

Modelo de Predicción de Riegos para el Cultivo de Trigo en el Valle de Mexicali, B. C.

Por:

Carlos R. Orozco Riezgo



Mexicali, Baja California, octubre del 2012.

Contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Descripción geográfica del estado de Baja California.....	1
1.2. Localización del Distrito de Riego 014, Río Colorado	1
1.3. Calidad del agua de riego	2
2. El uso consuntivo y la evapotranspiración de los cultivos	2
3. Coeficiente de desarrollo de los cultivos.....	14
4. Láminas de riego y lámina de lavado	16
5. Calendarios de riego.....	21
5.1. Elaboración de un calendario de riego para trigo	21
6. El agua de riego.....	22
6.1. Pertinencia entre el uso eficiente del agua de riego y la ET.....	22
6.2. Implicaciones prácticas para programar los riegos en función de la respuesta del trigo al estrés hídrico	25
6.3. Función de respuesta en la producción, relacionada con el estrés hídrico	25
6.4. Relación entre el estrés hídrico y el salino para los suelos del valle de Mexicali.....	28
7. Bibliografía Citada.....	33

Índice de Cuadros

Cuadro	Página
1. Listado de variables del SIMARBC	9
2. Valores de Kc para algunos cultivos..	15
3. Constantes de humedad de los suelos del Distrito de Riego 014	19
4. Tolerancia de los cultivos y su rendimiento potencial por la influencia de la salinidad del agua de riego (EC_w) o salinidad del suelo (EC_e)	20
5. Calendario de riego para trigo en el valle de Mexicali, B.C.	22
6. Tolerancia de varios cultivos a la salinidad del suelo	32

Índice de Figuras

Figura	Página
1. Presa derivadora José María Morelos y Pavón	1
2. Ubicación de las estaciones de la red estatal del SIMARBC.....	7
3. Imagen de sitio Web del SIMARBC.....	8
4. Estación climatológica tipo, del SIMARBC.....	8
5. Comportamiento de la ET_o en el valle de Mexicali durante el 2011.....	10
6. Evapotranspiración real (ET_c) del valle de Mexicali, de Oct. 2005 a Sep. 2006, calculada por el ITRC.....	12
7. Evapotranspiración real (ET_c) del valle de Mexicali, de Oct. 2006 a Sep. 2007, calculada por el ITRC.....	13
8. Variación típica del K_c durante el ciclo de un cultivo	15
9. Comparación de evapotranspiración relativa no acentuada y relativa actual, del cultivo de alfalfa en una muestra de predios de los Módulos de Riego 10, 11 y 12	23
10. Comparación de evapotranspiración relativa no acentuada y relativa actual, del cultivo de algodón en una muestra de predios de los Módulos de Riego 10, 11 y 12	24
11. Comparación de evapotranspiración relativa no acentuada y relativa actual, del cultivo de trigo en una muestra de predios de los Módulos de Riego 10, 11 y 12	24
12. Control de salinidad utilizando siembra en surcos	25
13. Rendimiento de grano (R_g) de trigo predicho por el modelo, entre esta variable y la evapotranspiración real en cada tratamiento ensayado	27
14. Curva de retención de humedad del suelo, para un suelo arcillo-limoso con diferentes grados de salinidad (EC_e).....	30

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción geográfica del estado de Baja California

En 1992 el Consejo Estatal de Población (CONEPO), en su descripción geográfica y política indica que el estado de Baja California se localiza en la región noroeste de la República Mexicana, en la parte norte de la península y se ubica geográficamente entre los meridianos 117° 06' y 112° 46' de longitud oeste, y entre los paralelos 28° 00' y 32° 43' de latitud norte.

Limita al norte con los Estados Unidos de Norteamérica, compartiendo con ese país una frontera de 265 Km, de los cuales 233 corresponden al estado de California, 32 Km al estado de Arizona. Al noreste del estado, siguiendo el cauce del río Colorado y al sur de la frontera del estado de Arizona, Baja California colinda con el estado de Sonora. Hacia el sur se encuentra limitado por el estado de Baja California Sur, al poniente con el Océano Pacífico y al noreste por el Golfo de California. Registra una anchura máxima de 265 Km que es la correspondiente a la de la frontera norte y una mínima de 75 Km.

1.2. Localización del valle de Mexicali

El valle de Mexicali, Baja California se localiza en el Distrito de Riego 014, Río Colorado, el cual se ubica en los estados de Baja California y Sonora; entre los paralelos 31° 50' y 32° 40' latitud norte y 114° 45' y 115° 40' de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Limita al norte con el estado de California de los Estados Unidos de Norteamérica, al sur con el Golfo de California, al este con el estado de Arizona, EUA y la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, Sonora, y al oeste con las Sierras Cucapah y El Mayor (INEGI, 1990, citado por Ruíz, 1995).



Figura 1. Presa Derivadora José María Morelos y Pavón.

El Distrito se compone de los valles agrícolas de Mexicali, en el estado de Baja California, y el de San Luis Río Colorado, en Sonora. Cuenta con dos fuentes de agua, las aguas superficiales del río Colorado y las aguas subterráneas que pueden extraerse del acuífero.

1.3. Calidad del agua de riego

SUPERFICIAL

En lo que respecta a la calidad de las aguas superficiales del río Colorado que recibe México en la presa Morelos cumplen con el promedio anual de salinidad acordado en el Acta 142 del Tratado de Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos, según la cual la diferencia entre la salinidad promedio anual del agua recibida en el Lindero Norte no debe ser mayor de $121 \text{ ppm} \pm 30 \text{ ppm}$; las variaciones máximas diarias de salinidad están rebasando frecuentemente (25% del tiempo) los niveles de salinidad en un rango de 1,016 ppm a 1,300 que son críticos para algunos cultivos que son sensibles a las sales, y el resto (75% del tiempo) la salinidad es menor al nivel de 1,016 ppm que es aceptable en la mayoría de los cultivos sembrados en el distrito de riego (CONAGUA, 2005).

La situación de la calidad del agua en el canal Sánchez Mejorada es más grave, ya que los niveles de salinidad entre 1,016 ppm a 1,300 ocurren en el 17.2% del tiempo, y entre 1,300 a 2,000 ppm se presentan en el 82.7% del tiempo. Únicamente se tienen niveles de salinidad menores a 1,016 ppm en el 0.1% del tiempo.

SUBTERRÁNEA

La concentración total de sales en el agua subterránea se ha incrementado a través del tiempo a una velocidad cercana a las 20 ppm por año. En 1991, López encontró que para el período comprendido de 1961 a 1988, la concentración total en el agua del acuífero se incrementó de 1,096 ppm a 1,685 ppm que representa un crecimiento de 21.8 ppm por año. Lo anterior, es similar a un estudio realizado por la CONAGUA (1994), en la que encontraron que la salinidad del agua crece a una velocidad de 20.6 ppm por año.

Por otro lado, Navarro (1998) en una muestra del 15 por ciento de los 243 pozos agrícolas ubicados del valle de Mexicali, que se encuentran en el área de influencia del Canal Todo Americano, perteneciente el Distrito de Riego del Valle Imperial, USA, y que colinda en el valle de Mexicali, encontró que la salinidad se incrementa en razón de 21.9 ppm/año, esto en el período del año de 1962 a 1994

2. EL USO CONSUNTIVO Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS CULTIVOS

La evapotranspiración (ET) es la consideración conjunta de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración.

Cisneros (2003) menciona que la evaporación es el agua perdida en forma de vapor por el terreno adyacente a la planta, por la superficie del agua o por la superficie de las hojas de las plantas.

Los factores que afectan principalmente la evaporación, son:

- Climáticos (principalmente la radiación solar).
- Superficie evaporante.

La evaporación está en función de la radiación solar, latitud, estación del año, hora del día y nubosidad. También está en función de la temperatura del aire, presión de vapor, viento y presión atmosférica.

En lo que respecta a la transpiración, ésta es la pérdida de agua de las plantas en forma de vapor se le conoce como transpiración.

Tipos de transpiración:

- A través del mesófilo de las hojas (transpiración estomática).
- A través de la corteza del tallo (transpiración cuticular).
- La transpiración está en función de factores climáticos: viento, humedad atmosférica, temperatura y radiación solar.

Por otro lado, el Sistema de Información para el Manejo del Agua de Riego de Baja California (SIMARBC) (2009) refiere que la evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser hora, día, mes o incluso un ciclo completo de cultivo o un año.

*“La **evapotranspiración** es el término usado para describir la cantidad de agua que se pierde en la atmósfera debido a la **evaporación** de superficies tales como el suelo y hojas de los cultivos, y debido a la **transpiración**, que es agua que ha sido usada por la planta y que regresa a la atmósfera como vapor.”*

(Burt, 2012)

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) puede ser estimada a partir de datos meteorológicos y del cultivo, utilizando la ecuación de Penman-Monteith.

De acuerdo con Brown et al. (2001) citado por CONAGUA (2002) mediante el enfoque del coeficiente del cultivo (K_c), la ET_c se calcula como el producto del K_c y la evapotranspiración potencial (ET_o).

$$ET_c = K_c * ET_o$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración del cultivo [$mm\ d^{-1}$].

K_c = Coeficiente del cultivo [adimensional].

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia [$mm\ d^{-1}$].

La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de ET_o . Por lo tanto, mientras ET_o representa un indicador de la demanda climática, el valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, varía en una pequeña proporción en función del clima.

EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET_o)

La estimación periódica de la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r) es la base para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos. Para obtener este valor, se requiere primeramente estimar la evapotranspiración de referencia del cultivo (ET_o) para aislar el efecto del tipo del cultivo. Posteriormente, se ajusta el valor de ET_o con un factor que toma en cuenta el tipo y la etapa del cultivo, este factor se conoce como coeficiente de cultivo (K_c) (CONAGUA, 2002).

La evapotranspiración de referencia es la evapotranspiración potencial de un cultivo con características específicas (de referencia), usualmente pasto o alfalfa, que tiene sentido físico ya que su evapotranspiración se puede estimar directamente a través de estimaciones directas de los cambios de peso de un tanque lisímetro. El concepto de evapotranspiración de referencia permite aislar exclusivamente las demandas evapotranspirativas de la atmósfera, de otros factores como; prácticas de manejo, tipo y fase de cultivo, al definir un cultivo fijo bajo condiciones óptimas de humedad.

Para la determinación de la evapotranspiración de referencia se cuenta con varias metodologías, dentro de las cuales destacan las siguientes.

MÉTODO DE BLANNEY-CRIDDLEY

Si se considera que la disponibilidad de datos meteorológicos en la mayoría de las zonas de riego del país es limitada, sobre todo en nuevas zonas de riego. Posiblemente el método de Blanney-Criddley es el único método aplicable que se pueda utilizar para estimar la evapotranspiración de referencia, con validez limitada a periodos mensuales y de utilidad para fines de diseño (CONAGUA, 2002).

La ecuación original requiere únicamente de datos de temperatura y de latitud del sitio, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$ET_0 = p [0.46 * T + 8.13]$$

Donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia en mm/día como promedio mensual, T es la temperatura media diaria del mes en $^{\circ}C$, y p es el porcentaje diario de las horas de insolación en relación al total del año de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{h_d^i}{\sum_{i=1}^{365} h_d^i} 100$$

Donde p_i es el porcentaje de horas de insolación para el día "i" con respecto al número total de horas de insolación en el año; h_d^i es el número de horas de insolación para el día "i", por ejemplo, un valor diario de $p = 0.41\%$ significa que ese día aporta el 0.41 por ciento del total de horas de insolación del año. Frecuentemente p se presenta como el valor representativo mensual, existen tablas donde se encuentra el valor de p para el día 15 de cada mes. El valor p depende de la latitud del lugar bajo consideración. La siguiente ecuación permite calcular el valor p en función del ángulo de declinación solar en grados (δ) y la latitud en grados.

$$p = 0.00304 \cos^{-1} \left(\frac{-\text{sen}(\delta) \text{sen}(\text{latitud})}{\text{cose}(\delta) \text{cos}(\text{latitud})} \right)$$

La declinación solar es evaluada en función del día del año de acuerdo a la siguiente relación:

$$\delta = \sin^{-1}(0.39795 \cos(0.98563(J - 173)))$$

Donde J es el día juliano bajo consideración variando de 1 a 365, a excepción de los años bisiestos que varía de 1 a 366. Para el hemisferio sur la constante "- 173" de debe ser remplazada por la constante "+ 9.5".

MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

El método de Penman-Monteith (P-M) es el método convencional utilizado para estimar la evapotranspiración de referencia. Este método se ha estandarizado desde que la FAO documentó su aplicabilidad en diversas partes del mundo (Allen *et al*, 1998, citados por CONAGUA, 2002). Las ventajas de este método son las siguientes:

- a) Incorpora parámetros fisiológicos del cultivo.
- b) Incorpora parámetros aerodinámicos.
- c) Probado intensivamente en varias localidades del mundo.
- d) Buena aproximación para probar la evapotranspiración de referencia para pasto.

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ET_p)

La evapotranspiración real de un cultivo se refiere al agua perdida tanto por la transpiración del cultivo como por la evaporación del suelo. Existen varios conceptos relacionados con la evapotranspiración. Para fines de diseño de sistemas de riego se requiere conocer la evapotranspiración de la época de máxima demanda que puede presentar un cultivo bajo condiciones óptimas, conocida como evapotranspiración potencial o evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándares (Ojeda y Carrillo, 2002, citados por CONAGUA, 2002) La evapotranspiración real de un cultivo es menor o igual a su transpiración potencial.

Para calcular la evapotranspiración potencial de un cultivo (ET_p), se multiplican dos factores: el factor clima y el factor cultivo. El factor clima es representado por la evapotranspiración de referencia y el factor cultivo por el coeficiente de cultivo. Para fines de diseño se considera que la evapotranspiración real debe ser igual a la evapotranspiración potencial, a menos que se quiera trabajar bajo condiciones deficitarias (CONAGUA, 2002). La ecuación que define estas relaciones es:

$$ET_r = ET_p = K_c * ET_o$$

Por lo tanto, la estimación de la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r) con fines de diseño de un sistema de riego consiste en dos partes:

1. Estimación de una tasa de referencia, evapotranspiración de referencia (ET_o), con especificaciones en el suministro de agua y tipo de cultivo bien definido.
2. Escalar la tasa de referencia al tomar en cuenta las características del cultivo en la forma del coeficiente de cultivo (K_c).

EL USO DEL SIMARBC EN LA ESTIMACIÓN DE LA ET_o

Para el caso del estado de Baja California, la estimación del consumo de agua por los cultivos resulta tan sencilla como multiplicar los coeficientes de cultivo, por los valores de evapotranspiración de referencia (ET_o) que reporta el SIMARBC, diariamente en cada una de las estaciones climatológicas automatizadas que conforman la red.

Habrá que mencionar que a partir del 2003 el Gobierno del Estado de Baja California en coordinación con el Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California (ICA-UABC), celebró un Convenio de Colaboración con la Universidad de Davis California para establecer dos estaciones climatológicas automatizadas, como una herramienta que permitiera para tomar las decisiones más adecuadas, en cuanto al manejo del agua de riego para los cultivos. Una de las estaciones se instaló en el campo experimental del ICA y la

otra en el Centro de Validación Tecnológica del Gobierno del Estado, ubicado en la colonia Miguel Alemán del valle de Mexicali. Estas estaciones cuentan con pasto en su entorno como cultivo de referencia.

Posteriormente se sumaron otras estaciones más, y a la fecha se cuenta con 17 estaciones distribuidas en las principales zonas agrícolas del estado. El valle de Mexicali cuenta con 5 estaciones, una más se localiza en el valle de las Palmas, municipio de Tecate, y las 11 restantes en valles agrícolas del municipio de Ensenada (Figura 2).

RED DE ESTACIONES

- ① Andrade
- ② San Luis
- ③ Zacatecas
- ④ Nuevo León
- ⑤ Mexicali
- ⑥ Las Palmas
- ⑦ El Porvenir
- ⑧ Guadalupe
- ⑨ Ojos Negros
- ⑩ Trinidad Este
- ⑪ Trinidad Oeste
- ⑫ Santo Tomas
- ⑬ Maneadero
- ⑭ Erendira
- ⑮ San Simón
- ⑯ San Isidro
- ⑰ Colonet



Figura 2. Ubicación de las estaciones de la red estatal del SIMARBC.

Los datos de SIMARBC son usados para estimar la evaporación del suelo y la cantidad de agua usada por el pasto regado, que se encuentra en el suelo de la estación climatológica (transpiración).



Figura 3. Imagen de sitio Web del SIMARBC.

Los valores combinados del uso de agua estimada para el pasto y evaporación del suelo es referida a la “Evapotranspiración de referencia” o ET_0 . Los datos de ET_0 son entonces almacenados en la forma que está disponible cuando la computadora es llamada.

Cambios en ET_0 pueden ser usados como una guía para cambios en cultivos. Usando los coeficientes de cultivo (K_c) y ET_0 , el uso del agua puede ser estimado con un nivel justo de precisión.

Los datos climatológicos se registran en cada estación de la red y de manera automática cada día son transferidos vía telefónica a la computadora central que se ubica en las instalaciones del Centro de Atención al Campo (CECAM) del Gobierno del Estado, en el ejido Sinaloa, valle de Mexicali.

Una vez que los datos han sido validados, se almacenan y ponen a disposición de los usuarios en la página de internet (Figura 3), en la siguiente dirección: <http://www.sfa.gob.mx/SIMARBC>

Cada estación del SIMARBC cuenta con once componentes principales, mismos que se observan en la Figura 4.

1. Pluviómetro.
2. Anemómetro y veleta.
3. Piranómetro.
4. Sensor de temperatura y humedad relativa.
5. Temperatura del suelo.
6. Panel solar.
7. Un almacenador de datos (data logger): Almacena la información y calcula la

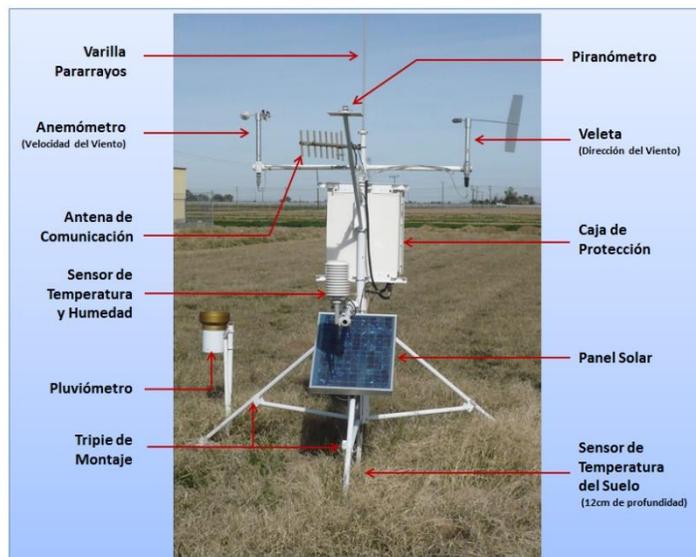


Figura 4. Estación climatológica tipo, del SIMARBC.

- evapotranspiración potencial (mm por día).
8. Regulador de voltaje.
 9. Teléfono.
 10. Tripie.
 11. Antena pararrayos.

La red de estaciones del SIMARBC, diariamente reportan la información de las 21 variables agroclimáticas y se presentan por día, mes y año. La programación de cada estación almacena los datos cada hora, así mismo, realiza un cálculo promedio o acumulativo (dependiendo de la variable leída) cada 24 horas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Listado de variables del SIMARBC.

Variable	Unidad de Medida		Consulta	
			Por Día	Por Hora
Evapotranspiración (Et _o)	Milímetros	mm	√	√
Precipitación Total (Lluvia)	Milímetros	mm	√	√
Radiación Solar	Calorías / Centímetro Cuadrado	Cal/cm ²	√	√
Presión Vapor	Kilopáscales	Kpas	√	√
Temperatura Máxima	Grados Centígrados	°C	√	×
Temperatura Mínima	Grados Centígrados	°C	√	×
Temperatura Aire	Grados Centígrados	°C	×	√
Promedio de la Temperatura	Grados Centígrados	°C	√	×
Humedad Relativa	Porcentaje	%	×	√
Humedad Relativa Promedio	Porcentaje	%	√	×
Humedad Relativa Máxima	Porcentaje	%	√	×
Humedad Relativa Mínima	Porcentaje	%	√	×
Punto de Roció	Grados Centígrados	°C	×	√
Punto de Roció Promedio	Grados Centígrados	°C	√	×
Punto de Roció Máximo	Grados Centígrados	°C	√	×
Temperatura del Suelo	Grados Centígrados	°C	×	√
Temp. Promedio del Suelo	Grados Centígrados	°C	√	×
Velocidad del Viento	Metro / Segundo	m/s	√	√
Dirección del Viento	Rosa de los vientos	°N	√	√
Unidades Calor	Método Seno Simple	U. C.	√	√
Horas Frío (Valle de Mexicali)	Temp. Acumulada = 0 < de 10 °C	H. F.	√	√
Horas Frío (Zona Costa)	Temp. Acumulada = 0 < de 7 °C	H. F.	√	√

En la figura 5, se presentan un plano del valle de Mexicali con el comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET_o) acumulada de enero a diciembre del 2011. Se puede observar que la zona noreste del valle es la que tuvo los valores más altos (1,900 a 2,000 mm)

de la ET_0 acumulada, y la zona sur la que tuvo los valores más bajos, tal vez por la influencia del mar del golfo de California.

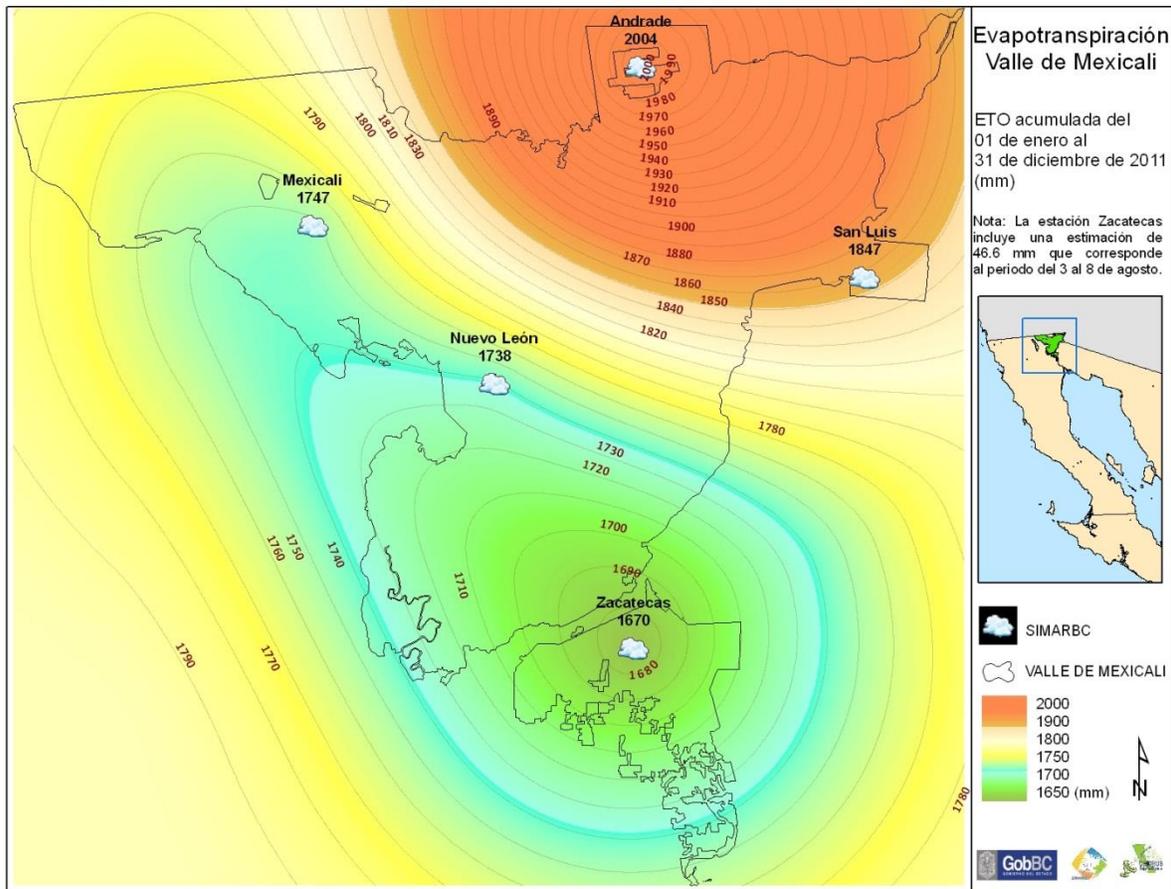


Figura 5. Comportamiento de la ET_0 en el valle de Mexicali durante el 2011.

CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL DEL VALLE DE MEXICALI POR EL ITRC

El Centro de Investigación y Entrenamiento en Riego de San Luis Obispo, California (Irrigation Training and Research Center) (ITRC), llevo a cabo un estudio para calcular la evapotranspiración del valle de Mexicali utilizando imágenes LandsAT 5, con un proceso de Alta Resolución (METRIC). El proceso METRIC se basa en un balance de energía de superficie. Este depende de las precisas y frecuentes imágenes termales del satélite LandsAT (disponible una por cada 16 días) y un entendimiento de la variable agronómica de la región (Burt, 2012). A continuación se presenta un resumen de la descripción de este proceso y sus resultados.

Todas las imágenes disponibles con cielo despejado y mínimo de nubosidad fueron procesadas para el valle de Mexicali de agosto 2005 hasta septiembre 2007. Un total de 66 imágenes fueron procesadas usando con la metodología METRIC para evaluar la evapotranspiración.

Se utilizaron los datos meteorológicos y evapotranspiración de referencia (ET_o) de la estación meteorológica del SIMARBC ubicada en el ejido Nuevo León para imágenes de la Ruta 39. Para la Ruta 38 se utilizaron los datos de la estación San Luis.

El modelo de elevación digital se obtuvo del United States Geological Service (USGS) en formato raster con resolución de 30 por 30 metros.

Cada una de las 66 imágenes fue procesada individualmente para desarrollar una ET_c "instantánea" para cada píxel de la imagen, usando un balance de energía superficial con calibración interna. La evapotranspiración real (ET_c) instantánea se produjo en el momento en que la imagen fue tomada. Conociendo la evapotranspiración de referencia (ET_o) del cultivo en el momento que la imagen fue tomada, se hace una interpolación para estimar la ET_o en el instante que la imagen fue tomada. Dividiendo la ET_c instantánea por la ET_o instantánea, se calcula un coeficiente de cultivo (K_c). Este K_c es una excelente aproximación el K_c diario promedio.

Si una imagen contiene nubes o niebla, habrá errores significativos en los valores de K_c en esos píxeles. Es entonces necesario recortar el área afectada y reemplazarlo con una estimación del verdadero valor de K_c , este proceso se denomina "enmascaramiento de la nube". Imágenes con nubosidad significativas no fueron usadas en absoluto en esta evaluación.

Una vez que se calcularon los valores de K_c promedio diarios para cada píxel en cada imagen y se completó el enmascaramiento de la nube, los valores de K_c fueron interpolados para cada día entre las imágenes usando un algoritmo. El resultado es una imagen para cada día del 01 de octubre de 2005 hasta el 30 de septiembre de 2007. Píxeles de cada imagen diaria se multiplicaron entonces por la ET_o corregida diariamente de la estación del SIMARBC del ejido Nuevo León y de la estación de San Luis para determinar el ET_c diario para cada píxel de la imagen. Después se sumaron los valores mensuales de ET_c para desarrollar 48 imágenes (24 imágenes de cada Ruta).

Para cada mes se combinaron las imágenes de las dos Rutas y se obtuvo una imagen mensual. El resultado fue una imagen de la ET_c para toda el área de estudio por cada mes (24 imágenes totales). Finalmente, estas imágenes fueron sumadas en el ciclo agrícola para desarrollar imágenes de ET_c los ciclos agrícolas 2005-2006 y 2006-2007 (Figuras 6 y 7).

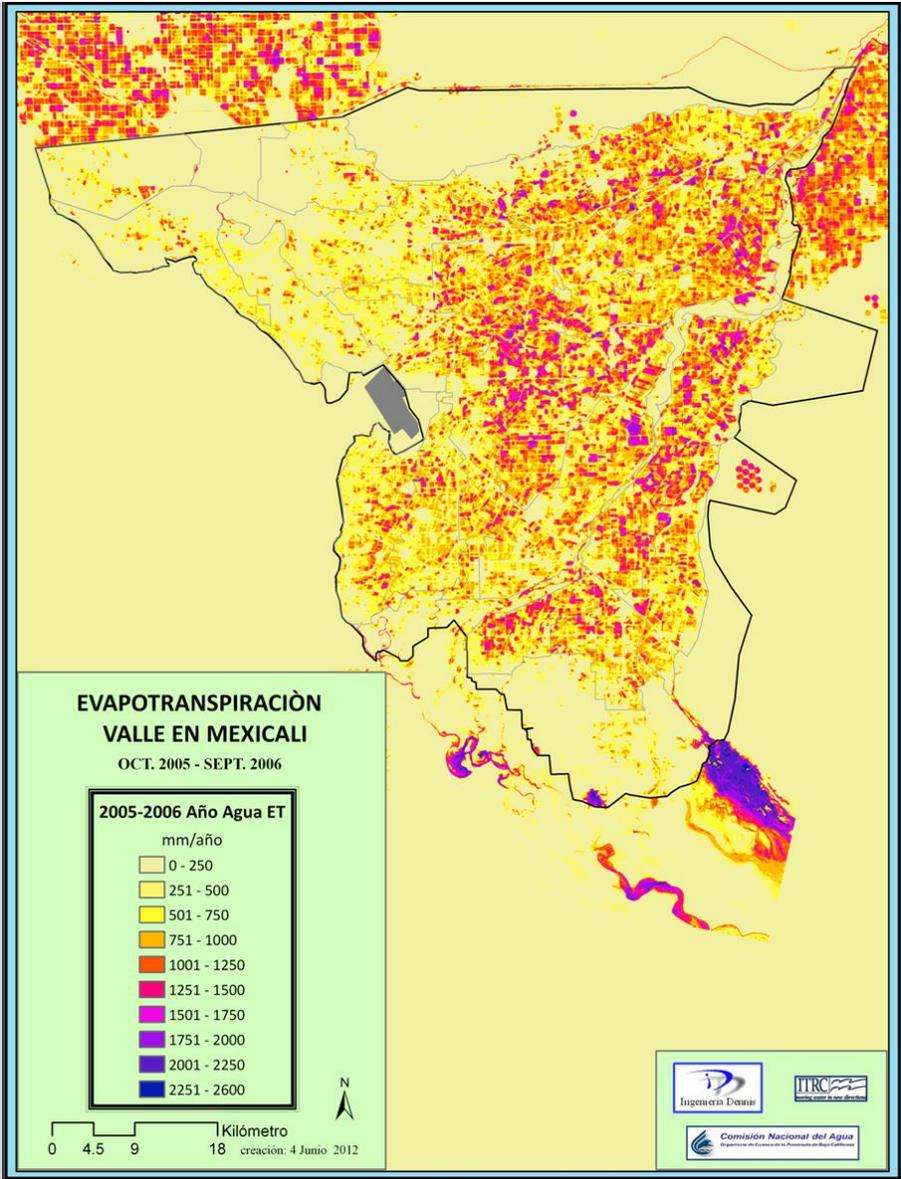


Figura 6. Evapotranspiración real (ET_c) del valle de Mexicali, de Oct. 2005 a Sep. 2006, calculada por el ITRC.

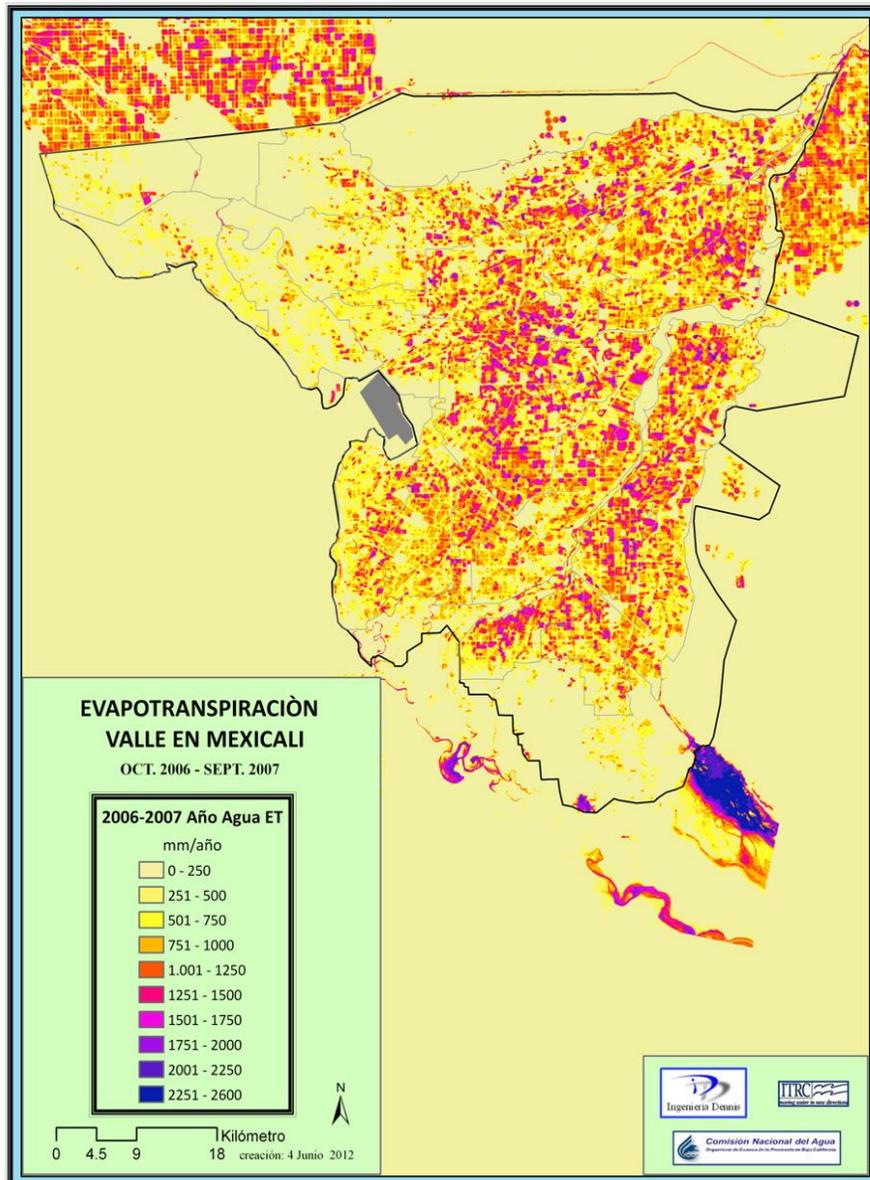


Figura 7. Evapotranspiración real (ET_c) del valle de Mexicali, de Oct. 2006 a Sep. 2007, calculada por el ITRC.

USO CONSUNTIVO DE LOS CULTIVO

El uso consuntivo es la cantidad de agua que usan las plantas para crecer, desarrollarse y producir económicamente. El uso consuntivo está constituido por el agua que transpiran las plantas a través de las hojas, el agua que se evapora directamente del suelo y el agua que constituye los tejidos de las plantas. En virtud de que los dos primeros componentes

constituyen casi el 99% del uso consuntivo es común, mencionar el término “evapotranspiración real” al hacer referencia al uso consuntivo

RESUMEN

1. El conocimiento de la evapotranspiración de referencia (ET_o) es requisito indispensable para poder desarrollar un programa de riego para cualquier cultivo.
2. Para el caso del valle de Mexicali, se puede obtener diariamente el valor de la ET_o , solo hay que ingresar a la página WEB del SIMARBC y ubicar la estación climatológica más cercana a la zona de interés. Las estaciones del SIMARBC cuentan con pasto como cultivo de referencia.
3. Los planos generados por el ITRC se refieren a la evapotranspiración real (ET_c) y su aplicación es con fines de planeación y administración del agua.
4. Es aceptable mencionar el término “evapotranspiración real” al hacer referencia al “uso consuntivo” de un cultivo.

3. COEFICIENTE DE DESARROLLO DE LOS CULTIVOS

De acuerdo al SIMARBC (2009) el coeficiente del cultivo (K_c) integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo, del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores K_c , estos coeficientes de cultivo se pueden encontrar en las publicaciones de diversos autores, entre los que destacan Doorenbos y Pruitt (1977).

El coeficiente de cultivo (K_c) relaciona la evapotranspiración potencial (ET_p) de un cultivo con la evapotranspiración de n cultivo de referencia (ET_o). Se han realizado una gran cantidad de investigaciones para obtener simultáneamente tanto la ET_p como la ET_o y obtener el coeficiente de cultivo con la siguiente ecuación (CONAGUA, 2002):

$$K_c = \frac{ET_p}{ET_o}$$

En la Figura 8, se presenta esquemáticamente la variación típica del coeficiente de cultivo (K_c) durante su ciclo, la cual tiene un comportamiento específico para cada cultivo en lo particular.

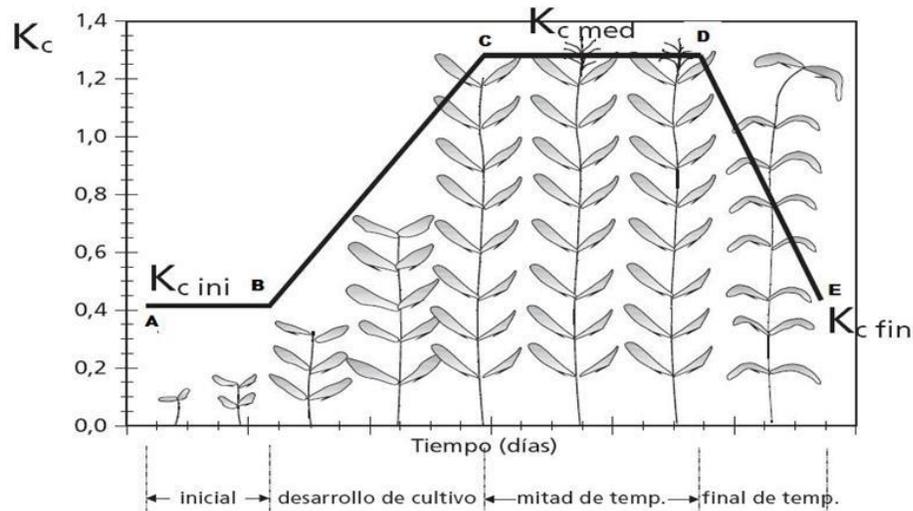


Figura 8. Variación típica del K_c durante el ciclo de un cultivo.

Palacios (1996), ha propuesto unos coeficientes de desarrollo K_c para algunos cultivos, según desarrollo o según ciclo vegetativo, estos se pueden ver en el siguiente cuadro.

Cuadro 2. Valores de K_c para algunos cultivos (Palacios, 1996, citado por Cisneros, 2003).

PROC. DE DESARROLLO	MAIZ	TRIGO	ALGODON	SORGO	CARTAMO	SOYA	FRIJOL	AJONJOLI	GARBANZO	CEBADA	JITOMATE	CHILE	PAPA	CACAHUATE	CUCUR-BITACEAS
0	0.42	0.15	0.20	0.30	0.14	0.51	0.50	0.30	0.30	0.15	0.43	0.48	0.30	0.15	0.45
5	0.45	0.20	0.22	0.35	0.16	0.45	0.54	0.35	0.35	0.20	0.43	0.50	0.35	0.17	0.47
10	0.48	0.30	0.25	0.40	0.18	0.41	0.60	0.40	0.40	0.30	0.43	0.55	0.40	0.20	0.50
15	0.51	0.40	0.25	0.45	0.22	0.45	0.65	0.50	0.50	0.40	0.45	0.65	0.45	0.25	0.53
20	0.60	0.55	0.32	0.60	0.27	0.51	0.73	0.60	0.55	0.55	0.45	0.75	0.50	0.29	0.56
25	0.65	0.70	0.40	0.70	0.35	0.51	0.80	0.70	0.65	0.70	0.50	0.80	0.60	0.36	0.60
30	0.70	0.90	0.50	0.80	0.44	0.51	0.90	0.80	0.70	0.90	0.55	0.90	0.70	0.43	0.65
35	0.80	1.10	0.62	0.90	0.54	0.52	0.97	0.87	0.75	1.10	0.65	0.95	0.62	0.82	0.70
40	0.90	1.25	0.89	1.00	0.64	0.55	1.05	0.95	0.78	1.25	0.75	0.93	0.97	0.61	0.75
45	1.00	1.40	0.90	1.08	0.76	0.57	1.10	1.00	1.80	1.40	0.85	1.03	1.05	0.61	0.80
50	1.05	1.50	0.98	1.07	0.88	0.60	1.12	1.10	0.82	1.50	0.95	1.05	1.16	0.80	0.81
55	1.07	1.57	1.00	1.05	0.97	0.63	1.12	1.20	0.85	1.57	1.00	1.05	1.25	0.90	0.82
60	1.08	1.62	1.02	1.00	1.07	0.66	1.10	1.28	0.85	1.62	1.03	1.05	1.30	1.00	0.80
65	1.07	1.61	1.00	0.95	1.07	0.68	1.05	1.30	0.82	1.61	1.02	1.03	1.35	1.01	0.79
70	1.05	1.55	0.95	0.90	1.08	0.70	1.02	1.32	0.80	1.55	0.98	1.00	1.38	1.02	0.77
75	1.02	1.45	0.87	0.82	1.02	0.70	0.95	1.29	0.75	1.45	0.95	0.97	1.38	0.91	0.75
80	1.00	1.30	0.80	0.75	0.96	0.69	0.87	1.25	0.70	1.30	0.90	0.90	1.35	0.80	0.72
85	0.95	1.10	0.75	0.70	0.86	0.63	0.80	1.10	0.65	1.10	0.85	0.85	1.33	0.60	0.71
90	0.90	0.95	0.65	0.65	0.76	0.56	0.72	1.00	0.60	0.95	0.80	0.85	1.30	0.41	0.70
95	0.87	0.80	0.55	0.60	0.60	0.43	0.70	0.90	0.50	0.80	0.75	0.70	1.25	0.25	0.67
100	0.85	0.62	0.50	0.55	0.45	0.31	0.62	0.50	0.40	0.62	0.70	0.60	1.20	0.11	0.65

4. LÁMINA DE RIEGO Y LÁMINA DE LAVADO

LAMINA DE RIEGO (LR)

Se refiere a la cantidad de agua que se aplica sobre la superficie e infiltra en el suelo. Para poder calcular la lamina de riego para un cultivo se requiere de la siguiente información del suelo a regar:

- Capacidad de campo (CC).
- Punto de marchitamiento permanente (PMP).
- Densidad aparente (Da)
- Profundidad radicular del cultivo (Pr).

CAPACIDAD DE CAMPO (CC)

Se define como el contenido de agua de la porción húmeda del suelo, después de que el exceso ha sido drenado y la velocidad del descenso disminuida en grado considerable (Veihmeyer y Hendrickson, 1931, citados por Aguilera y Martínez, 1996).

Se le denomina también “capacidad efectiva de retención de agua o contenido de humedad del suelo”, con una tensión de humedad del suelo de 0.2 a 0.3 atmósferas. (CONAGUA 2010).

PORCENTAJE DE MARCHITAMIENTO PERMANENTE (PMP)

Contenido de humedad del suelo por debajo del cual la planta no puede tomar efectivamente agua del suelo; agua contenida en el suelo con una tensión de humedad de 15 atmósferas; la humedad disponible para el cultivo en el suelo es nula.

HUMEDAD APROVECHABLE O DISPONIBLE (HA)

Cabe señalar que la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente es lo que se define como humedad aprovechable por las plantas.

La lámina de riego de pre-siembra (Lr), es aquella que deberá de tener el suelo al momento de la siembra, y es la máxima humedad que puede retener el suelo, es decir, cuando está a CC:

$$Lr = \frac{(CC - PMP) * Da * Prof}{100}$$

Donde:

Lr = Lámina de riego por aplicar (cm).

CC = Capacidad de campo del suelo (%).

PMP = Porcentaje de marchitamiento permanente (%).

Da = Densidad aparente del suelo.

Prof = Profundidad del suelo a humedecer (cm).

La lámina de auxilio (Laux) se aplicará cuando se haya consumido un determinado porcentaje de la capacidad de almacenamiento (punto crítico = Pc), es decir, antes de que el suelo llegue a PMP. Este porcentaje varía entre un 30 a 60 % en riego superficial:

$$L_{aux} = Pc * Lr$$

Con estos resultados previos, iniciamos el cálculo de cada una de las columnas del formato.

A continuación, se presentan un ejercicio para el cultivo del trigo en el valle de Mexicali, en un suelo medio.

CALCULO DE LA LÁMINA DE RIEGO (NETA).

$$Lr = \frac{(CC - PMP) * Da * Prof}{100}$$

Ejemplo:

Suelo medio arcilloso (valores para suelos del valle de Mexicali ver Cuadro 3).

- CC = 27 %
- PMP = 14.5 %
- Da = 1.20 gr/cm³
- Prof. = 90 cm

$$Lr = \frac{(27 - 14.5) * 1.2 * 90}{100} = 13.50 \text{ cm (lam. neta)}$$

REQUERIMIENTO DE LAVADO (RL)

Si la conductividad eléctrica es menor de 0.7 dS/m y las pérdidas de agua por percolación profunda son mayores a 15% de los requerimientos hídricos de los cultivos, no es necesario aplicar láminas de lavado (FAO, 1980, citado por CONAGUA 2002). Para el agua de riego con alto contenido de sales (valores de CE entre 0.7 y 3 dS/m), se requieren láminas de lavado para

mantener un contenido bajo de sales en la zona radicular. Bajo estas condiciones, el agua percolada puede ser suficiente para mantener un contenido adecuado de sales en el suelo.

En muchos textos, los términos “fracción de lavado” (FL) y “requerimiento de lavado” (RL) son usados indistintamente. Ambos se refieren a esa porción del riego que debe pasar a través de la zona radicular para controlar las sales a un nivel específico. Mientras que la FL indica que el valor está expresado como una fracción, el RL puede ser expresado como fracción o como porcentaje del agua de riego (Ayers y Westcot, 1994).

AJUSTE POR SALINIDAD.

Dadas las condiciones de salinidad del agua de riego, se debe aplicar una lámina de requerimiento de lavado.

$$RL = \frac{CEr}{(CEd - CEr)} Lr$$

Donde:

- RL = Requerimiento de lavado.
- CEr = Conductividad eléctrica del agua de riego (dS/m).
- CEd = Conductividad eléctrica deseada en el suelo (tolerancia del trigo) (dS/m).
- Lr = Lámina de riego neta en cm (calculada).

EJEMPLO PARA EL CASO DEL VALLE DE MEXICALI CON EL CULTIVO TRIGO.

Valores a utilizar:

- CEr = 1.6 dS/m (valor promedio del agua de riego superficial en el valle de Mexicali).
- CEd = 6 dS/m (tolerancia del trigo).
- Lr = 13.50 cm (calculada previamente).

$$RL = \frac{1.6}{(6.0 - 1.6)} 13.50 = 4.91 \text{ cm}$$

Calculo de la lámina de riego ajustada

$$Lr \text{ ajus.} = Lr + RL$$

Sustituyendo valores

$$Lr_{ajus.} = 13.50 + 4.91 = 18.41 \text{ cm}$$

Lamina de riego ajustada = 18.41 cm.

Cuadro 3. Constantes de humedad de los suelos del Distrito de Riego 014.

Textura	C.C. (%)	P.M.P (%)	H.A. (%)	Da (gr/cm ³)
Arenosos (ligeros); serie Meloland	18	10	8	1.50
Medio arenosos; serie Gila Fase Ligera	21	12	9	1.35
Medio arcillosos; serie Gila Fase Pesada	27	14.5	12.5	1.20
Pesados (arcillosos); serie Imperial	37	20	17	1.15

Fuente: SRH, 1966.

Cuadro 4. Tolerancia de los cultivos y su rendimiento potencial por la influencia de la salinidad del agua de riego (EC_w) o salinidad del suelo (EC_e)¹.

Cultivos	Rendimiento Potencial ²									
	100%		90%		75%		50%		0%	
	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w	"máximo" ³	
	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	8.0	5.3	10	6.7	13	8.7	18	12	28	19
Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)	7.7	5.1	9.6	6.4	13	8.4	17	12	27	18
Remolacha (<i>Beta vulgaris</i>)	7.0	4.7	8.7	5.8	11	7.5	15	10	24	16
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	6.8	4.5	7.4	5.0	8.4	5.6	9.9	6.7	13	8.7
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13	8.7	20	13
Trigo, durum (<i>Triticum turgidum</i>)	5.7	3.8	7.6	5.0	10	6.9	15	10	24	16
Caña (<i>Saccharum officinarum</i>)	1.7	1.1	3.4	2.3	5.9	4.0	10	6.8	19	12
Maíz (<i>Zea mays</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
Betabel rojo (<i>Beta vulgaris</i>)	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15	10
Brócoli (<i>Brassica oleracea abotrytis</i>)	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14	9.1
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13	8.4
Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10	6.8
Espinacas (<i>Spinacia oleracea</i>)	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15	10
Apio (<i>Apium graveolens</i>)	1.8	1.2	3.4	2.3	5.8	3.9	9.9	6.6	18	12
Repollo (<i>Brassica oleracea capitata</i>)	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12	8.1
Papas (<i>Solanum tuberosum</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Maíz dulce (elote) (<i>Zea mays</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Camote (<i>Ipomoea batatas</i>)	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	11	7.1
Pimiento (<i>Capsicum annuum</i>)	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.6	5.8
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.1	3.4	9.0	6.0
Rábano (<i>Raphanus sativus</i>)	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	8.9	5.9
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.4	5.0
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.0	8.1	5.4
Bermuda grass (<i>Cynodon dactylon</i>)	6.9	4.6	8.5	5.6	11	7.2	15	9.8	23	15
Cebada (forrajera) (<i>Hordeum vulgare</i>)	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.4	13	8.7	20	13
Ryegrass, perenne (<i>Lolium perenne</i>)	5.6	3.7	6.9	4.6	8.9	5.9	12	8.1	19	13
Sudan grass (<i>Sorghum sudanense</i>)	2.8	1.9	5.1	3.4	8.6	5.7	14	9.6	26	17
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	2.0	1.3	3.4	2.2	5.4	3.6	8.8	5.9	16	10
Palma datilera (<i>Phoenix dactylifera</i>)	4.0	2.7	6.8	4.5	11	7.3	18	12	32	21

Fuente: Ayers and Westcot, 1994.

¹ Adaptado de Mass y Hoffman (1977) y Mass (1984). Estos valores solo sirven como una guía a la tolerancia relativa de algunos cultivos. La tolerancia absoluta varía dependiendo del clima, condiciones de suelo y prácticas culturales. En suelos calcáreos, las plantas toleraran poco más de 2 dS/m, que en suelos salinos (ECe) que la indicada, pero la salinidad del agua (ECw) se mantendrá igual que la mostrada en este cuadro.

² ECe significa la salinidad promedio de la zona radicular, medida por la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo, reportado en deciSiemens por metro (dS/m) a 25°C. ECw significa la conductividad eléctrica del agua de riego en deciSiemens por metro (dS/m).

³ El rendimiento potencial cero o máximo ECe, indica la salinidad teórica del suelo ECe a la cual el cultivo detiene su desarrollo.

5. CALENDARIOS DE RIEGO

El calendario de riego, será útil para indicar al menos los siguientes puntos más importantes:

1. Número de riegos por aplicar al cultivo.
2. Intervalos entre riegos.
3. Láminas de requerimiento de riego.
4. Láminas netas de riego.

Básicamente existen dos métodos para determinar el cuándo regar mediante un calendario de riego, estos son:

- a) Método gráfico.
- b) Método analítico.

5.1. Elaboración de un calendario de riego para trigo.

Con la información y datos del Capítulo 4 se construyó el calendario de riegos del siguiente cuadro.

Cuadro 5. Calendario de riego para trigo en el valle de Mexicali, B.C.

Mes	Lamina Almac. (cm)	¹ Requerimiento Prom. Diario de riego (ET) (cm)	Periodo mensual (días)	Ciclo Vegetativo (días)	Consumido en periodo (cm)	Consumo Acum/Riego (cm)	Consumo permisible (cm)	Consumo Acum. Total (cm)	Riego No.	Intervalo de Riego (días)	Lamina de Reposición (cm)	Almacen Final (cm)
Dic.	0.00	0.000	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	1		18.41	18.41
Dic.	18.41	0.149	31	31	4.62	4.62	11.05	4.62	-			13.79
Ene	13.79	0.223	29	60	6.47	11.09	11.05	11.09	2	60	11.09	18.41
Ene	18.41	0.223	2	62	0.45	0.45	11.05	11.53	-			17.96
Feb	17.96	0.291	28	90	8.15	8.59	11.05	19.68	-			9.82
Mar	9.82	0.441	5	95	2.21	10.80	11.05	21.89	3	35	10.80	18.41
Mar	18.41	0.441	16	111	7.06	7.06	7.36	28.94	4	16	7.06	18.41
Mar	18.41	0.441	10	121	4.41	4.41	7.36	33.35	-			14.00
Abr	14.00	0.572	5	126	2.86	7.27	7.36	36.21	5	15	7.27	18.41
Abr	18.41	0.572	13	139	7.44	7.44	7.36	43.65	6	13	7.44	18.41
								62.06			62.06	

¹El Requerimiento Diario de Riego se refiere al valor de la ET, dato que para este caso no se calculó; se tomó el valor de la ET para el ciclo agrícola O-I 2010-2011 de la estación agroclimática del SIMARBC, ubicada en el campo experimental del ICA-UABC ejido Nuevo Leon, B.C.

Nota:

Lamina de riego en siembra = 18.41 cm.

Lamina auxilio 1 = 11.05 cm (aplicar riego al consumirse el 60% de la humedad del suelo).

Lamina auxilio 2. 7.36 cm (a partir de etapa de encañe-floración aplicar riego al consumirse 40% de la humedad).

6. EL AGUA DE RIEGO.

6.1. Pertinencia entre el uso eficiente del agua de riego y la ET.

En relación a la pertinencia entre el uso eficiente del agua de riego y el valor de evapotranspiración (ET) es importante señalar que, mejorando el manejo y la uniformidad de riego, el crecimiento del cultivo y la ET será más uniforme, y el valor de ésta será mayor; a más crecimiento uniforme del cultivo y menor estrés hídrico, el valor de la ET se incrementa (Burt, 2012).

Está documentado que mientras la aplicación de agua en campo es a veces reducida por hectárea con goteo, la ET se incrementa en cultivos regados con este sistema. Este hecho de ET elevado con riego por goteo definitivamente no es un argumento en contra del uso de riego por goteo ya que mejorará la producción por hectárea y por unidad de agua consumida.

Burt (2012) analizó 1,289 predios de los Módulos de Riego 10, 11 y 12 del valle de Mexicali, para determinar el porcentaje acumulativo de la evapotranspiración actual, del ciclo agrícola 2006-2007 de los cultivos de algodón, alfalfa y trigo. Los predios fueron ordenados por cada uno de los tres cultivos, del mayor al menor valor de evapotranspiración promedio.

Para efectos de comparación, el porcentaje acumulado de evapotranspiración potencial “no estresada” se presenta en las Figuras 10, 11 y 12. En las gráficas se presenta la ET acumulada

de los cultivos y la ET en una situación ideal donde hubiere planeación de riego perfecta, buena uniformidad vegetal, y sin estrés hídrico.

Para alfalfa y algodón, la ETc potencial sin estrés fue obtenida de una evaluación de evapotranspiración potencial en el Valle Imperial. Para trigo, algunos predios del valle de Mexicali fueron analizados y presentaban valores altos de Kc durante la temporada de crecimiento y tenían una evapotranspiración mínima fuera de temporada. La evapotranspiración potencial estimada para alfalfa, algodón y trigo fueron 1,590 mm, 1,080 mm, y 900 mm respectivamente.

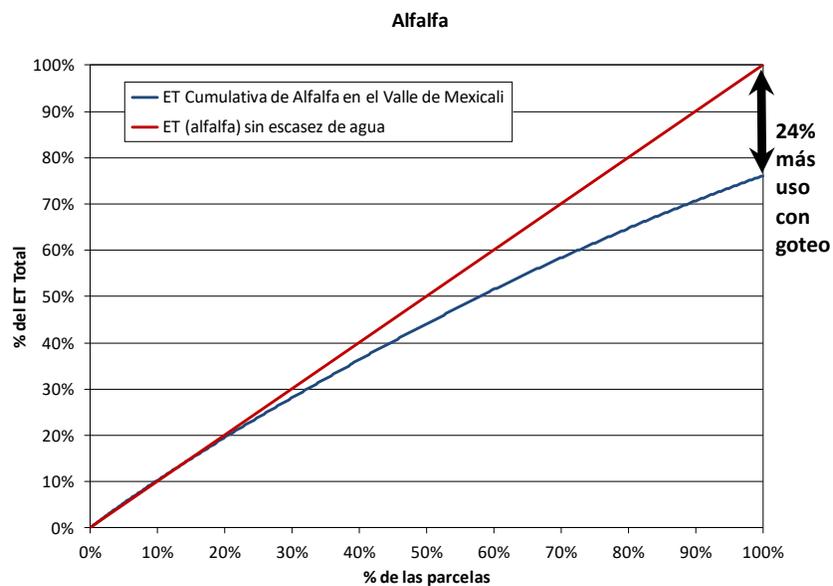


Figura 9. Comparación de evapotranspiración relativa sin estrés y relativa actual, del cultivo de alfalfa en una muestra de predios de los Módulos de Riego 10, 11 y 12.

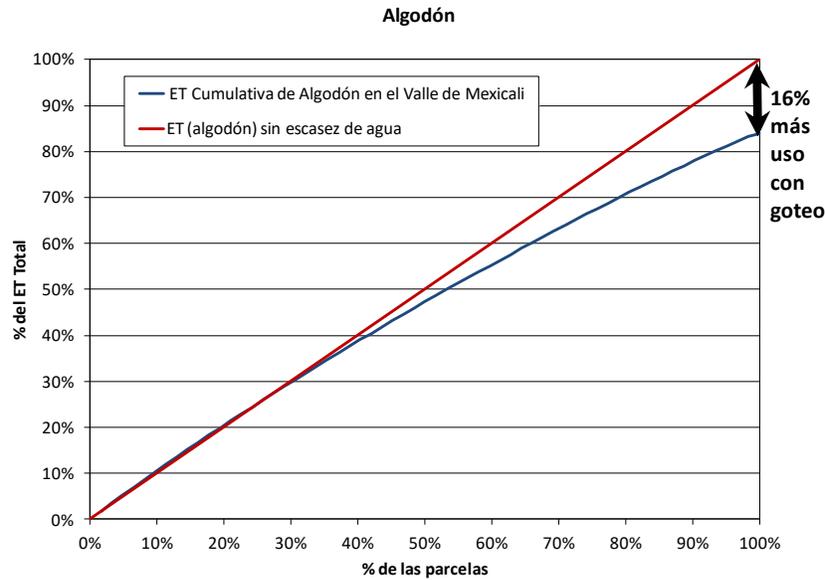


Figura 10. Comparación de evapotranspiración relativa sin estrés y relativa actual, del cultivo de algodón en una muestra de predios de los Módulos de Riego 10, 11 y 12.

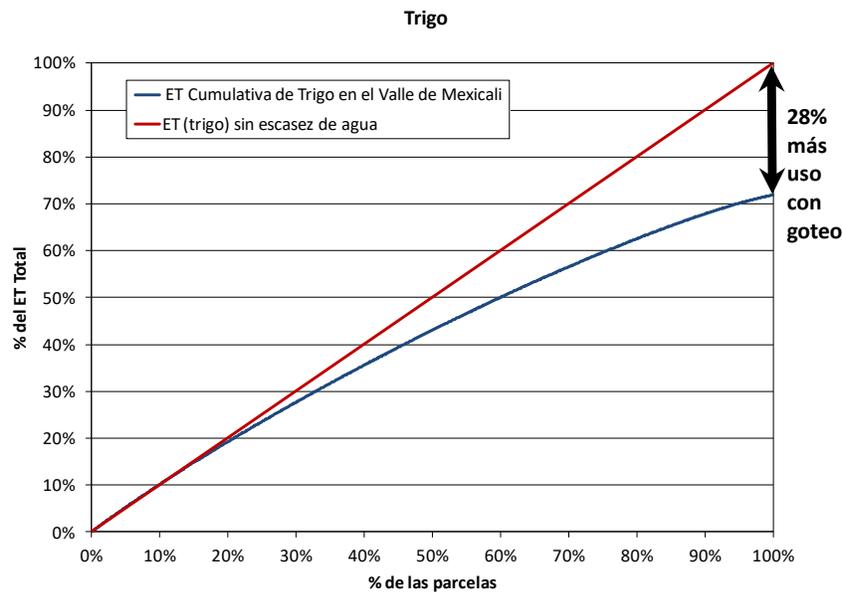


Figura 11. Comparación de evapotranspiración relativa sin estrés y relativa actual, del cultivo de trigo en una muestra de predios de los Módulos de Riego 10, 11 y 12.

Los resultados de esta evaluación muestran que si estos cultivos hubieran sido desarrollados sin estrés hídrico durante la etapa de crecimiento, se hubiera requerido de más agua en su ciclo. Sin estrés la alfalfa, el algodón y el trigo requirieran un total aproximado de 24%, 16% y 28% más agua que la que se aplicó en el periodo de evaluación (Burt, 2012).

6.2. Implicaciones prácticas para programar los riegos en función de la respuesta del trigo al estrés hídrico.

De acuerdo a la información presentada por Burt (2012), en la evaluación del comportamiento del trigo en los Módulos de Riego 10, 11 y 12 del valle de Mexicali, en relación la consumo real de agua por este cultivo, en el periodo analizado, es claro que el requerimiento de agua del trigo corresponde a una lamina de riego de 900 mm.

El método de siembra en el valle de Mexicali es en melgas y habría que considerar cambiar a siembra en surcos, con la finalidad de ser más eficientes en el uso del agua de riego y de sembrar el trigo en el lomo del surco a fin de que las sales solubles se concentren en la cresta el mismo (Figura 12).

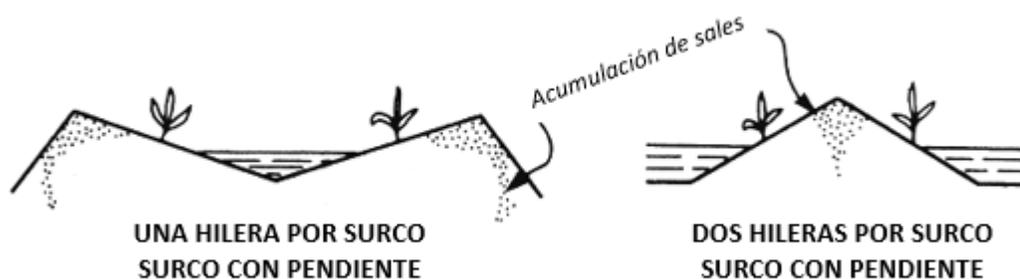


Figura 12. Control de salinidad utilizando siembra en surcos (tomado de Ayers and Westcot, 1994).

Es importante no perder de vista que la etapa del trigo más susceptible al déficit de humedad, es la etapa reproductiva, por lo que se debe considerar no estresar al cultivo a partir de la etapa de encañe.

En este aspecto es sumamente importante considerar el tipo de suelo, ya que en el valle de Mexicali se tienen algunas zonas con un perfil del suelo con altos contenidos de arcilla y mal drenaje, por tal razón en estos suelos se requiere de la aplicación de riegos ligeros a fin de no saturar los por un tiempo prolongado.

6.3. Función de respuesta en la producción, relacionada con el estrés hídrico.

La función de producción del agua de riego, es la relación entre la producción de los cultivos y el régimen de humedad del suelo.

Según Kirkegaard *et al.* (2007), citado por Inzunza *et al.* (2010), esta función de producción es resultado de un análisis empírico que permite maximizar el rendimiento de los cultivos con la

aplicación óptima del agua de riego, y cuando no es posible aplicar la lámina de riego óptima se maximiza la productividad media del agua con una lámina de riego restringida.

Hay muchos trabajos relativos a este tema, uno que expresa de manera clara la función de respuesta es el que, en el 2005, Inzunza *et al.* llevó a cabo en Gómez Palacio, Durango, México, con la finalidad de determinar la función de respuesta del trigo al régimen de humedad del suelo. Para lo anterior, el cultivo se expuso a condiciones de estrés hídrico mediante el abatimiento controlado de la humedad disponible del suelo en dos períodos de desarrollo de trigo:

- a) Etapa vegetativa, que comprende desde la siembra del cultivo hasta inicio de floración, y
- b) Reproductiva, va del inicio de floración a madurez fisiológica.

Como resultado de este trabajo, al realizar el análisis de regresión, entre el rendimiento de grano y el régimen de humedad del suelo, se encontró que el modelo polinomial de segundo grado se ajusta satisfactoriamente a los datos observados con una $R^2 = 0.85$ y un $CV = 18.9\%$ por la ecuación:

$$R_g = 4.239 - 5.962T_1 - 0.980T_2 - 5.377T_1^2 - 2.308T_2^2 + 0.917T_1T_2$$

Donde:

R_g = Rendimiento de grano (Mg ha⁻¹).

T_1 = Tensión de humedad del suelo en la etapa vegetativa (MPa).

T_2 = Tensión de humedad del suelo en la etapa reproductiva (MPa).

Con el modelo de la ecuación anterior es posible decidir cuándo se requiere regar y, de forma indirecta, la cantidad de riego para maximizar la producción del cultivo del trigo. En cambio, al relacionar el rendimiento de grano observado con el correspondiente consumo de agua o evapotranspiración de la primera (ET_1) y la segunda etapa (ET_2) se obtiene un modelo de producción de grano que permite optimizar el consumo de agua o evapotranspiración que el trigo debe consumir para maximizar el rendimiento de grano del cultivo para alcanzar su máximo rendimiento por unidad de superficie.

Al realizar el análisis de regresión para estas variables, se obtuvo que el modelo polinomial de segundo grado explica en forma satisfactoria dicha relación (Figura 14).

La función ajustada, con $R^2 = 0.93$ y $CV = 13.2\%$ está representada por la ecuación:

$$R_g = 42.423 + 0.474ET_1 + 1.982ET_2 - 0.01ET_1^2 - 0.025ET_2^2 + 0.004ET_1ET_2$$

Donde:

R_g = Rendimiento de grano ($Mg\ ha^{-1}$).

ET_1 = Consumo de agua o evapotranspiración durante la etapa vegetativa (cm).

ET_2 = Consumo de agua o evapotranspiración en la etapa reproductiva (cm).

R^2 = Coeficiente de determinación de la regresión.

CV = Coeficiente de variación (%).

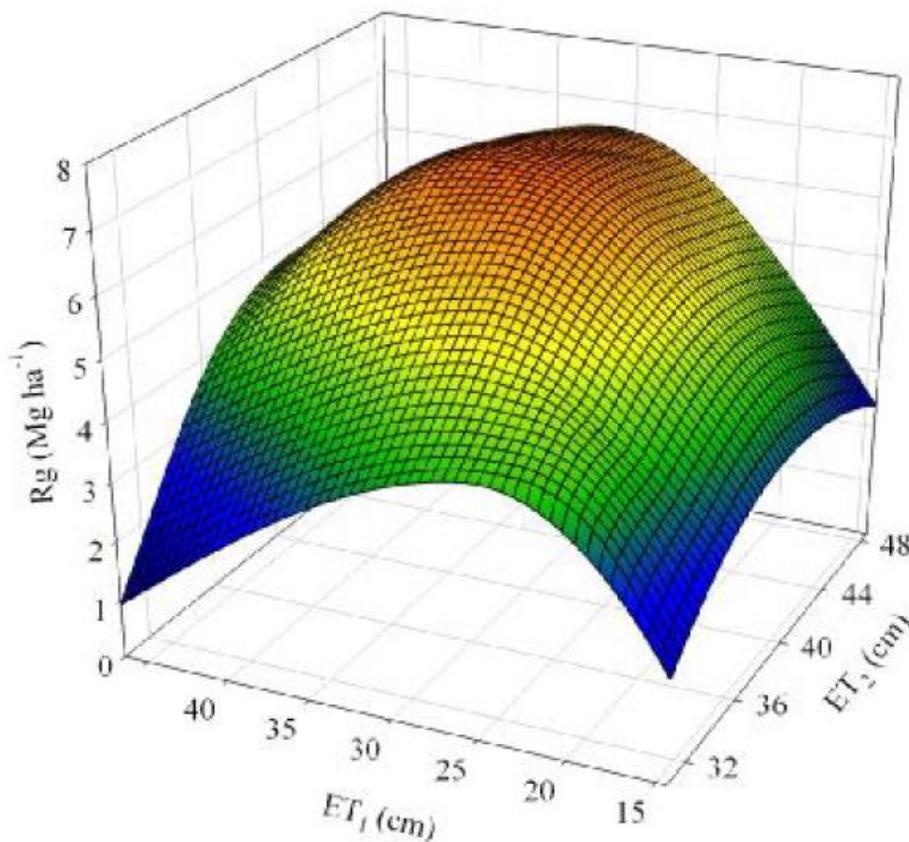


Figura 13. Rendimiento de grano (R_g) de trigo predicho por el modelo, entre ésta variable y la evapotranspiración real en cada tratamiento ensayado.

En la figura anterior ET_1 , ET_2 = consumo de agua por el trigo en el periodo fenológico de siembra a inicio de floración y de inicio de floración a madurez fisiológica, respectivamente.

De acuerdo al análisis de varianza, la regresión resulta ser altamente significativa así como los coeficientes de regresión del modelo ajustado, por lo que se concluye que las variables

independientes seleccionadas explican satisfactoriamente la respuesta del trigo a diferentes consumos de agua por el cultivo.

En relación al índice de área foliar (IAF) por tratamiento, se apreciaron diferencias entre tratamientos a partir del segundo muestreo 52 días después de la siembra. En general, los tratamientos con los mayores IAF fueron los que se desarrollaron bajo condiciones no restrictivas de humedad del suelo, y los menores fueron los sometidos a déficit hídrico severo. Los tratamientos con condiciones de humedad de $-0.051-0.051$, $-0.051-0.76$ y $-0.051-1.469$ fueron los que mostraron los más altos IAF durante todo el desarrollo

Las conclusiones del trabajo de Inzunza, *et al.* (2005), son las siguientes

- a) Los modelos que representaron la respuesta del trigo al régimen de humedad edáfico y a la evapotranspiración fueron funciones cuadráticas, y se observaron que el rendimiento de grano disminuyó bajo condiciones deficientes como excesivas de humedad en el suelo.
- b) Con base en la optimización de la función de respuesta de grano del trigo al régimen de humedad en el suelo, el cultivo debe ser irrigado con -0.58 y -0.33 MPa de tensión de humedad del suelo en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente, para maximizar el rendimiento.
- c) Con la función que relaciona la producción de grano con el agua de riego, se obtuvo que el trigo alcanza el rendimiento de grano máximo (7.1 Mg ha^{-1}), cuando evapotranspira 33.1 cm durante la etapa vegetativa y 42.1 cm en la etapa reproductiva, lo que indica mayor sensibilidad al estrés hídrico en esta última etapa fenológica.
- d) Los tratamientos de mayor rendimiento de grano no coincidieron con el mayor índice de área foliar ni con aquellos desarrollados bajo condiciones no restrictivas de humedad lo que es frecuente que suceda para cereales.

6.4. Relación entre el estrés hídrico y el salino para los suelos del valle de Mexicali.

La presencia de sales en el suelo tiene como consecuencia que éste realice una mayor esfuerzo para tomar el agua a través de sus raíces, para una mejor explicación habrá que decir que cuando el suelo queda a su máxima capacidad de retención de humedad se encuentra a Capacidad de Campo, y el agua queda retenida en el suelo debido a la acción de las siguientes dos fuerzas.

1. Tensión superficial, y
2. Fuerza de adsorción.

A la suma de estas dos fuerzas se le llama tensión de humedad del suelo (THS). Estas fuerzas de tensión se oponen a la fuerza de adsorción de las raíces de las plantas, pero éstas a su vez para absorber el agua del suelo tienen que vencer a otra fuerza, que es;

3. La presión osmótica; según Devlin (1976) citado por Aguilera y Martínez (1996), se puede definir como “la presión necesaria para contrarrestar el paso de agua pura al interior de una solución acuosa a través de una membrana semipermeable, evitando así un incremento en el volumen de la solución”.

Lo mismo sucede con las sales en solución existentes en el suelo, por lo que la raíz para absorber el agua tiene que vencer a la THS y a la presión osmótica (PO) debido a la presencia de sales. Esta es la condición de los cultivos en el valle de Mexicali.

A la suma de las fuerzas de tensión, más la presión osmótica se le llama Esfuerzo de Humedad del Suelo (EHS), el cual define el potencial de humedad, y se expresa de la siguiente manera.

$$EHS = PO + T$$

Donde;

EHS = Esfuerzo de humedad del suelo (atm).

PO = Presión osmótica (atm).

T = Tensión (atm).

El efecto acumulativo de la tensión de humedad del suelo y de la presión osmótica, resulta en una reducción importante de la disponibilidad de agua para los cultivos, a medida que se incrementa la salinidad, esto se puede observar en la Figura 15, elaborada por Ayers and Westcot (1994). Los efectos por salinidad son análogos que aquellos por sequía, y ambos reducen el crecimiento de los cultivos.

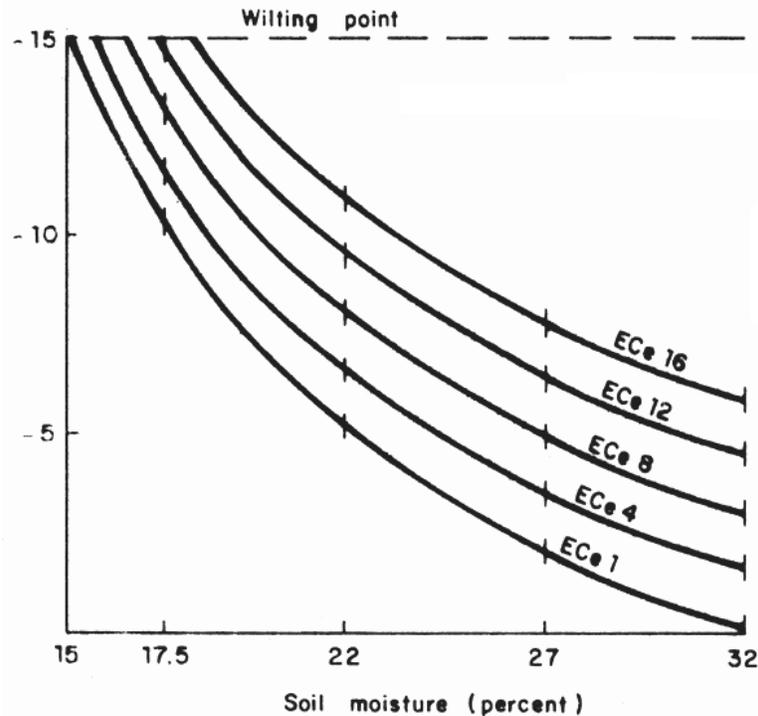


Figura 14. Curva de retención de humedad del suelo, para un suelo arcillo-limoso con diferentes grados de salinidad (EC_e) (Ayers and Westcot, 1994).

En la grafica anterior se aprecia que cuando el suelo pierde humedad, el esfuerzo de humedad del suelo se incrementa, y es mayor medida que la concentración de sales aumenta.

Al igual que Aguilera y Martínez (1996), y que Ayers and Westcot (1994), Rhoades (1990) comenta que la salinidad excesiva en la zona radicular reduce la velocidad de crecimiento de la planta. La mejor hipótesis en este sentido parece ser la que indica que la planta necesita incrementar su uso de energía para tomar el agua presente en el suelo, y hacer los ajustes bioquímicos necesarios para sobrevivir. Esta energía es desviada del proceso responsable del crecimiento de la planta y de su rendimiento, incluyendo el alargamiento celular y la síntesis de compuestos metabólicos y estructurales.

En consecuencia, los diversos efectos observados a distinta escala, desde reducción de turgencia y crecimiento hasta la pérdida de la estructura celular por desorganización de membranas e inhibición de la actividad enzimática, son el producto combinado de estrés hídrico, toxicidad iónica y desequilibrio nutricional, (Leidiy Pardo, 2002).

Típicamente, el crecimiento es suspendido cuando el valor del umbral de la salinidad es excedido. Este valor del umbral depende del cultivo, factores ambientales externos como temperatura, humedad relativa, o velocidad del viento y el potencial para suministrar agua a la

zona radicular. El crecimiento de la planta disminuye de una manera más o menos lineal a medida que se incrementa la salinidad del suelo, hasta que la planta muere, (Maas y Hoffman, 1977, citados por Rhoades, 1990). Tanto los autores citados anteriormente como Grattan y Hanson (1993) indican que la relación entre el rendimiento relativo y la salinidad del suelo es usualmente descrito por la siguiente ecuación:

$$Y_r = 100 - B (CE_e - A)$$

Donde:

Y_r = rendimiento relativo del cultivo (%), cultivado bajo condiciones de salinidad.

A = valor del umbral (dS/m) de la salinidad del suelo a la cual el rendimiento empieza a decrecer, o salinidad máxima en la zona radicular a la cual se tiene el 100% de rendimiento.

B = pendiente de la recta de la regresión lineal (porcentaje de reducción en rendimiento relativo por incremento en la salinidad del suelo (dS/m).

CE_e = promedio de la salinidad del suelo en la zona radicular (dS/m).

La ecuación anterior asume que los cultivos responden primeramente al potencial osmótico de la solución del suelo. Valores de A y B para varios tipos de cultivos se presentan en el Cuadro 6.

Se debe hacer énfasis en que estos valores representan la respuesta del cultivo bajo condiciones experimentales, la CE_e refleja el promedio de la salinidad en la zona radicular que el cultivo encuentra durante la mayoría de la temporada, después de haber sido establecido bajo condiciones de no salinidad.

Cuadro 6. Tolerancia de varios cultivos a la salinidad del suelo¹.

CULTIVO	UMBRAL DE SALINIDAD (dS/m) A	PENDIENTE (dS/m) B	¹ CLASIFICACION
Fibras y granos			
Algodón	7.7	5.2	T
Arroz	3.0	12.0	S
Cacahuete	3.2	29.0	MS
Caña de azúcar	1.7	5.9	MS
Cebada	8.0	5.0	T
Centeno	11.4	10.8	T
Frijol	1.0	19.0	S
Maíz	1.7	12.0	MS
Remolacha	7.0	5.9	T
Sorgo	6.8	16.0	MT
Soya	5.0	20.0	MT
Trigo	6.0	7.1	MT
Trigo (semi-enano)	8.6	3.0	T
Trigo, duro	5.9	3.8	T
Forrajes			
Alfalfa	2.0	7.3	MS
Cebada forrajera	6.0	7.1	MT
Bermuda (zacate)	6.9	6.4	T
Maíz, forraje	1.8	7.4	MS
Ryegrass	5.6	7.6	MT
Sesbania	2.3	7.0	MS
Sudán	2.8	4.3	MT
Hortalizas y frutas			
Ajo	3.0	17.0	S
Apio	1.8	6.2	MS
Betabel, rojo	4.0	9.0	MT
Brocoli	2.8	9.2	MS
Cebolla	1.2	16.0	S
Espárrago	4.1	2.0	T
Lechuga	1.3	13.0	MS
Maíz, dulce	1.7	12.0	MS
Pepino	2.5	13.0	MS
Repollo	1.8	9.7	MS

Fuente: Grattan y Hanson (1993).

¹S = Sensible; MS = Moderadamente Sensible; MT = Moderadamente Tolerante; T = Tolerante.

7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aguilera, C.M. y Martínez, E.R., 1996. Relaciones agua, suelo, planta, atmósfera. Universidad Autónoma de Chapingo, México. Cuarta Edición.
- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. 1994. Water quality for agriculture. University of California Davis, California, USA. and D.W. Westcot California Regional Water Quality Control Board Sacramento, California, USA. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1.
- Burt, C.M. 2012. Mexicali Valley water study. Irrigation Training and Research Center. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, California. USA. *Documento Inédito*.
- Cisneros, A.R. 2003. Apuntes de la materia de riego y drenaje. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado y Área de Agro geodésica.
- Consejo Estatal de Población (CONEPO). 1992. Gobierno del Estado de Baja California, Secretaría General de Gobierno. Baja California y sus Municipios.
- Comision Nacional del Agua, Peninsula de Baja California(CONAGUA). Marzo 2010. Taller de Capacitacion. Asistencia Técnica en Riego: Como, cuando y cuanto regar. Mexicali, B.C. México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2005. Propuesta de tecnificación para mitigar los efectos del revestimiento del canal todo americano en territorio mexicano. México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2002. Manual para la elaboración y revisión de proyectos ejecutivos de sistemas de riego parcelarios. México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 1994. Calidad del Agua del Acuífero del Valle de Mexicali. Gerencia Estatal Baja California. México.
- Grattan, S. and Hanson, B., 1993. Agricultural Salinity and Drainage. University of California, Irrigation Program. University of California. Davis, California.
- Inzunza, I.M.C., Catalán, V.E.A., Sánchez, C.I., Villa, C.A. y Román, L.A., 2010. Modelo de producción de trigo bajo déficit hídrico en dos períodos de crecimiento. Terra Latinoamericana, vol. 28, núm. 4, pp. 335-344. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Leidi, E.O. y ¹Pardo, J.M. 2002. Tolerancia de los cultivos al estrés salino: que hay de nuevo. Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias, Secretaría de

Investigaciones, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, N° II; <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Investigacion/revista/rev2/5.htm>. ¹Departamento de Biología Vegetal, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, España. www.produccion-animal.com.ar

López, L.A., 1991. Evolución de la calidad del agua del acuífero del valle de Mexicali. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto de Investigaciones en Agricultura y Ganadería. Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México.

Navarro U.J.A., 1998. Impacto del revestimiento del canal Todo Americano en el distrito de riego 014, río Colorado. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma de Baja California.

Rhoades, J. D., 1990. Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers. Manual and Reports on Engineering Practice No. 71. New York, N. Y. U.S.A.

Ruíz, C. J. 1995. Aprovechamiento de Agua Residual Tratada para Riego de Trigo (*Triticum vulgare* L.) en el valle de Mexicali, B. C. Tesis de Maestría en Uso y Manejo del Agua de Riego en Zonas Áridas. Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. México.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). 1966. Laminas de riego en las diferentes series del Distrito. Dirección General de Distritos de Riego. Distrito de Riego del Río Colorado.

Sistema de Información para el Manejo del Agua de Riego en el estado de Baja California (SIMARBC). 2009. Centro de Investigación Regional del Noroeste. Campo Experimental Valle de Mexicali, México. Folleto Informativo No. 1. www.sfa.gob.mx/simarbc/