrero	1	50,526.865	47,495.253	-	-	54.971	58.480
	2	55,559.864	52,226.272	-	-	60.447	64.305
	3	44,369.579	41,707.404	-	-	60.341	64.192
	Suma	150,456.307	141,428.929	-	-	58.461	62.193
Marzo	1	59,934.765	56,338.679	-	-	65.207	69.369
	2	64,227.771	60,374.105	-	-	69.877	74.338
	3	70,054.802	65,851.514	-	-	69.288	73.711
	Suma	194,217.338	182,564.298	-	-	68.162	72.512
Abril	1	70,877.701	66,625.039	-	-	77.112	82.034
	2	57,353.840	53,912.610	-	-	62.399	66.382
	3	43,634.044	41,016.001	-	-	47.472	50.502
	Suma	171,865.585	161,553.650	-	-	62.328	66.306
Mayo	1	35,915.953	33,760.996	-	-	39.075	41.569
	2	31,137.037	29,268.815	-	-	33.876	36.038
	3	31,289.855	29,412.464	-	-	30.947	32.923
	Suma	98,342.845	92,442.275	-	-	34.514	36.717
Junio	1	30,897.409	28,425.616	-	-	32.900	35.761
	2	33,019.348	30,377.800	-	-	35.159	38.217
	3	34,101.491	31,373.372	-	-	36.312	39.469
	Suma	98,018.248	90,176.788	-	-	34.790	37.816
Julio	1	33,844.048	30,798.084	-	-	35.646	39.171
	2	31,887.873	29,017.964	-	-	33.586	36.907
	3	27,655.521	25,166.524	-	-	26.480	29.099
	Suma	93,387.442	84,982.572	-	-	31.729	34.867
Agosto	1	23,240.976	19,057.600	-	-	22.057	26.899
	2	15,981.000	13,104.420	-	-	15.167	18.497
	3	10,515.342	8,622.580	-	-	9.073	11.064
	Suma	49,737.317	40,784.600	-	-	15.227	18.570
Septiembre	1	7,163.735	5,730.988	-	-	6.633	8.291
	2	4,869.625	3,895.700	-	-	4.509	5.636
	3	3,365.885	2,692.708	-	-	3.117	3.896
	Suma	15,399.245	12,319.396	-	-	4.753	5.941
Total	1,182,917.363	1,090,205.518	-	-	34.570	37.510	
Eficiencia Promedio		92%		0%		0%	

En la Tabla 7, la información se presenta en volumen bruto y neto que se requiere por decena y mensualmente y se expresa en millares de metros cúbicos y como lámina de

riego. Esta es la información principal que se pretende con el cálculo del plan de riego, ya que indica cantidad y tiempo en que se requiere en base a los requerimientos de los cultivos. En la Tabla 8, se especifican los requerimientos diarios expresados en litros por segundo en 24 horas.

Tabla 8. Gasto requerido diario.

MES:	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO
(VOL. MM ³)	27,194.714	77,400.132	86,999.253	119,898.937	150,456.307	194,217.338
(L.P.S.)	314,749	895,830	1,006,944	1,387,724	1,741,386	2,247,891
DIA	LITROS POR SEGUNDO EN 24HRS.					
1	10,762	17,236	40,125	35,668	58,480	69,369
2	10,762	17,236	40,125	35,668	58,480	69,369
3	10,762	17,236	40,125	35,668	58,480	69,369
4	10,762	17,236	40,125	35,668	58,480	69,369
5	10,762	17,236	40,125	35,668	58,480	69,369
6	10,762	17,236	40,125	35,668	58,480	69,369
7	10,762	17,236	40,125	35,668	58,480	69,369
8	10,762	17,236	40,125	35,668	58,480	69,369
9	10,762	17,236	40,125	35,668	58,480	69,369
10	10,762	17,236	40,125	35,668	58,480	69,369
SUB-TOTAL	107,620	172,360	401,250	356,680	584,800	693,690
11	9,846	31,298	32,911	49,233	64,305	74,338
12	9,846	31,298	32,911	49,233	64,305	74,338
13	9,846	31,298	32,911	49,233	64,305	74,338
14	9,846	31,298	32,911	49,233	64,305	74,338
15	9,846	31,298	32,911	49,233	64,305	74,338
16	9,846	31,298	32,911	49,233	64,305	74,338
17	9,846	31,298	32,911	49,233	64,305	74,338
18	9,846	31,298	32,911	49,233	64,305	74,338
19	9,846	31,298	32,911	49,233	64,305	74,338
20	9,846	31,298	32,911	49,233	64,305	74,338
SUB-TOTAL	98,460	312,980	329,110	492,330	643,050	743,380
21	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
22	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
23	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
24	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
25	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
26	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
27	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
28	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
29	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
30	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
31	9,879	41,049	25,144	48,974	64,192	73,711
SUB-TOTAL	108,669	410,490	276,584	538,714	513,536	810,821
TOTAL	314,749	895,830	1,006,944	1,387,724	1,741,386	2,247,891

MES:	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE
(VOL. MM ³)	171,865.585	98,342.845	98,018.248	93,387.442	49,737.317	15,399.245
(L.P.S.)	1,989,180	1,138,223	1,134,470	1,080,869	575,664	178,230
DIA	LITROS POR SEGUNDO EN 24HRS.					
1	82,034	41,569	35,761	39,171	26,899	8,291
2	82,034	41,569	35,761	39,171	26,899	8,291
3	82,034	41,569	35,761	39,171	26,899	8,291
4	82,034	41,569	35,761	39,171	26,899	8,291
5	82,034	41,569	35,761	39,171	26,899	8,291
6	82,034	41,569	35,761	39,171	26,899	8,291
7	82,034	41,569	35,761	39,171	26,899	8,291
8	82,034	41,569	35,761	39,171	26,899	8,291
9	82,034	41,569	35,761	39,171	26,899	8,291
10	82,034	41,569	35,761	39,171	26,899	8,291
SUB-TOTAL	820,340	415,690	357,610	391,710	268,990	82,910
11	66,382	36,038	38,217	36,907	18,497	5,636
12	66,382	36,038	38,217	36,907	18,497	5,636
13	66,382	36,038	38,217	36,907	18,497	5,636
14	66,382	36,038	38,217	36,907	18,497	5,636
15	66,382	36,038	38,217	36,907	18,497	5,636
16	66,382	36,038	38,217	36,907	18,497	5,636
17	66,382	36,038	38,217	36,907	18,497	5,636
18	66,382	36,038	38,217	36,907	18,497	5,636
19	66,382	36,038	38,217	36,907	18,497	5,636
20	66,382	36,038	38,217	36,907	18,497	5,636
SUB-TOTAL	663,820	360,380	382,170	369,070	184,970	56,360
21	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
22	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
23	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
24	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
25	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
26	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
27	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
28	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
29	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
30	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
31	50,502	32,923	39,469	29,099	11,064	3,896
SUB-TOTAL	505,020	362,153	394,690	320,089	121,704	38,960
TOTAL	1,989,180	1,138,223	1,134,470	1,080,869	575,664	178,230

GASTO ANUAL REQUERIDO (MM³): 1,182,917.363
 GASTO ANUAL REQUERIDO (L.P.S.): 13,691,173

La información de la Tabla 9, muestra que en trigo el mes con más intensidad de requerimiento de riego es el mes de marzo, ya que un índice de 1.2658 significa el riego de 82,277 has riego (65,000 * 1.2658) ya que la superficie física programada es de

65,000 ha. El algodón, el mes con más demanda es julio con índice mensual de riego de 1.8543 y para alfalfa el mes de mayo con 1.0512.

Tabla 9. Concentrado índices de riego mensuales en trigo, algodón y alfalfa.

Cultivo	Dec	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Total
Trigo	1	-	0.0478	0.1947	0.1729	0.2954	0.3760	0.4930	0.1327	-	-	-	-	
	2	0.0001	0.1346	0.1531	0.2517	0.3338	0.4153	0.3789	0.0679	-	-	-	-	
	3	0.0059	0.1971	0.1230	0.2683	0.3349	0.4745	0.2375	0.0350	-	-	-	-	
Suma		0.0060	0.3794	0.4708	0.6928	0.9641	1.2658	1.1094	0.2356	-	-	-	-	5.1240

Cultivo	Dec	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Total
Algodonero	1	-	-	-	0.0261	0.1377	0.1081	0.0442	0.2132	0.4727	0.6180	0.4452	0.0847	
	2	-	-	-	0.0600	0.1445	0.0834	0.0431	0.2774	0.5460	0.6426	0.2797	0.0439	
	3	-	-	-	0.1061	0.1313	0.0615	0.1091	0.3861	0.5968	0.5937	0.1579	0.0225	
Suma		-	-	-	0.1922	0.4134	0.2529	0.1964	0.8767	1.6154	1.8543	0.8828	0.1511	6.4353

Cultivo	Dec	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Total
Alfalfa	1	0.1775	0.1765	0.1580	0.1571	0.1739	0.2205	0.2847	0.3439	0.3515	0.3071	0.1969	0.1015	
	2	0.1714	0.1737	0.1545	0.1599	0.1875	0.2399	0.3109	0.3524	0.3412	0.2752	0.1611	0.0798	
	3	0.1691	0.1654	0.1549	0.1646	0.2033	0.2612	0.3292	0.3549	0.3244	0.2384	0.1283	0.0614	
Suma		0.5180	0.5156	0.4674	0.4817	0.5646	0.7216	0.9247	1.0512	1.0170	0.8207	0.4862	0.2428	7.8115

Con la información de la Tabla 10, la sumatoria de volumen por mes, muestra que el mes con mayor requerimiento de volumen considerados los tres cultivos, es el mes de marzo con 182,564.298 millares de metros cúbicos.

Tabla 10. Concentrado de volumen neto mensual en los cultivos de trigo, algodón y alfalfa.

(Trigo y algodón página 73 y alfalfa página 74)

Cultivo	Dec	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Total
Trigo	1	-	6,210.100	25,312.300	21,778.965	35,867.845	44,219.175	54,677.383	13,935.708	-	-	-	-	
	2	16,900	17,496.700	19,901.050	31,338.060	39,871.520	48,517.885	41,105.090	7,022.795	-	-	-	-	
	3	760.500	25,620.400	15,866.370	33,169.890	31,789.420	54,075.190	25,314.705	3,590.860	-	-	-	-	
Suma		777.400	49,327.200	61,079.720	86,286.915	107,528.785	146,812.250	121,097.178	24,549.363	-	-	-	-	597,458.810

Algodonero	1	2	3	Suma
	-	-	-	-
	1,001.472	2,304.768	4,075.776	7,382.016
	5,286.528	5,548.032	4,032.000	14,866.560
	4,151.424	3,200.640	2,360.064	9,712.128
	1,696.896	1,616.480	3,907.136	7,220.512
	7,551.008	9,735.920	13,299.984	30,586.912
	16,096.336	18,474.080	20,107.808	54,678.224
	20,174.032	19,522.432	16,957.312	56,653.776
	12,293.488	7,575.408	4,224.848	24,093.744
	2,251.616	1,163.088	592.576	4,007.280
				209,201.152

Alfalfa	1	7,810.880	7,341.680	6,235.200	5,879.200	6,340.880	7,968.080	10,250.760	12,274.280	12,329.280	10,624.052	6,764.112	3,479.372	
	2	7,128.640	7,110.920	5,974.600	5,917.040	6,806.720	8,655.580	11,191.040	12,510.100	11,903.720	9,495.532	5,529.012	2,732.612	
	3	7,126.640	6,654.320	5,879.800	6,040.840	5,885.984	9,416.260	11,794.160	12,521.620	11,265.564	8,209.212	4,397.732	2,100.132	
Suma		22,066.160	21,106.920	18,089.600	17,837.080	19,033.584	26,039.920	33,235.960	37,306.000	35,498.564	28,328.796	16,690.856	8,312.116	283,545.556

Suma Decena	1	7,810.880	13,551.780	31,547.500	28,659.637	47,495.253	56,338.679	66,625.039	33,760.996	28,425.616	30,798.084	19,057.600	5,730.988	
Suma Decena	2	7,145.540	24,607.620	25,875.650	39,559.868	52,226.272	60,374.105	53,912.610	29,268.815	30,377.800	29,017.964	13,104.420	3,895.700	
Suma Decena	3	7,887.140	32,274.720	21,746.170	43,286.506	41,707.404	65,851.514	41,016.001	29,412.464	31,373.372	25,166.524	8,622.580	2,692.708	
Total		22,843.560	70,434.120	79,169.320	111,506.011	141,428.929	182,564.298	161,553.650	92,442.275	90,176.788	84,982.572	40,784.600	12,319.396	1,090,205.518

Otra salida importante es el graficado de la superficie por regar, expresada en % de avance o índice de riego acumulado, que se muestra en las Figuras 1, 2 y 3. Esta información permite comparar el programa con lo realmente ejecutado al transcurrir el ciclo.

Diagrama Básico del Cultivo Trigo

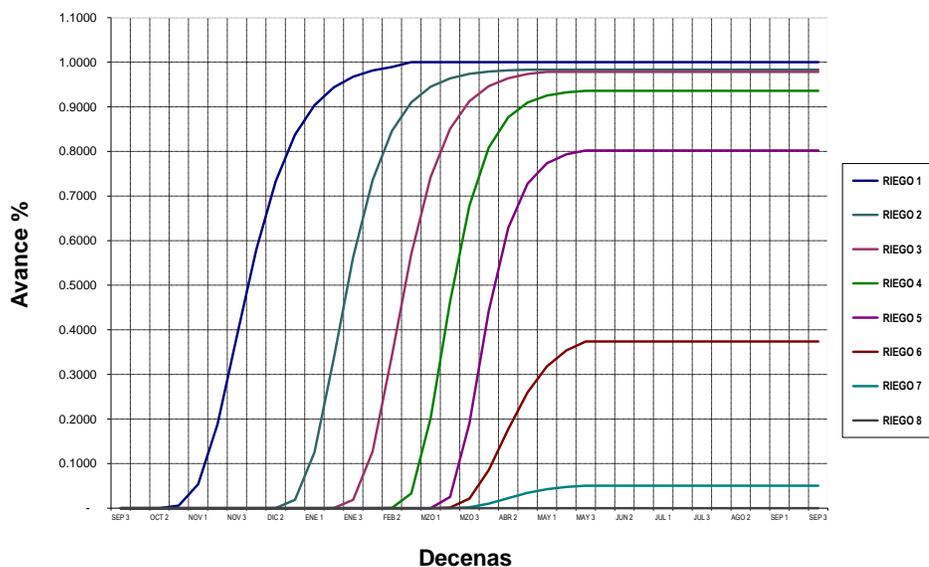


Figura 1. Índices de riego acumulados en trigo

Diagrama Básico del Cultivo Algodonero

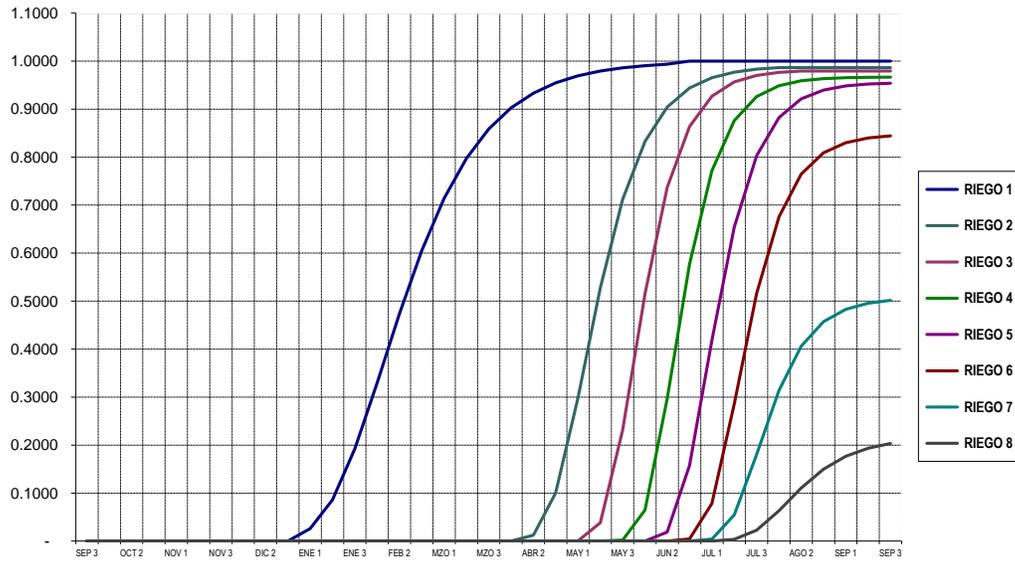


Figura 2. Índices de riego acumulados en algodónero

Diagrama Básico del Cultivo Alfalfa

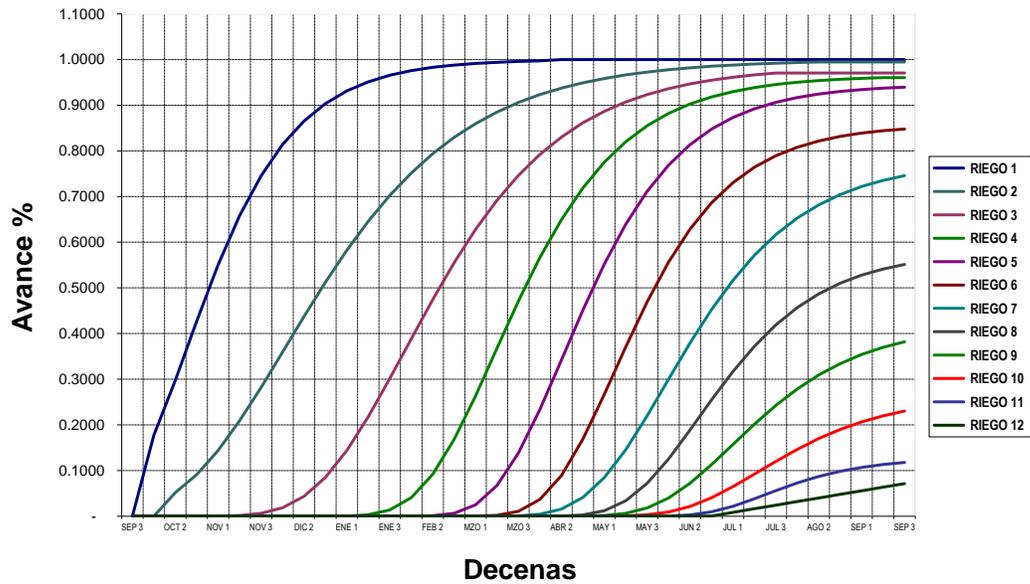


Figura 3. Índices de riego acumulados en alfalfa

CONCLUSIONES DEL CÁLCULO

El cálculo de plan de riegos con la metodología de índices de riego permite definir la proporción del volumen requerido en el tiempo para el riego óptimo de los cultivos. El resultado y utilidad que este u otro programa de cálculo de plan de riegos depende de la veracidad de la información que se le proporcione para su proceso, por lo que los registros estadísticos de manejo del distrito de riego son esenciales para obtener resultados satisfactorios. Para efecto de índices de riego, la utilización de los obtenidos con modelos logísticos de crecimiento, son estadísticamente confiables para uso en predicción de volúmenes a programar, ya que así fue demostrado en los estudios de esta investigación.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO

De los modelos logísticos de crecimiento (Gompertz, Verhulst y Beta) estudiados en esta tesis; el de Gompertz permitió modelar adecuadamente la superficie regada acumulada expresada como índices de riego en los cultivos de trigo, algodón y alfalfa. En los estudios realizados también se comprobó que la utilización de índices de riego se puede emplear como una técnica para determinación de la evapotranspiración global de los cultivos. En cuanto a la aplicación de los índices de riego obtenidos en el estudio para el cálculo del plan de riegos se demostró su utilidad práctica para el cálculo de volumen a utilizar en el tiempo en los cultivos estudiados. Lo anterior se afirma en base a que los parámetros de los modelos fueron obtenidos con programas de cómputo especializados para regresiones no lineales y en su análisis superaron las restricciones estadísticas a que fueron sometidos como son análisis de varianza, análisis del residual, pruebas de bondad de ajuste, análisis de regresión y comprobación de supuestos del modelo.

ANEXOS

ANEXO 1. Memoria de cálculo para la generación de índices de riego en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) con la función Gompertz de crecimiento, en los valles de Mexicali y San Luis.

INTRODUCCIÓN

Con la metodología ensayada y probada en los estudios realizados con trigo (artículo 1 y 2) y algodón (artículo 3), en donde se simuló la superficie regada acumulada con modelos logísticos de crecimiento para la obtención de índices de riego decenales y acumulados, se procede a la obtención de índices de riego para el cultivo de trigo.

La información analizada en estos estudios fue la superficie regada acumulada del cultivo de trigo, establecida en los valles de Mexicali y San Luis, referente a los ciclos agrícolas 2008-2009, 2010-2011, 2011-2012 y 2012- 2013, en el sistema de agua de gravedad.

MODELO UTILIZADO.

Al graficar la información de la superficie regada acumulada se obtienen curvas de tipo sigmoide. El análisis de este comportamiento de las curvas de riego es la parte central del estudio, que consistió en obtener modelos de predicción de la superficie regada acumulada en cada riego, analizándose con el modelo de Gompertz. La razón de seleccionar este modelo, es que en los estudios previos fue el que mejor explicó el comportamiento de superficie regada acumulada.

$$\text{Función Gompertz: } y = y_{\max} e^{-e^{-k(t-t_i)}}$$

Dónde: (y) Variable dependiente; (y_{\max}) Valor máximo de y; (k) Constante de curvatura del modelo; (t) Tiempo (variable independiente); (t_i) Tiempo de inflexión y (e) Número de Euler. El valor de los parámetros **k** y **t_i** obtenidos se muestran en la Tabla 2.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La característica de estas funciones es que gráficamente describen una curva sigmoide (en forma de S), que en términos de crecimiento en relación al tiempo, inicia con una tasa baja, luego se incrementa a un máximo en el punto de inflexión para posteriormente decrecer al mínimo o suspender su crecimiento en la asíntota superior. El objetivo principal en el análisis del modelo es la obtención de sus parámetros y que estos sean precisos y confiables, para lo cual se acudió a software especializado para regresiones no lineales, usando los procedimientos NLIN de SAS 9.2 alimentándolo con los datos de índice de riego acumulados obtenidos de la superficie regada acumulada. El procedimiento genera los valores asintóticos de los parámetros, su estimación de límites de confianza, error estándar, grado de asimetría, correlación entre parámetros, coeficiente de determinación y un análisis de varianza para el modelo. Adicionalmente se realizó un análisis del residual para comprobar los supuestos de normalidad e independencia de los errores para lo cual se realizaron las prueba de Shapiro-Wilk y las rachas (run test).

INFORMACIÓN ANALIZADA

La información disponible para el análisis fue la superficie regada acumulada de cuatro ciclos agrícolas y de siete riegos en cada uno. Esta información se presenta en la Tabla 1, expresada como índice de riego y los datos que se emplearon en las corridas del modelo fueron los promedios de índice de riego acumulado. Este se obtiene de dividir la superficie de riego acumulada a una decena determinada entre la superficie física total establecida en cada ciclo.

Tabla 1. Índices de riego acumulados promedio utilizados para el análisis de regresión.

DECENA	RIEGO 1	RIEGO 2	RIEGO 3	RIEGO 4	RIEGO 5	RIEGO 6	RIEGO 7
1ª Oct.	0.0011						
2ª Oct.	0.0043						
3ª Oct.	0.0214						
1ª Nov.	0.0662	0.0005					
2ª Nov.	0.1850	0.0010					
3ª Nov.	0.3816	0.0025					
1ª Dic.	0.5783	0.0068					
2ª Dic.	0.7345	0.0189					
3ª Dic.	0.8306	0.0449	0.0006				
1ª Ene.	0.9040	0.1295	0.0012				
2ª Ene.	0.9526	0.3276	0.0069	0.0004			
3ª Ene.	0.9791	0.5622	0.0372	0.0006			
1ª Feb.	0.9905	0.7285	0.1436	0.0036			
2ª Feb.	0.9975	0.8501	0.3448	0.0186	0.0005		
3ª Feb.	1.0000	0.9161	0.5369	0.0633	0.0015		
1ª Mzo.		0.9588	0.7362	0.2090	0.0116	0.0004	
2ª Mzo.		0.9749	0.8691	0.4401	0.0593	0.0028	0.0002
3ª Mzo.		0.9814	0.9412	0.6690	0.1931	0.0190	0.0009
1ª Abr.		0.9839	0.9651	0.8212	0.4149	0.0768	0.0084
2ª Abr.		0.9849	0.9737	0.9022	0.6329	0.1797	0.0245
3ª Abr.		0.9799	0.9791	0.9322	0.7585	0.2843	0.0364
1ª May.			0.9837	0.9377	0.7871	0.3095	0.0423
2ª May.				0.9375	0.7915	0.3124	0.0442
3ª May.				0.9387	0.8082	0.3979	0.0455

PARÁMETROS DEL MODELO

Derivado del análisis de regresión con el procedimiento NLIN de SAS, se obtuvieron los parámetros y sus principales indicadores estadísticos, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen del análisis de regresión de los riegos en trigo.

riego	PARAMETRO K			PARAMETRO t inf.			ANDEVA DEL MODELO	SHAPIRO- WILK	PRUEBA DE LAS RACHAS		R ²
	ESTIMADO	Ê 95 % (±)	ASIMETRIA g1	ESTIMADO	Ê 95 % (±)	ASIMETRIA g1	Valor p	Valor p	r	rt	Kvalseth
RIEGO 1	0.5602	0.0187	0.0962	5.9149	0.0505	-0.0074	<.0001	0.8225	5	3	0.9997
RIEGO 2	0.6516	0.029	0.0942	11.1092	0.0578	-0.0101	<.0001	0.4861	4	3	0.9996
RIEGO 3	0.6606	0.0504	0.1567	14.0815	0.0978	-0.0169	<.0001	0.0736	3	2	0.9988
RIEGO 4	0.7778	0.11615	0.1802	16.5534	0.0941	-0.0192	<.0001	0.8549	3	2	0.9989
RIEGO 5	0.8742	0.07395	0.1885	18.4217	0.08145	-0.0213	<.0001	0.4181	Z =1.13	Z=1.96	0.9934
RIEGO 6	0.6415	0.1637	0.4407	19.6698	0.3259	-0.0508	<.0001	0.1848	5	2	0.9843
RIEGO 7	0.6561	0.1507	0.424	19.7701	0.27635	-0.0526	<.0001	0.1002	16	8	0.9157
Recomendable			<0.25			<0.25		>0.05	r>rt	Z> Z	>0.70

Los índices de riego acumulados, se generan al estimarlos con los modelos obtenidos y se presentan en la Tabla 3 y Figura 1.

Tabla 3. Índices de riego acumulados estimados con los modelos.

DECENA	RIEGO 1	RIEGO 2	RIEGO 3	RIEGO 4	RIEGO 5	RIEGO 6	RIEGO 7
OCT 1	-						
OCT 2	0.00013						
OCT 3	0.00598						
NOV 1	0.05375						
NOV 2	0.18834						
NOV 3	0.38542						
DIC 1	0.58013	-					
DIC 2	0.73274	0.00050					
DIC 3	0.83729	0.01892					
ENE 1	0.90356	0.12551	-				
ENE 2	0.94373	0.33653	0.00047				
ENE 3	0.96746	0.56273	0.01884				
FEB 1	0.98129	0.73564	0.12752	-			
FEB 2	0.98927	0.84590	0.34241	0.00064			
FEB 3	1.00000	0.90977	0.57032	0.03302	-	-	
MAR 1		0.94495	0.74229	0.20166	0.00020	0.00001	-
MAR 2		0.96383	0.85054	0.46310	0.02527	0.00156	0.00011
MAR 3		0.97381	0.91250	0.67850	0.19039	0.02148	0.00220
ABR 1		0.97906	0.94626	0.80865	0.44214	0.08558	0.01024
ABR 2		0.98180	0.96418	0.87654	0.62838	0.17717	0.02272
ABR 3		0.98324	0.97357	0.90961	0.72765	0.25988	0.03437
MAY 1			0.97845	0.92522	0.77356	0.31796	0.04260
MAY 2				0.93248	0.79356	0.35359	0.04762
MAY 3				0.93584	0.80206	0.37392	0.05045
	1.00000	0.98324	0.97845	0.93584	0.80206	0.37392	0.05045

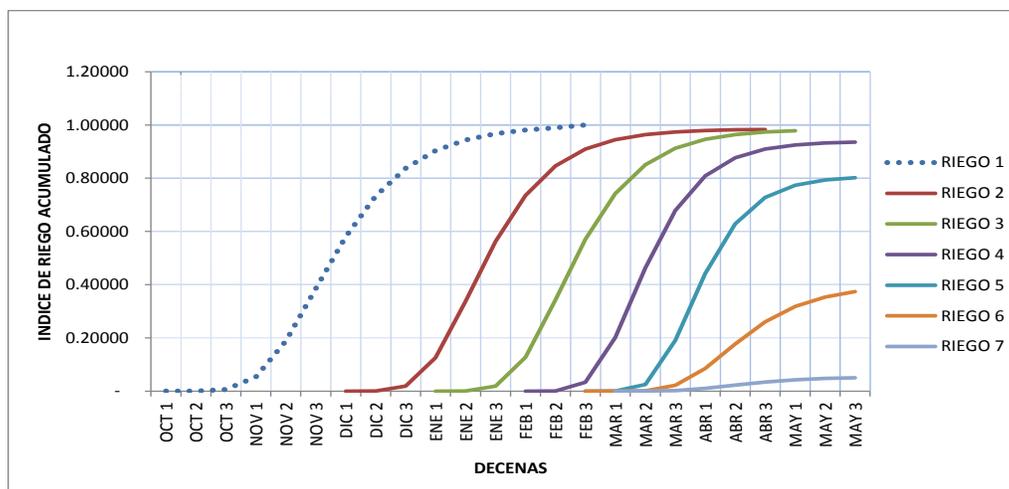


Figura 1. Índices de riego acumulados en trigo

GENERACIÓN DE ÍNDICES DE RIEGO DECENALES.

Los índices de riego decenales, son la diferencia entre dos índices acumulados consecutivos y nos indica que proporción de la superficie física total se riega en una decena determinada. Los índices de riego decenales calculados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Índices de riego decenales calculados en trigo.

DECENA	RIEGO 1	RIEGO 2	RIEGO 3	RIEGO 4	RIEGO 5	RIEGO 6	RIEGO 7	TOTAL
OCT 1	-							-
OCT 2	0.00013							0.00013
OCT 3	0.00585							0.00585
NOV 1	0.04777							0.04777
NOV 2	0.13459							0.13459
NOV 3	0.19708							0.19708
DIC 1	0.19471							0.19471
DIC 2	0.15261	0.00050						0.15311
DIC 3	0.10455	0.01842						0.12297
ENE 1	0.06627	0.10659	-					0.17286
ENE 2	0.04017	0.21102	0.00047					0.25166
ENE 3	0.02373	0.22620	0.01837					0.26830
FEB 1	0.01383	0.17291	0.10868	-				0.29542
FEB 2	0.00798	0.11026	0.21489	0.00064				0.33377
FEB 3	0.01073	0.06387	0.22791	0.03238	-	-		0.33489
MAR 1		0.03518	0.17197	0.16864	0.00020	0.00001	-	0.37600
MAR 2		0.01888	0.10825	0.26144	0.02507	0.00155	0.00011	0.41530
MAR 3		0.00998	0.06196	0.21540	0.16512	0.01992	0.00209	0.47447
ABR 1		0.00525	0.03376	0.13015	0.25175	0.06410	0.00804	0.49305
ABR 2		0.00274	0.01792	0.06789	0.18624	0.09159	0.01249	0.37887
ABR 3		0.00144	0.00939	0.03307	0.09927	0.08271	0.01165	0.23753
MAY 1			0.00488	0.01561	0.04591	0.05808	0.00823	0.13271
MAY 2				0.00726	0.02000	0.03563	0.00502	0.06791
MAY 3				0.00336	0.00850	0.02033	0.00283	0.03502
	1.00000	0.98324	0.97845	0.93584	0.80206	0.37392	0.05045	5.1240

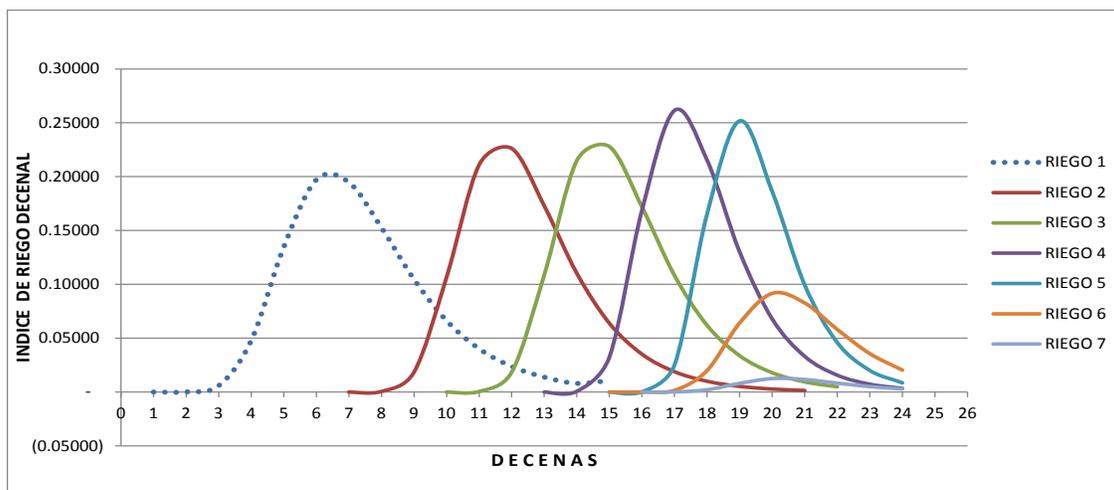


Figura 2. Índices de riego decenales en trigo

CONCLUSIONES

Se logra la obtención de índices de riego acumulados en trigo así como el cálculo de los índices de riego decenales, cumpliendo con las restricciones estadísticas necesarias para considerar que los modelos permiten ser utilizados con fines de predicción y elaboración de planes de riego de manera confiable.

ANEXO 2. Memoria de cálculo para la generación de índices de riego en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) con la función Gompertz de crecimiento, en los valles de Mexicali y San Luis.

INTRODUCCIÓN

Con la metodología ensayada y probada en los estudios realizados con trigo y algodón, en donde se simuló la superficie regada acumulada con modelos logísticos de crecimiento para la obtención de índices de riego decenales y acumulados, se procede a la obtención de índices de riego para el cultivo de alfalfa.

La información analizada en estos estudios fue la superficie regada acumulada del cultivo de alfalfa, establecida en los valles de Mexicali y San Luis, referente a los ciclos agrícolas 2008-2009, 2010-2011, 2011-2012 y 2012- 2013, en el sistema de agua de gravedad.

MODELO UTILIZADO.

Al graficar la información de la superficie regada acumulada se obtienen curvas de tipo sigmoide. El análisis de este comportamiento de las curvas de riego es la parte central del estudio, que consistió en obtener modelos de predicción de la superficie regada acumulada en cada riego, analizándose con el siguiente modelo:

$$\text{Función Gompertz: } y = y_{\max} e^{-e^{-k(t-t_i)}}$$

Dónde: (y) Variable dependiente; (y_{\max}) Valor máximo de y; (k) Constante de curvatura del modelo; (t) Tiempo (variable independiente); (t_i) Tiempo de inflexión y (e) Número de Euler. Los valores de los parámetros **k** y **t_i** obtenidos se muestran en la tabla 1.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La característica de estas funciones es que gráficamente describen una curva sigmoide (en forma de S), que en términos de crecimiento en relación al tiempo, inicia con una tasa baja, luego se incrementa a un máximo en el punto de inflexión para posteriormente decrecer al mínimo o suspender su crecimiento en la asíntota superior. El objetivo principal en el análisis del modelo es la obtención de sus parámetros y que estos sean precisos y confiables, para lo cual se acudió a software especializado para regresiones no lineales, usando los procedimientos NLIN de SAS 9.2 alimentándolo con los datos de índice de riego acumulados obtenidos de la superficie regada acumulada. El procedimiento genera los valores asintóticos de los parámetros, su estimación de límites de confianza, error estándar, grado de asimetría, correlación entre parámetros, coeficiente de determinación y un análisis de varianza para el modelo. Adicionalmente se realizó un análisis del residual para comprobar los supuestos de normalidad e independencia de los errores para lo cual se realizaron las prueba de Shapiro-Wilk y las rachas (run test).

INFORMACIÓN ANALIZADA

La información analizada proviene de la superficie regada acumulada de cuatro ciclos agrícolas de alfalfa y de trece riegos en cada ciclo. Esta información se presenta en las Tabla 4, 5 y 6, expresada como índices de riego acumulado. El dato de índice de riego acumulado se obtiene de dividir la superficie de riego acumulada de una decena determinada entre la superficie física total establecida en cada ciclo.

PARÁMETROS DEL MODELO

Derivado del análisis de regresión con el procedimiento NLIN de SAS se obtuvieron los parámetros y sus principales indicadores estadísticos. Los riegos del 1 al 11 se ajustaron a modelos de la función Gompertz, mientras que los riegos 12 y 13 se ajustaron a una regresión lineal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros e indicadores estadísticos de los modelos en alfalfa.

MODELOS NO LINEALES

RIEGO	PARAMETRO K			PARAMETRO t inf.			ANDEVA DEL MODELO	SHAPIRO- WILK	RACHAS Zt= 1.96	R ²
	ESTIMADO	Ê 95 % (±)	ASIMETRIA g1	ESTIMADO	Ê 95 % (±)	ASIMETRIA g1	Pr>F	Pr<DW, (α=0.05)	VALOR Z	Kvalseth
RIEGO 1	0.3545	0.0269	0.1270	2.5441	0.1779	(0.0755)	<.0001	0.0003	0.4300	0.9708
RIEGO 2	0.2128	0.0083	0.0755	7.1090	0.1530	(0.0173)	<.0001	0.0014	0.1400	0.9890
RIEGO 3	0.2418	0.0084	0.0739	12.7041	0.1190	(0.0083)	<.0001	0.0007	0.1100	0.9946
RIEGO 4	0.2968	0.0112	0.0840	16.8784	0.1072	(0.0091)	<.0001	0.0260	0.3500	0.9957
RIEGO 5	0.3186	0.0116	0.0813	20.0524	0.0968	(0.0088)	<.0001	0.0654	0.3100	0.9959
RIEGO 6	0.3310	0.0141	0.0933	22.4673	0.1082	(0.0102)	<.0001	0.7938	0.0000	0.9946
RIEGO 7	0.2816	0.0110	0.0808	24.8332	0.1142	(0.0093)	<.0001	0.0723	0.0700	0.9937
RIEGO 8	0.3099	0.0195	0.1283	26.3740	0.1651	(0.0147)	<.0001	0.1080	0.1300	0.9868
RIEGO 9	0.2914	0.0205	0.1318	27.9386	0.1866	(0.0155)	<.0001	0.2041	0.0200	0.9811
RIEGO 10	0.2892	0.0385	0.2015	29.1877	0.2947	(0.0232)	<.0001	0.0134	0.1000	0.9460
RIEGO 11	0.3807	0.0565	0.2795	29.5018	0.3063	(0.0339)	<.0001	0.0264	0.1600	0.9365
Recombable			<0.25			<0.25		>0.05	Zt> Z	>0.70

MODELOS LINEALES

RIEGO	PARAMETRO DEL INTERCEPTO			PARAMETRO DE LA PENDIENTE			ANDEVA DEL MODELO	SHAPIRO- WILK	DURBIN - WATSON	TOTAL
	ESTIMADO	ERROR STDR	Pr> t	ESTIMADO	ERROR STDR	Pr> t	Pr>F	Pr<W (α=0.05)	Pr<DW, (α=0.05)	R ²
RIEGO 12	(0.0213)	0.0134	<.0001	0.0079	0.0004	<.0001	<.0001	0.3568	0.9996	0.9096
RIEGO 13	(0.1375)	0.0131	<.0001	0.0049	0.0004	<.0001	<.0001	0.9615	0.9818	0.8624
Recomendable								>0.05	>0.05	>0.70

GENERACIÓN DE ÍNDICES DE RIEGO ACUMULADOS

Los índices de riego acumulados, se generan al estimarlos con los modelos obtenidos y se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Índices de riego acumulados generados con los modelos en alfalfa.

DECENA	RIEGO 1	RIEGO 2	RIEGO 3	RIEGO 4	RIEGO 5	RIEGO 6	RIEGO 7	RIEGO 8	RIEGO 9	RIEGO 10	RIEGO 11	RIEGO 12	RIEGO 13	
OCT-1	1	0.1775	-											
OCT-2	2	0.2974	0.0515											
OCT-3	3	0.4271	0.0910											
NOV-1	4	0.5506	0.1440	-										
NOV-2	5	0.6579	0.2087	0.0016										
NOV-3	6	0.7455	0.2818	0.0063										
DIC-1	7	0.8138	0.3592	0.0186	-									
DIC-2	8	0.8654	0.4371	0.0436	-									
DIC-3	9	0.9036	0.5122	0.0852	0.0000									
ENE-1	10	0.9313	0.5822	0.1441	0.0004									
ENE-2	11	0.9513	0.6458	0.2177	0.0032									
ENE-3	12	0.9656	0.7022	0.3011	0.0137	-								
FEB-1	13	0.9757	0.7514	0.3885	0.0409	0.0001								
FEB-2	14	0.9829	0.7937	0.4744	0.0920	0.0010	-							
FEB-3	15	0.9880	0.8296	0.5551	0.1683	0.0064	0.0000							
MAR-1	16	0.9916	0.8598	0.6279	0.2635	0.0249	0.0002	-						
MAR-2	17	0.9941	0.8850	0.6917	0.3677	0.0672	0.0019	0.0001						
MAR-3	18	0.9958	0.9059	0.7464	0.4711	0.1382	0.0107	0.0008	-					
ABR-1	19	0.9971	0.9232	0.7923	0.5663	0.2335	0.0367	0.0044	0.0000	-				
ABR-2	20	0.9980	0.9374	0.8303	0.6494	0.3420	0.0892	0.0158	0.0004	0.0000				
ABR-3	21		0.9490	0.8614	0.7189	0.4513	0.1688	0.0410	0.0029	0.0002				
MAY-1	22		0.9585	0.8867	0.7753	0.5522	0.2669	0.0845	0.0120	0.0015	-			
MAY-2	23		0.9663	0.9070	0.8201	0.6395	0.3708	0.1457	0.0337	0.0062	0.0007			
MAY-3	24		0.9726	0.9233	0.8551	0.7115	0.4696	0.2199	0.0719	0.0180	0.0030	-		
JUN-1	25		0.9777	0.9364	0.8820	0.7688	0.5565	0.2999	0.1255	0.0399	0.0092	0.0005		
JUN-2	26		0.9819	0.9467	0.9026	0.8134	0.6286	0.3790	0.1887	0.0723	0.0215	0.0029	-	
JUN-3	27		0.9853	0.9549	0.9181	0.8475	0.6861	0.4523	0.2545	0.1128	0.0403	0.0096	0.0005	
JUL-1	28		0.9880	0.9614	0.9299	0.8732	0.7306	0.5168	0.3170	0.1573	0.0647	0.0218	0.0084	-
JUL-2	29		0.9903	0.9665	0.9388	0.8923	0.7643	0.5715	0.3724	0.2016	0.0922	0.0382	0.0163	0.0032
JUL-3	30		0.9921	0.9706	0.9454	0.9065	0.7895	0.6165	0.4191	0.2427	0.1201	0.0560	0.0241	0.0080
AGO-1	31		0.9935		0.9503	0.9169	0.8081	0.6529	0.4570	0.2788	0.1465	0.0728	0.0320	0.0129
AGO-2	32		0.9947		0.9540	0.9246	0.8217	0.6817	0.4870	0.3092	0.1700	0.0871	0.0399	0.0177
AGO-3	33				0.9568	0.9302	0.8316	0.7043	0.5102	0.3341	0.1901	0.0984	0.0478	0.0226
SEP-1	34				0.9588	0.9344	0.8389	0.7219	0.5279	0.3540	0.2066	0.1070	0.0557	0.0274
SEP-2	35				0.9604	0.9374	0.8441	0.7354	0.5413	0.3696	0.2199	0.1132	0.0636	0.0323
SEP-3	36					0.9395	0.8478	0.7458	0.5514	0.3818	0.2304	0.1178	0.0715	0.0371
		0.9980	0.9947	0.9706	0.9604	0.9395	0.8478	0.7458	0.5514	0.3818	0.2304	0.1178	0.0715	0.0371

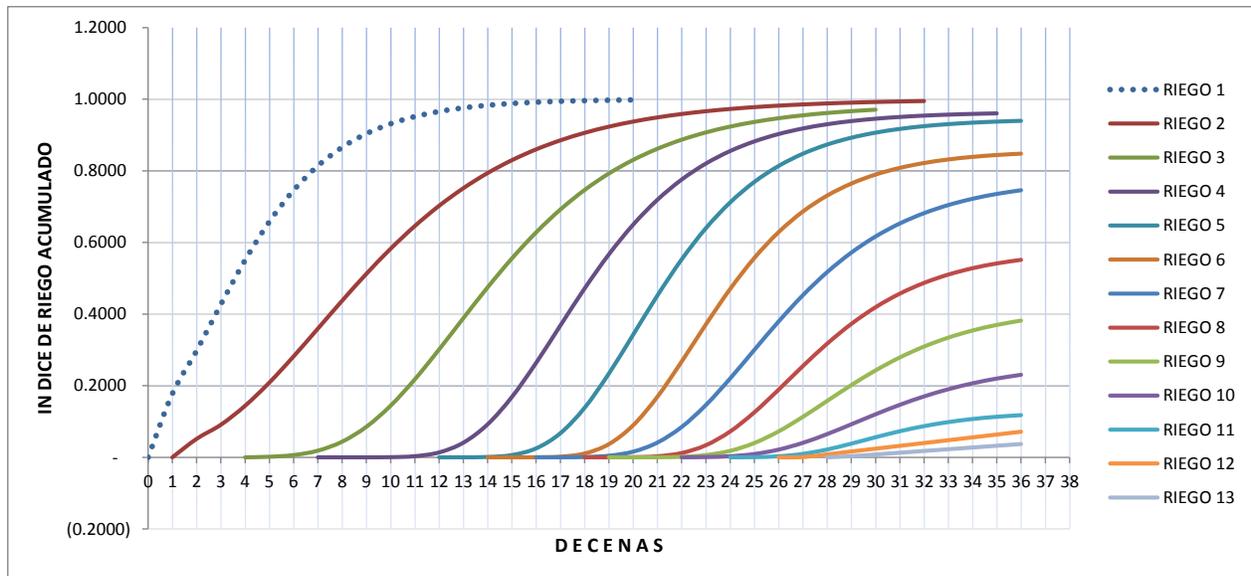


Figura 1. Índices de riego acumulados en alfalfa

GENERACIÓN DE ÍNDICES DE RIEGO DECENALES.

Los índices de riego decenales, son la diferencia entre dos índices acumulados consecutivos y nos indica que proporción de la superficie física total se riega en una decena determinada. Los índices de riego decenales calculados se presentan graficados en la figura 2 y en la Tabla 3.

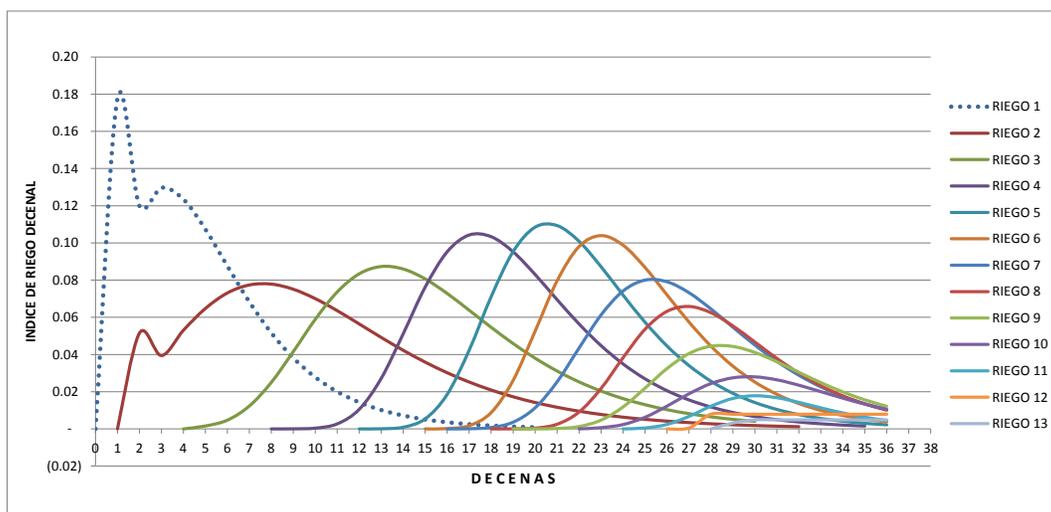


Figura 2. Índices de riego decenales en alfalfa.

Tabla 3. Índices de riego decenales calculados en alfalfa.

DECENA	RIEGO 1	RIEGO 2	RIEGO 3	RIEGO 4	RIEGO 5	RIEGO 6	RIEGO 7	RIEGO 8	RIEGO 9	RIEGO 10	RIEGO 11	RIEGO 12	RIEGO 13	
OCT-1	1	0.1775	-											
OCT-2	2	0.1199	0.0515											
OCT-3	3	0.1297	0.0394											
NOV-1	4	0.1235	0.0530	-										
NOV-2	5	0.1074	0.0648	0.0016										
NOV-3	6	0.0876	0.0731	0.0047										
DIC-1	7	0.0683	0.0774	0.0123										
DIC-2	8	0.0516	0.0779	0.0250	-									
DIC-3	9	0.0382	0.0751	0.0416	0.00003									
ENE-1	10	0.0278	0.0700	0.0589	0.00041									
ENE-2	11	0.0200	0.0636	0.0737	0.00271									
ENE-3	12	0.0143	0.0564	0.0834	0.01054	-								
FEB-1	13	0.0102	0.0492	0.0873	0.02716	0.0001								
FEB-2	14	0.0072	0.0423	0.0860	0.05116	0.0009								
FEB-3	15	0.0051	0.0359	0.0807	0.07625	0.0054	0.0000							
MAR-1	16	0.0036	0.0302	0.0728	0.09523	0.0185	0.0002	-						
MAR-2	17	0.0025	0.0252	0.0638	0.10425	0.0423	0.0017	0.0001						
MAR-3	18	0.0018	0.0209	0.0546	0.10337	0.0710	0.0088	0.0007	-					
ABR-1	19	0.0012	0.0173	0.0459	0.09523	0.0953	0.0261	0.0036	0.0000	-				
ABR-2	20	0.0009	0.0142	0.0380	0.08304	0.1085	0.0525	0.0113	0.0004	0.0000				
ABR-3	21		0.0116	0.0311	0.0695	0.1093	0.0796	0.0253	0.0025	0.0002				
MAY-1	22		0.0095	0.0253	0.05643	0.1009	0.0981	0.0435	0.0091	0.0013				
MAY-2	23		0.0078	0.0204	0.04479	0.0872	0.1039	0.0612	0.0217	0.0047	0.0007			
MAY-3	24		0.0063	0.0163	0.03495	0.0720	0.0988	0.0741	0.0382	0.0118	0.0023	-		
JUN-1	25		0.0051	0.0130	0.02693	0.0574	0.0868	0.0800	0.0535	0.0219	0.0062	0.0005		
JUN-2	26		0.0042	0.0103	0.02057	0.0446	0.0721	0.0791	0.0632	0.0324	0.0122	0.0024	-	
JUN-3	27		0.0034	0.0082	0.01559	0.0341	0.0575	0.0733	0.0658	0.0405	0.0189	0.0067	0.0005	
JUL-1	28		0.0028	0.0065	0.01177	0.0257	0.0445	0.0645	0.0625	0.0445	0.0244	0.0122	0.0079	-
JUL-2	29		0.0022	0.0051	0.00884	0.0191	0.0337	0.0547	0.0554	0.0443	0.0275	0.0164	0.0079	0.0032
JUL-3	30		0.0018	0.0041	0.00662	0.0142	0.0252	0.0451	0.0467	0.0411	0.0280	0.0178	0.0079	0.0049
AGO-1	31		0.0015		0.00495	0.0105	0.0186	0.0363	0.0379	0.0361	0.0264	0.0168	0.0079	0.0049
AGO-2	32		0.0012		0.0037	0.0077	0.0136	0.0288	0.0300	0.0304	0.0235	0.0143	0.0079	0.0049
AGO-3	33				0.00276	0.0056	0.0099	0.0226	0.0232	0.0249	0.0200	0.0113	0.0079	0.0049
SEP-1	34				0.00205	0.0041	0.0072	0.0176	0.0177	0.0199	0.0165	0.0086	0.0079	0.0049
SEP-2	35				0.00153	0.0030	0.0052	0.0135	0.0134	0.0156	0.0133	0.0063	0.0079	0.0049
SEP-3	36				0.0022	0.0038	0.0104	0.0100	0.0121	0.0105	0.0105	0.0045	0.0079	0.0049
		0.9980	0.9947	0.9706	0.9604	0.9395	0.8478	0.7458	0.5514	0.3818	0.2304	0.1178	0.0715	0.0371

CONCLUSIONES

La metodología empleada permitió que se lograra la obtención de índices de riego acumulados en alfalfa así como el cálculo de los índices de riego decenales, cumpliendo con las restricciones estadísticas necesarias para considerar que los modelos permiten ser utilizados con fines de predicción y elaboración de planes de riego de manera confiable.

Tabla 4. Índices de riego acumulados de los riegos 1, 2, 3 y 4 de alfalfa para el análisis de regresión.

DECENA	RIEGO 1 ALFALFA			RIEGO 2 ALFALFA			RIEGO 3 ALFALFA			RIEGO 4 ALFALFA						
	2008-2009	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2008-2009	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2008-2009	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2008-2009	2010-2011	2011-2012	2012-2013
1 OCT-1	0.1348	0.0863	0.1100	0.0837												
2 OCT-2	0.3470	0.2215	0.2880	0.2775	0.0149	0.0056	0.0096									
3 OCT-3	0.5652	0.3718	0.4844	0.4650	0.0852	0.0365	0.0577	0.0348								
4 NOV-1	0.6852	0.4954	0.6081	0.6050	0.1951	0.1081	0.1472	0.1213								
5 NOV-2	0.7534	0.6057	0.6770	0.6906	0.3012	0.1989	0.2489	0.2217	0.0105	0.0110	0.0105	0.0113				
6 NOV-3	0.8095	0.6902	0.7469	0.7646	0.3852	0.2665	0.3238	0.3100	0.0269	0.0351	0.0255	0.0241				
7 DIC-1	0.8478	0.7660	0.7972	0.8303	0.4464	0.3525	0.4027	0.3778	0.0500	0.0763	0.0568	0.0392	0.0048			
8 DIC-2	0.8739	0.8104	0.8228	0.8761	0.4905	0.4218	0.4498	0.4277	0.0780	0.1063	0.0786	0.0691	0.0074	0.0044	0.0048	
9 DIC-3	0.8880	0.8362	0.8549	0.8974	0.5284	0.4399	0.4938	0.4764	0.0996	0.1156	0.1145	0.1014	0.0103	0.0109	0.0102	
10 ENE-1	0.9008	0.8651	0.8866	0.9148	0.5785	0.4722	0.5538	0.5412	0.1371	0.1343	0.1762	0.1428	0.0127	0.0244	0.0187	
11 ENE-2	0.9173	0.8941	0.9151	0.9296	0.6481	0.5385	0.6217	0.6068	0.2170	0.1666	0.2520	0.1989	0.0123	0.0178	0.0377	0.0296
12 ENE-3	0.9408	0.9337	0.9369	0.9469	0.7262	0.6593	0.6956	0.6717	0.3123	0.2588	0.3373	0.2636	0.0352	0.0472	0.0591	0.0454
13 FEB-1	0.9564	0.9567	0.9491	0.9558	0.7854	0.7375	0.7618	0.7302	0.4040	0.3747	0.4232	0.3318	0.0685	0.0870	0.0958	0.0800
14 FEB-2	0.9669	0.9705	0.9639	0.9734	0.8276	0.7909	0.8159	0.7804	0.4983	0.4610	0.4884	0.4173	0.1046	0.1235	0.1435	0.1107
15 FEB-3	0.9721	0.9821	0.9718	0.9816	0.8559	0.8334	0.8504	0.8049	0.5539	0.5268	0.5485	0.4926	0.1573	0.1680	0.2130	0.1885
16 MAR-1	0.9789	0.9940	0.9791	0.9924	0.8907	0.8766	0.8752	0.8440	0.6363	0.5874	0.6267	0.5681	0.2409	0.2343	0.2917	0.2539
17 MAR-2	0.9840	1.0000	0.9886	1.0000	0.9237	0.9021	0.8961	0.8720	0.7051	0.6603	0.6981	0.6513	0.3463	0.3143	0.3832	0.3378
18 MAR-3	0.9904		1.0000		0.9469	0.9248	0.9163	0.8987	0.7679	0.7448	0.7683	0.7258	0.4561	0.4254	0.4796	0.4192
19 ABR-1	0.9954				0.9621	0.9407	0.9322	0.9136	0.8222	0.7962	0.8098	0.7837	0.5425	0.5257	0.5708	0.5244
20 ABR-2	1.0000				0.9740	0.9520	0.9404	0.9222	0.8784	0.8497	0.8420	0.8202	0.6458	0.6176	0.6480	0.6107
21 ABR-3					0.9862	0.9607	0.9546	0.9351	0.9125	0.8814	0.8710	0.8751	0.7480	0.7075	0.7325	0.7205
22 MAY-1					0.9932	0.9682	0.9603	0.9431	0.9322	0.9088	0.8909	0.9030	0.8197	0.7760	0.7861	0.7906
23 MAY-2					0.9984	0.9792	0.9645	0.9523	0.9484	0.9231	0.9069	0.9218	0.8667	0.8374	0.8201	0.8405
24 MAY-3					0.9850	0.9690	0.9596	0.9596	0.9619	0.9392	0.9199	0.9319	0.9006	0.8744	0.8488	0.8883
25 JUN-1					0.9901	0.9764	0.9664	0.9662	0.9688	0.9512	0.9293	0.9466	0.9229	0.8925	0.8746	0.9194
26 JUN-2					0.9927	0.9834	0.9716	0.9716	0.9760	0.9606	0.9345	0.9612	0.9396	0.9100	0.8925	0.9376
27 JUN-3					0.9864	0.9770	0.9664	0.9664	0.9760	0.9606	0.9345	0.9612	0.9396	0.9100	0.8925	0.9376
28 JUL-1					0.9894	0.9814	0.9846	0.9846	0.9894	0.9814	0.9471	0.9738	0.9605	0.9293	0.9086	0.9563
29 JUL-2					0.9922	0.9846	0.9846	0.9846	0.9922	0.9846	0.9471	0.9738	0.9605	0.9293	0.9086	0.9563
30 JUL-3					0.9952	0.9878	0.9878	0.9878	0.9952	0.9878	0.9471	0.9738	0.9605	0.9293	0.9086	0.9563
31 AGO-1					0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9471	0.9738	0.9605	0.9293	0.9086	0.9563
32 AGO-2					0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9471	0.9738	0.9605	0.9293	0.9086	0.9563

Tabla 5. Índices de riego acumulados de los riegos 5, 6, 7 y 8 de alfalfa para el análisis de regresión.

DECENA	RIEGO 5 ALFALFA			RIEGO 6 ALFALFA			RIEGO 7 ALFALFA			RIEGO 8 ALFALFA		
	2008-2009	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2008-2009	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2008-2009	2010-2011	2011-2012	2012-2013
11 ENE-2			0.0061									
12 ENE-3		0.0046	0.0131									
13 FEB-1	0.0024	0.0085	0.0203	0.0035								
14 FEB-2	0.0075	0.0187	0.0333	0.0092								
15 FEB-3	0.0164	0.0325	0.0428	0.0174	0.0081							
16 MAR-1	0.0362	0.0567	0.0677	0.0404	0.0028	0.0167	0.0047					
17 MAR-2	0.0707	0.0918	0.1290	0.0753	0.0068	0.0261	0.0104	0.0013	0.0078			
18 MAR-3	0.1272	0.1543	0.1909	0.1169	0.0212	0.0466	0.0235	0.0018	0.0137	0.0040		0.0011
19 ABR-1	0.2088	0.2284	0.2754	0.1731	0.0448	0.0529	0.0417	0.0037	0.0080	0.0195	0.0083	0.0032
20 ABR-2	0.3198	0.3286	0.3487	0.2603	0.0907	0.1086	0.0747	0.0130	0.0176	0.0319	0.0178	0.0127
21 ABR-3	0.4562	0.4440	0.4664	0.3995	0.1593	0.1704	0.1408	0.0369	0.0410	0.0671	0.0336	0.0085
22 MAY-1	0.5716	0.5598	0.5750	0.5151	0.2444	0.2597	0.2184	0.0858	0.0868	0.1014	0.0686	0.0112
23 MAY-2	0.6632	0.6518	0.6497	0.6029	0.3621	0.3595	0.3184	0.1460	0.1477	0.1534	0.1116	0.0426
24 MAY-3	0.7437	0.7323	0.7104	0.6827	0.4915	0.4575	0.4305	0.2339	0.2230	0.2193	0.1905	0.0831
25 JUN-1	0.8080	0.7982	0.7691	0.7547	0.5768	0.5521	0.5148	0.3187	0.3176	0.2892	0.2766	0.1514
26 JUN-2	0.8513	0.8482	0.8056	0.7972	0.6576	0.6307	0.5959	0.4171	0.4098	0.3585	0.3507	0.2148
27 JUN-3	0.8787	0.8728	0.8328	0.8297	0.7161	0.6848	0.6531	0.4943	0.4655	0.4278	0.4190	0.2710
28 JUL-1	0.9016	0.8942	0.8560	0.8598	0.7658	0.7195	0.7149	0.5592	0.5332	0.4896	0.4759	0.3305
29 JUL-2	0.9163	0.9048	0.8738	0.8842	0.7935	0.7452	0.7519	0.6099	0.5860	0.5505	0.5295	0.3877
30 JUL-3	0.9285	0.9144	0.8846	0.8980	0.8315	0.7833	0.8081	0.6611	0.6318	0.6035	0.5949	0.4488
31 AGO-1	0.9333	0.9223	0.8959	0.9036	0.8507	0.8001	0.8277	0.6931	0.6583	0.6462	0.6267	0.4876
32 AGO-2	0.9393	0.9280	0.9026	0.9088	0.8657	0.8095	0.8395	0.7159	0.6840	0.6709	0.6514	0.5143
33 AGO-3	0.9430		0.9100	0.9147	0.8775	0.8554	0.8439	0.7388	0.6890	0.6955	0.6882	0.5645
34 SEP-1	0.9454		0.9169	0.9184	0.8865	0.8627	0.8497	0.7590	0.6941	0.7131	0.7119	0.5938
35 SEP-2			0.9234	0.9212	0.8909	0.8695	0.8527	0.7737	0.6991	0.7259	0.7193	0.6118
36 SEP-3			0.9276		0.8911	0.8765	0.8591	0.7786	0.7415	0.7334	0.7334	0.6204

