

Impact of crop sensitivity to water stress in rain feed areas of Mexico

Impacto de la sensibilidad al estrés hídrico en el rendimiento de los cultivos en zonas de temporal deficiente en México

Sánchez-Cohen Ignacio*; Bueno-Hurtado Palmira; Esquivel-Arriaga Gerardo; Velásquez-Valle Miguel A.

¹Centro Nacional de Investigaciones Disciplinarias en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. km 6.5 Canal Sacramento Zona Industrial, Gómez Palacio, Durango. MÉXICO. Apartado Postal 41, Cd. Lerdo, Durango. C. P. 3840. Correo-e: sanchez.ignacio@inifap.gob.mx (*Autor para correspondencia)

Abstract

The low and erratic rainfall in rainfed areas in Mexico, categorizes the production systems in these areas as high risk. This leads to the need for improved agricultural planning in order to increase productivity of rainfall. In this study, we proposed a method to characterize crop sensitivity to water stress and its impact on crop's yield. The method uses functions of water stress index (WSI) based on water balance ($P_p - E_t$) from where crop sensitivity (λ) and the impact on relative yield it is deduced. We found that maize is the crop with the less sensitivity to water stress in all its stages of development; on the other hand, beans shows an evident sensitivity in all its stages of development. For all the crops analyzed, the stage of development shows the highest sensitivity to water deficit. In addition, we found the accumulative effect to water stress in all the stages of crop development. We consider that the method may be useful in the planning process of impact amelioration.

Keywords: Water stress, model, deficit, arid lands.

Resumen

La escasa y errática precipitación pluvial en zonas de temporal en México, cataloga a los sistemas productivos de estas zonas como de alto riesgo. Esto conlleva a la necesidad de una mejor planificación agrícola con el objetivo de incrementar la productividad del agua de lluvia. En el presente trabajo se propone un método de cuantificación de sensibilidad al estrés hídrico y su vinculación con el rendimiento de los cultivos. El método utiliza funciones de índice de estrés hídrico (IEH) en los cultivos que se fundamenta en el balance de agua ($P_p - E_t$) de donde posteriormente se deduce la sensibilidad (λ) y el impacto en el rendimiento relativo (de los cultivos). Se encontró que, para los cultivos analizados, el maíz es el que presenta menos sensibilidad al estrés hídrico en todas sus etapas, contrario al frijol que presenta marcada sensibilidad al déficit. En todos los cultivos evaluados la etapa vegetativa del desarrollo mostró la mayor sensibilidad o impacto al déficit hídrico. También se constató el efecto acumulativo del estrés hídrico en las distintas etapas del crecimiento de los cultivos. Se considera que el método es útil en los procesos de planeación de mecanismos de mitigación de impacto.

Palabras clave: Estrés hídrico, modelo, déficit, zonas áridas.

Introduction

The ability of ecosystems to produce consumer goods is determined by climatic and physical environmental variables such as precipitation, soil type, temperature, elevation, etc. In arid ecosystems, climatic variables become relevant and rainfall defines the productive capacity and productive potential of crops.

In agricultural production, drought can be defined as a period of abnormally dry weather causing serious impacts on the water balance of the area considered. It is characterized by high temperatures and lack of precipitation with large economic impacts. In these production systems the seasonality of precipitation is more important than the total volume in a given time, i.e., the time that happens, it can coincide with periods of maximum demand of crops or production process, or be out phase giving the category of risky areas. As a result, climate history is the basis for forecasting future expected scenarios under which it can develop soil moisture balance and thus be in a position to meet the expected crop yields.

In this situation, rational starting point for proper planning of agriculture is formed by the soil moisture balance in order to be in a position to obtain an objective assessment of the productive risk under conditions of climate variability.

For quantification of potential yield of crops under water stress in rainfed areas, it is necessary to perform the ex ante soil moisture balance regarding rainfall as random variable defining the crop yield. This analysis requires knowing the production history of the area of interest to have the possibility of calibrating the process approximation method. Also, it is necessary to establish a balance simulation scheme having as input variable the rainfall defined in its amount and variability and the impact on crop yields.

Aim of the study

The aim of the study was to propose a method to characterize crop sensitivity to water stress, at different development stages, and its impact on crop's yield.

Materials and methods

To characterize the potential yield of the crop species, we need to know the agro climatic requirements of the crop to achieve the genetic crop yield potential. For example, Figure 1 shows the overall concept of the variables involved in the quantification of the productive potential of crops.

In rainfed areas, rainfall is the variable that most restricts crop production; so when the availability of

Introducción

La capacidad de los ecosistemas para producir bienes de consumo está determinada por variables físicas y climáticas del medio como: precipitación, tipo de suelo, temperatura, elevación, etc. En ecosistemas áridos las variables climáticas adquieren relevancia y dentro de éstas la precipitación pluvial define por mucho la capacidad productiva o potencial productivo de las especies cultivadas.

En la producción agrícola, una sequía puede ser definida como un periodo de clima seco anormal que causa serios impactos en el balance de agua del área considerada. Se caracteriza por temperaturas elevadas y falta de precipitación con impactos económicos de magnitud. En estos sistemas productivos más importante que el volumen total de precipitación en un tiempo determinado, es la estacionalidad de ésta, es decir, la época en que ocurre, misma que puede coincidir con etapas de máximo requerimiento de los cultivos o proceso productivo, o bien estar desfasado lo que le imprimiría la categoría de riesgo. En consecuencia, el historial del clima es la base para prever los escenarios futuros esperados bajo los cuales se puede desarrollar el balance de humedad y así estar en posibilidades de conocer el rendimiento esperado de los cultivos.

En esta tesitura, el punto racional de partida para una adecuada planeación de la agricultura lo constituye el balance de humedad en el suelo para estar en posibilidades de obtener una apreciación objetiva del riesgo productivo bajo condiciones de variabilidad climática.

Para la cuantificación del rendimiento potencial de cultivos sometidos a estrés hídrico en zonas de temporal, es necesario entonces, realizar el balance de humedad ex ante considerando a la precipitación como variable aleatoria que define por mucho el rendimiento de los cultivos. Este análisis requiere de conocer el historial productivo de la zona de interés para estar en posibilidades de calibrar el método de aproximación del proceso. También, es necesario establecer un esquema de simulación del balance teniendo como variable de entrada a la precipitación pluvial definida en su variabilidad y cantidad y el impacto en el rendimiento de los cultivos.

Objetivo

El objetivo del trabajo ha sido proponer un método para la cuantificación del impacto en el rendimiento de los cultivos a través de la sensibilidad al estrés hídrico en sus distintas etapas de desarrollo.

Materiales y métodos

Para la cuantificación del rendimiento potencial de las especies cultivadas, es necesario conocer el

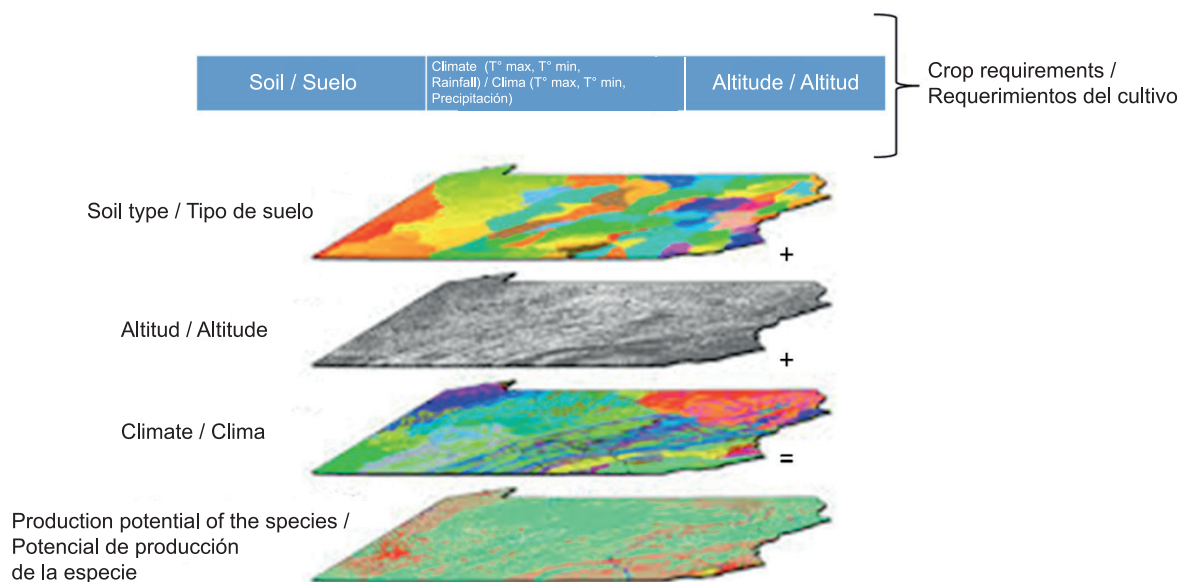


Figure 1. Basic information to determine the production potential of crops.

Figura 1. Información básica para la determinación del potencial productivo de cultivos.

rain is not enough to supply the water needs of crops, it is necessary to enter new schemes to increase the likelihood of more production (Sánchez, 2005; Sánchez *et al.*, 2013; Sánchez *et al.*, 2014).

One of these schemes is to study the potential of agro climatic of the region to produce new species. For a study of the productive potential of a species, we require two basic processes:

- a) the precise definition of agro-ecological requirements of the crop of interest and
- b) the contrast between them and the conditions offered by the environment of a specific place (Díaz *et al.*, 2012).

To the extent that the requirements of crops vs the offer of the nature (rainfall, temperature, soil type) are different, to that extent the production potential is reduced. Figure 2 indicates the threshold of the variables involved in the definition of this potential for different crops in San Luis del Cordero, Durango. In this figure we can see that for optimum crop development (e.g. garlic) it is adapted to a wide variability of heights above sea level so this variable does not restrict its production; regarding rainfall during the growing season, for optimum production, it requires an amount greater or equal to 700 mm and less than 1,600 mm; crop also requires mean temperature greater or equal to 15 °C and less than or equal to 20 °C. Garlic is adapted to a wide variability of soils having good drainage. The optimum potential is reduced if there is excess or deficit (to the right of the optimum value on the graph) or deficits (to the left of the optimal value). Thus, each

requerimiento agro climático que tiene que ser satisfecho para lograr el potencial genético en el rendimiento de la especie. Por ejemplo, en la Figura 1 muestra el concepto global de las variables que intervienen en la cuantificación del potencial productivo de los cultivos.

En zonas de temporal la precipitación pluvial es la variable que más restringe la producción de cultivos; así, cuando esta disponibilidad de lluvia no es suficiente para abastecer el requerimiento hídrico de los cultivos, es necesario incursionar en nuevos esquemas que permitan incrementar la probabilidad para obtener mayor producción (Sánchez, 2005; Sánchez *et al.*, 2013; Sánchez *et al.*, 2014).

Uno de esos esquemas es el estudio de la potencialidad agro climática de la región para producir nuevas especies. Para realizar un estudio de potencial productivo de una especie se requieren de dos procesos básicos:

- a) la definición precisa de los requerimientos agroecológicos del cultivo de interés y
- b) el contraste de éstos con las condiciones que oferta el medio ambiente de un lugar específico (Díaz *et al.*, 2012).

En la medida que los requerimientos de los cultivos vs la oferta de la naturaleza (precipitación pluvial, temperaturas, tipo de suelo) se separan, en esa medida el potencial de producción se reduce. La Figura 2 señala los umbrales de las variables que intervienen en la definición de este potencial para diferentes cultivos del municipio de San Luis del Cordero en el estado de

crop has its specific requirements to which they respond according to the availability of each of them.

In terms of agricultural planning, it is desirable to have information that will lay a platform for decision making, in this sense, the ex ante quantification of the probable crop yield in rainfed areas, is a solid foundation to support courses of action that should be taken in order to avoid the risk imposed by climate variability, (Sánchez-Cohen *et al.*, 2015).

The method proposed to quantify the relative yield is a modification to that proposed by FAO (Allen, 1988) subsequently modified by Bootsma *et al.* (1994).

$$\left(1 - \frac{Ra}{Rp}\right) = ky \left(1 - \frac{Eta}{Etm}\right) \quad (1)$$

In the above equation, Ra and Rp are the current yield and potential yield respectively, while Eta and Etm are the actual evapotranspiration and maximum evapotranspiration, respectively (Doorembos and Kassam, 1979). Etm represents evapotranspiration under non-limiting moisture conditions for the crop. However, the use of equation 1 has resulted in yield overestimates for some crops like maize (Sánchez *et al.*, 2013).

Durango. En esta figura se puede apreciar que para el óptimo desarrollo del cultivo (ejemplo, ajo) éste se adecúa a una gran variabilidad de alturas sobre el nivel del mar por lo cual esta variable no restringe su producción; relativo a la precipitación pluvial durante el ciclo de cultivo, para una óptima producción, éste requiere de una cantidad mayor o igual a 700 mm y menor de 1,600 mm; también el cultivo requiere de una temperatura media mayor o igual a 15 °C y menor o igual a 20 °C. El ajo se adapta a una gran variabilidad de suelos pero con tendencia al buen drenaje. Este potencial óptimo se reducirá si existen excesos (hacia la derecha del valor óptimo en la gráfica) o déficits (hacia la izquierda del valor óptimo). Así, cada cultivo tiene sus requerimientos específicos a los que responde en función de la disponibilidad de cada uno de ellos.

En términos de planeación agropecuaria, es deseable contar con información que permita sentar una plataforma de toma de decisiones, en este sentido, la cuantificación ex ante del rendimiento probable de los cultivos en zonas de temporal, constituye un fundamento sólido como apoyo a los cursos de acción que se habrían de tomar en aras de evadir el riesgo impuesto por la variabilidad climática, (Sánchez-Cohen *et al.*, 2015).

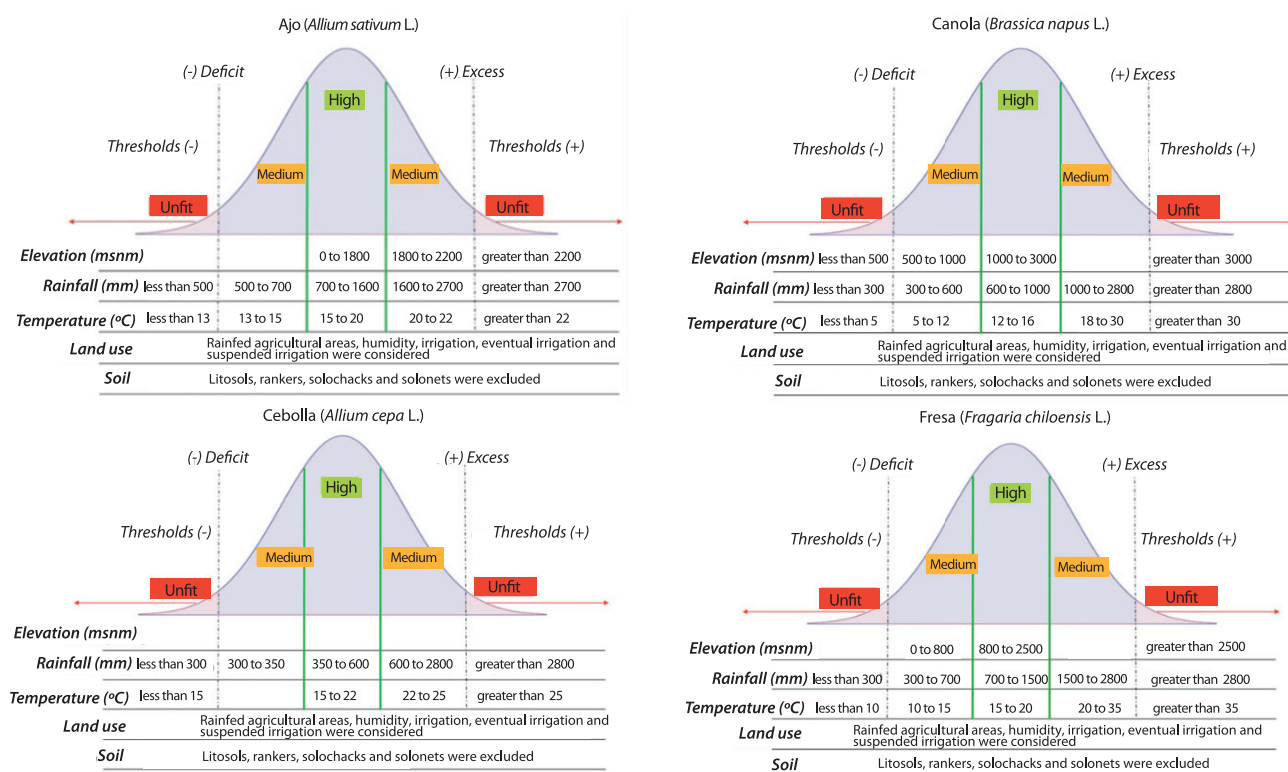


Figure 2. Agro climatic thresholds for four crops in the rainfed area of the municipality of San Luis del Cordero in Durango, in the sense of clockwise: Garlic, Canola, Strawberry and Onion.

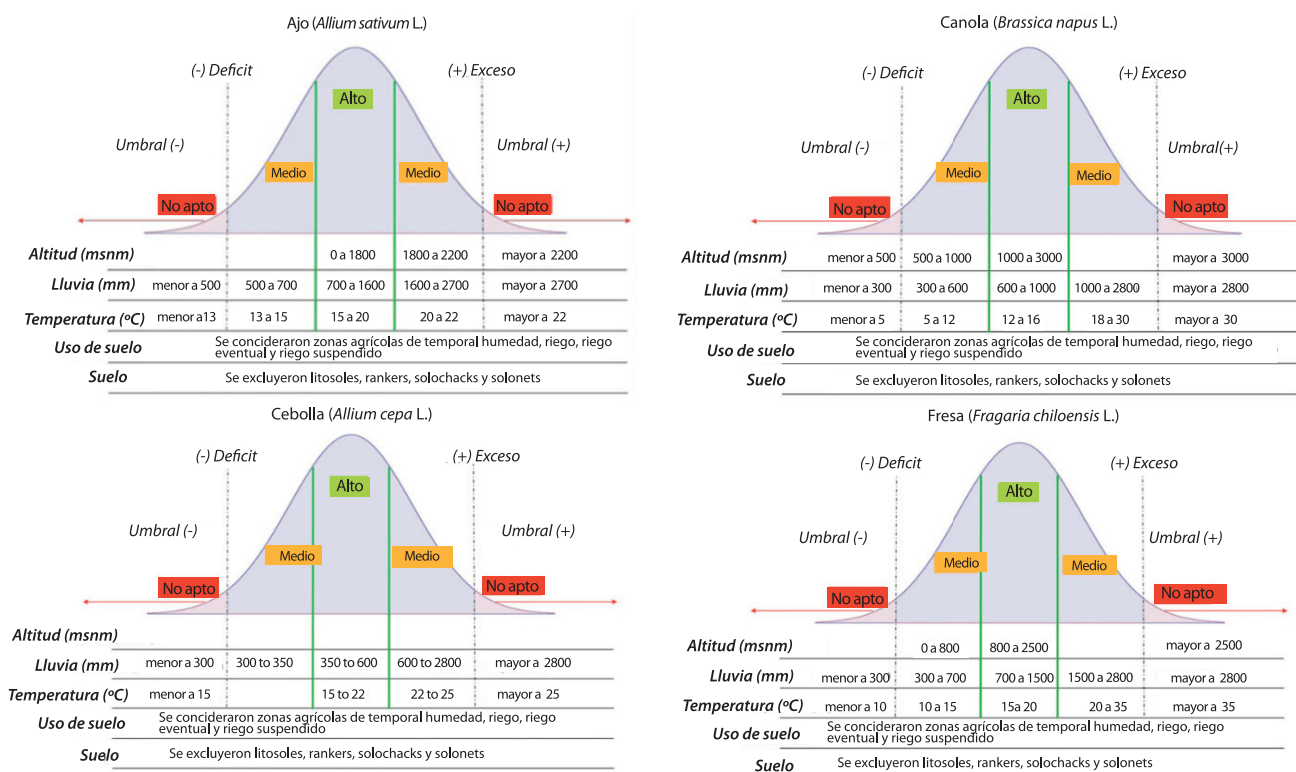


Figura 2. Umbrales agro climáticos para cuatro cultivos en la zona de temporal del municipio de San Luis del Cordero en el estado de Durango: en el sentido de las manecillas del reloj: Ajo, Canola, Fresa y Cebolla.

The index of productive feasibility is the Water Stress Index (WSI) where the imbalance between precipitation “Pp” (supply) and potential evapotranspiration “Eto” (demand) is analyzed. If the difference in this operation is positive, it means that the supply is greater than demand, so there should be no supply problem; on the other hand, if this difference is negative it means the opposite and appropriate actions should be identified to overcome the water shortage. An important aspect to consider in this method is the temporal variation of the amounts of precipitation. This is where climate variations have an impact on crop production.

In the present study functional relationships between soil moisture, which can become a deficiency or excess (d) and the water stress index (wsi) were obtained, which can become a deficiency or excess (D) and the Water Stress Index (WSI) for six different crops in rainfed areas in the country: maize, beans, forage oats, wheat, oats and sorghum. This deficit is calculated as:

$$D = \theta_i + Pp_i - Et_o \quad (2)$$

Where θ_i is the initial soil water content of soil moisture, Pp_i is the rainfall any day, and Et_o is the potential evapotranspiration of the site of interest. The crop yield was estimated reducing the potential yield (Rp) by the moisture stress index as:

El método propuesto para la cuantificación del rendimiento relativo constituye una modificación al propuesto por la FAO (Allen, 1988) posteriormente modificado por Bootsma et al. (1994).

$$\left(1 - \frac{Ra}{Rp}\right) = ky \left(1 - \frac{Eta}{Etm}\right) \quad (1)$$

En la anterior ecuación, Ra y Rp son el rendimiento actual y el potencial respectivamente, en tanto Eta y Etm son la evapotranspiración actual y máxima respectivamente (Doorembos and Kassam, 1979). Etm representa la evapotranspiración bajo condiciones no limitantes de humedad para el cultivo. Sin embargo, el uso de la ecuación 1, ha resultado en sobre estimaciones del rendimiento en algunos cultivos como el maíz (Sánchez et al., 2013).

El índice de factibilidad productiva es el índice de Estrés Hídrico (IEH) en donde se analiza el desbalance entre precipitación “Pp” (oferta) y evapotranspiración potencial “Eto” (demanda). Si la diferencia de esta operación es positiva, quiere decir que la oferta es mayor a la demanda, por lo que no debiera haber problema de abasto; por otro lado, si esta relación es negativa significa lo inverso y habría que identificar acciones pertinentes para sobrellevar ese déficit hídrico. Un aspecto importante a considerar en este

$$IEH = \frac{Ra}{Rp} \quad (3)$$

Where Ra is the average yield observed in a particular location of a number of years under rainfed conditions. Rp can be assumed as the yield under optimal water supply conditions, normally irrigated. For this study, data for both Ra and Rp were taken from the Agrifood and Fisheries Information Service (SIAP) of the Secretariat of Agriculture, Livestock, Fisheries and Food (SAGARPA).

For practical purposes, this algorithm uses the empirical equation proposed by Blaney and Criddle (1950) subsequently modified by the FAO to calculate Et_o . The method uses as input variables monthly temperature values, daily average percentage of hours with light for certain latitude. Initially this model was created to meet the evapotranspiration in arid and semi-arid areas of USA west (Blaney and Criddle, 1950; Blaney and Criddle 1962).

This method has been widely used to compute the values of consumptive use for multiple crops in different regions of the world, given its simplicity. It is important to note that this method provides an overall estimate of Et_o , and under certain conditions this variable can be overestimated or underestimated (Brouwer and Heibloem, 1986; Hauviller *et al.*, 2006; Sánchez, 1999; Stephens and Stewart, 1963; Xu and Singh, 2002). The method is represented by:

$$Et_o = k * p * (0.46 T_m + 8.13) \quad (4)$$

Where Et_o is expressed in $mm \cdot day^{-1}$, p is the percentage of daylight hours of a given period (monthly or daily) regarding the number of annual hours, T_m is the average daily temperature for a certain month ($^{\circ}C$) k is the coefficient of consumptive use, which it is dependent on the type of vegetation, location, time of year and varies from 0.5 for trees to 1.2 for a dense natural vegetation. Model parameters can be found in numerous literature for example in Allen *et al.* (1988).

The procedure consisted of placing the main rainfed crops recorded in the SIAP from which emanated the six crops before recorded. Later, the reported yield was verified and correlated with the rainfall regime that gave rise to it. The latter information was derived from the Rapid Climatic Data Extractor (ERIC III) of the Mexican Institute of Water Technology (IMTA), taking the station closest to the municipality which reported the crop yield of interest.

Results and discussion

Figure 4 shows the WSI for bean, barley, maize, sorghum, wheat and forage oats crops (main rainfed

método es la variación temporal de las cantidades de precipitación. Es aquí donde las variaciones climáticas tienen su impacto en la producción de los cultivos.

En el presente estudio se obtuvieron relaciones funcionales entre la humedad del suelo, la cual puede constituirse en un déficit o exceso (D) y el Índice de Estrés de Hídrico (IEH) para seis diferentes cultivos en zonas de temporal en el país: maíz, frijol, avena forrajera, trigo, avena y sorgo. Este déficit se calcula como:

$$D = \theta_i + Pp_i - Et_o \quad (2)$$

Donde θ_i es el contenido inicial de humedad en el suelo, Ppi es la precipitación pluvial en cualquier día, y Et_o es la evapotranspiración potencial del sitio de interés. El rendimiento de los cultivos se estimó reduciendo el rendimiento potencial (Rp) por un índice de estrés de humedad como:

$$IEH = \frac{Ra}{Rp} \quad (3)$$

Donde Ra es el rendimiento promedio observado en una localidad en particular de una serie de años bajo condiciones de temporal. Rp puede asumirse como el rendimiento bajo condiciones óptimas de aprovisionamiento de agua, normalmente bajo riego. Para el presente estudio, los datos tanto para Ra como para Rp fueron tomados del Sistema de Información Agrícola y Pecuaria (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

Para fines prácticos el presente algoritmo utiliza la ecuación empírica propuesta por Blaney y Criddle (1950) y que posteriormente fue modificada por la FAO para el cálculo de Et_o . El método utiliza como variables de entrada valores mensuales de temperatura, porcentaje medio diario de horas del día con luz para cierta latitud. En un principio este modelo fue creado para conocer la evapotranspiración en áreas áridas y semiáridas del oeste de Estados Unidos (Blaney y Criddle, 1950; Blaney y Criddle 1962).

Este método ha sido utilizado ampliamente para conocer los valores del uso consuntivo para múltiples cultivos en distintas regiones del mundo, dada su simplicidad. Es importante hacer notar que este método provee una estimación general de la Et_o , y bajo ciertas condiciones esta variable puede ser sobreestimada o subestimada (Brouwer y Heibloem, 1986; Hauviller *et al.*, 2006; Sánchez, 1999; Stephens y Stewart, 1963; Xu y Singh, 2002). El método es representado por:

$$Et_o = k * p * (0.46 T_m + 8.13) \quad (4)$$

Donde Et_o se expresa en $mm \cdot día^{-1}$, p es el porcentaje de horas de sol de un periodo dado (mensual o diario) con respecto al número de horas anual, T_m es la

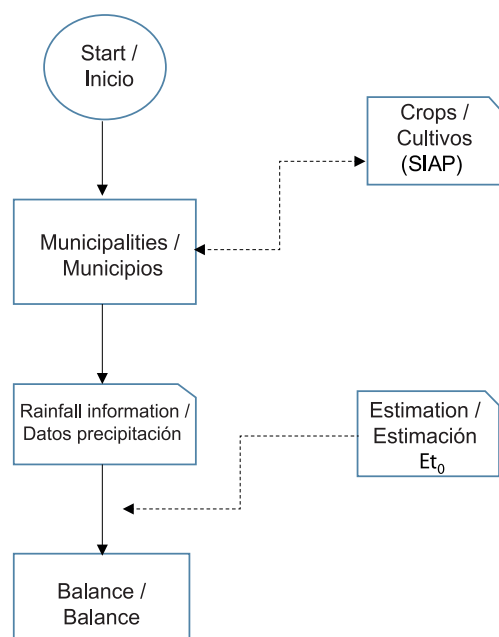


Figure 3. Flux diagram for the computation of the hydric balance in rain feed areas according SIAP

Figura 3. Seguimiento para la estimación del balance hídrico en zonas de temporal reportadas por el SIAP.

crops in Mexico according to SIAP, 2014). Dots in the positive quadrant indicate the WSR in regions of the country where P_p is greater than the E_{t_0} ; dots in the negative quadrant indicate the WSI of the crop in places where E_{t_0} is greater than the P_p . If the difference between these two variables is zero, it means that there is no deficit ($P_p \approx E_{t_0}$). Note in the figures that even if $WSI = 0$ ($P_p \approx E_{t_0}$) the expected yield is not 100 %. We have identified three reasons for this (Sánchez-Cohen *et al.*, 2013): 1) the seasonality of rain, that is, the amount of rain that the crop requires rushes but not when is need it; 2) lack of following good management practices: that is, the producer does not follow the agronomic recommendations of the site, such as the use of the recommended variety and fertilization, pest control, diseases, etc. and 3) the accuracy of the yield data reported which constitutes the statistics reported by the SIAP and where we obtained yields observed for the construction of the above-noted functions.

As a result of the above, the sensitivity of the crop to water stress at different stages of cultivation was quantified, taking as example for application of the method the municipality of San Luis del Cordero in the state of Durango.

The method is based on the yield reduction factors of Doorenbos and Kassam (1979).

temperatura media diaria para cierto mes ($^{\circ}\text{C}$), k es el coeficiente de uso consuntivo que es dependiente del tipo de vegetación, localización, época del año y varía de 0.5 para árboles a 1.2 para una densa vegetación natural. Parámetros del modelo se pueden encontrar en numerosa literatura por ejemplo en Allen *et al.* (1988).

El procedimiento consistió en ubicar los principales cultivos registrados de temporal en el SIAP de donde emanaron los seis cultivos antes anotados. Posteriormente se verificó el rendimiento reportado y se correlacionó con el régimen pluvial que le dio origen. Esta última información se derivó del Extractor Rápido de Información Climática (ERIC III) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), tomando la estación más cercana al municipio que reportó el rendimiento del cultivo de interés.

Resultados y discusión

La Figura 4 muestra el IEH para los cultivos frijol, cebada, maíz, sorgo, trigo y avena forrajera (principales cultivos de temporal en México acorde al SIAP, 2014). Los puntos en el cuadrante positivo indican el IEH en regiones del país en las que la P_p es mayor a la E_{t_0} ; los puntos en el cuadrante negativo indican el IEH del cultivo en lugares donde la E_{t_0} es mayor que la P_p . Si la diferencia entre estas dos variables es cero, quiere decir que no existe déficit ($P_p \approx E_{t_0}$). Nótese en las figuras que aun cuando $IEH = 0$ ($P_p \approx E_{t_0}$) el rendimiento esperado no es 100 %. Se han identificado tres causas para que esto ocurra (Sánchez-Cohen *et al.*, 2013): 1) la estacionalidad de la lluvia, es decir, se precipita la cantidad de lluvia que requiere el cultivo pero no en el momento que la necesita; 2) falta de seguimiento a las buenas prácticas de manejo: esto es, que el productor no sigue las recomendaciones agronómicas del sitio, tales como el uso de la variedad y fertilización recomendada, control de plagas, enfermedades, etc. y 3) la veracidad del dato reportado de rendimiento que se constituye en la estadística que reporta el SIAP y de donde se han obtenido los rendimientos observados para la construcción de las funciones antes anotadas.

Como consecuencia de lo anterior, se cuantificó la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico en las diferentes etapas del cultivo, tomando como ejemplo para la aplicación del método el municipio de San Luis del Cordero en el estado de Durango.

El procedimiento se basa en los factores de reducción de rendimiento de Doorenbos and Kassam (1979).

Estos factores de respuesta para condiciones de estrés en diferentes etapas del desarrollo de los cultivos, se obtienen como se ha señalado en la ecuación 1. El factor K_y es válido para condiciones en las que $1 - \frac{E_{ta}}{E_{tm}} \leq 0.5$. Ver

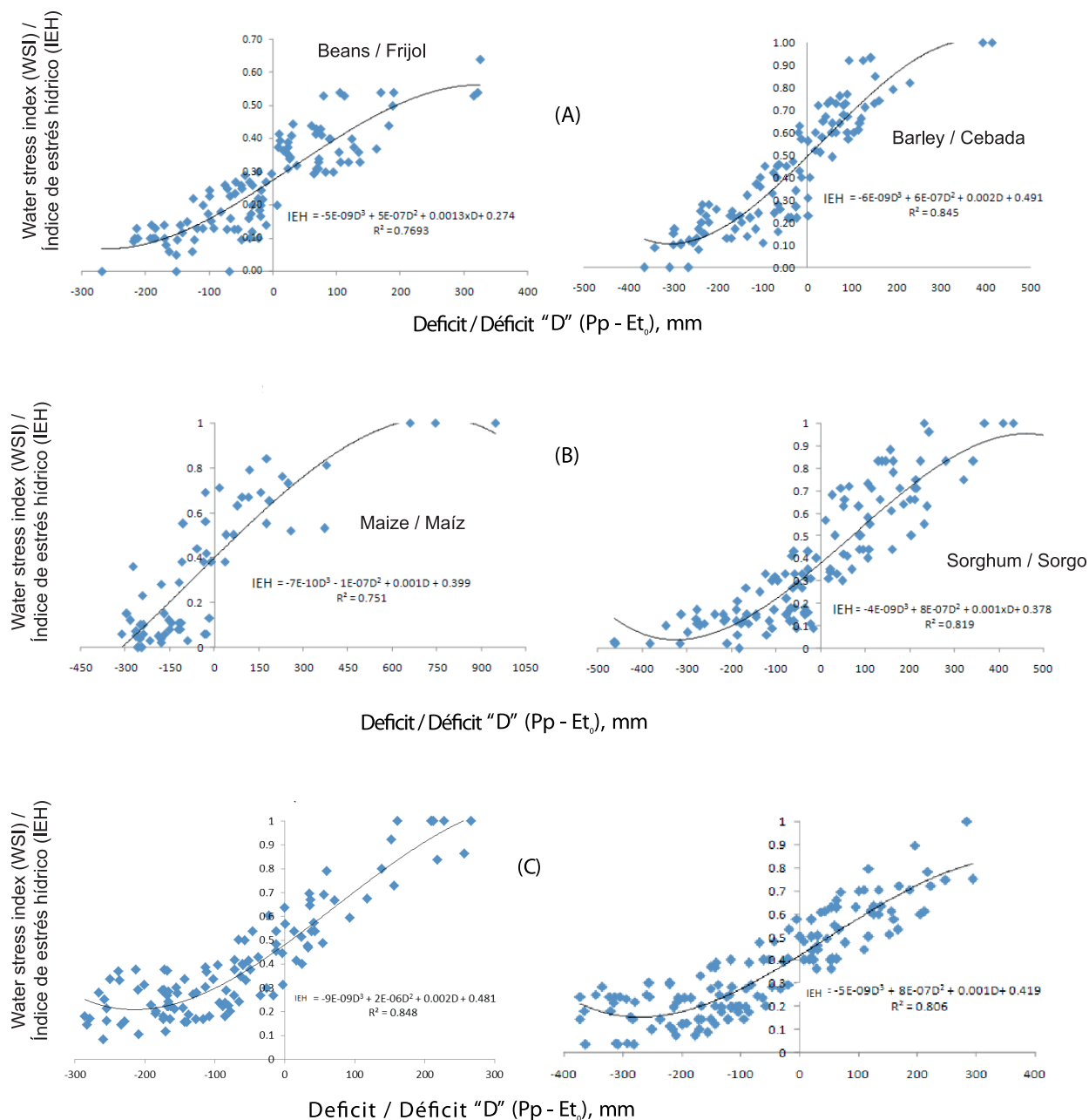


Figure 4. Water Stress Index (WSI) for the six main crops in rainfed areas reported by SIAP.

Figura 4. Índice de estrés hídrico (IEH) para los seis cultivos principales reportados en zonas de temporal por el SIAP.

These response factors for stress conditions at different stages of crop development, are obtained as indicated in equation 1. The factor K_y is valid for conditions in which $1 - \frac{E_{ta}}{E_{tm}} \leq 0.5$. See Table 1 shows K_y values of different cultures and stages of development.

Jensen proposed in 1968 the following mathematical relationship between relative yield and relative evapotranspiration:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_{ta}}{E_{tm}} \right)^{\lambda_i}$$

(5)

Cuadro 1 se indican valores de K_y de diferentes cultivos y etapas de desarrollo.

Jensen propuso en 1968 la siguiente relación matemática entre el rendimiento relativo y la evapotranspiración relativa:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_{ta}}{E_{tm}} \right)^{\lambda_i} \quad (5)$$

Donde λ es el índice de estrés para la etapa "i"; "Σ" significa que se tienen que sumar todos los

Table 1. Yield reduction factors “Ky” (Smith and Steduto, 2006).**Cuadro 1. Factores de reducción de rendimiento “Ky” (Smith y Steduto, 2006).**

Crop/Cultivo	Stage of development / Etapa de desarrollo				
	Throughout the cycle/ Todo el ciclo	Early stage/ Inicial	Vegetative stage/ Vegetativa	Half season/ Mitad estación	Stage of maturity/ Madurez
Beans/Frijol	1.15	0.2	1.1	0.75	0.2
Maize/Maíz	1.25	0.4	1.5	0.5	0.2
Wheat/Trigo	1.15	0.2	0.65	0.55	0.25
Sorghum/Sorgo	0.9	0.4	1	0.8	
Oats/Avena	1	0.2	0.6	0.5	0.62

Where λ is the stress index for the step “i”; “ $\sum$ ” means that all indexes of the «N» stages of crop growth must be added to have the final value of λ . Equation 5 does not allow to consider the dependence between growing seasons, i.e., the stress of an «i» stage depends on the stress of phase «i-1»; and, the multiplication allows to consider this dependency (Oweis, 1999; Tsakiris, 1982).

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^N \left(\frac{E_{ta}}{E_{tm}} \right)^{\lambda_i} \quad (6)$$

The above equation can be solved for λ obtaining:

$$\frac{\log \frac{Y_a}{Y_m}}{\log \frac{E_{ta}}{E_{tm}}} = \lambda \quad (7)$$

Model parameterization of Jensen

The model of Jensen has two advantages. The first is that integrates the effects of water stress on all crop growth stages; the second advantage is that the model can be used in crop growth periods different from the duration of the step (Leuven, 2002).

The Jensen sensitivity index is correlated to the values of “Ky” as follows: (Kipkorir & Raes, 2002):

$$\lambda = 0.2757 Ky^3 - 0.1351 Ky^2 + 0.876 Ky - 0.0187 \quad (8)$$

with $R^2 = 0.99$

Using factors “Ky” from Table 1 for different crops in four stages of development and using Equation 8, we obtain the results in Table 2:

índices de las “N” etapas de crecimiento del cultivo para obtener el valor final de λ . La ecuación 5 no permite considerar la dependencia entre estaciones de crecimiento, es decir, el estrés de una etapa “i” depende del estrés de la etapa “i-1”; así, la multiplicación permite considerar esta dependencia, (Oweis, 1999; Tsakiris, 1982).

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^N \left(\frac{E_{ta}}{E_{tm}} \right)^{\lambda_i} \quad (6)$$

La anterior ecuación puede ser resuelta para λ obteniendo:

$$\frac{\log \frac{Y_a}{Y_m}}{\log \frac{E_{ta}}{E_{tm}}} = \lambda \quad (7)$$

Parametrización del modelo de Jensen

El modelo de Jensen presenta dos ventajas. La primera es que integra los efectos del estrés hídrico en todas las etapas de crecimiento del cultivo; la segunda ventaja es que el modelo puede ser usado en periodos de tiempo del crecimiento del cultivo distintos a la duración de una etapa (Leuven, 2002).

El índice de sensibilidad de Jensen se correlaciona con los valores de “Ky” de la siguiente manera: (Kipkorir & Raes, 2002):

$$\lambda = 0.2757 Ky^3 - 0.1351 Ky^2 + 0.876 Ky - 0.0187 \quad (8)$$

con $R^2 = 0.99$

Table 2. Sensitivity values for different crops in distinct stages of development.**Cuadro 2. Valores de sensibilidad para diferentes cultivos en etapas de desarrollo distintas.**

Sensitivity λ / Sensibilidad λ					
Crop / Cultivo	Throughout the cycle / Todo el ciclo the cycle	Early stage / Inicial	Vegetative stage / Vegetativa	Half season / Mitad estación	Stage of maturity / Madurez
Beans / Frijol	1.23	0.15	1.15	0.68	0.15
Maize / Maíz	1.40	0.33	1.92	0.42	0.15
Wheat / Trigo	1.23	0.15	0.57	0.47	0.20
Sorghum / Sorgo	0.86	0.33	1.00	0.74	-0.02
Oats / Avena	1.00	0.15	0.52	0.42	0.54

The current crop evapotranspiration was obtained by affecting potential evapotranspiration (E_{t_0}) by a factor of culture (K_c). The coefficient K_c , expresses the relationship between E_{t_0} and E_{ta} , in other words, the relationship between the reference crop and other crop (Allen *et al.*, 1988; Brouwer and Heibloem, 1986) (Table 3).

To quantify the variation of the relative yield by stage of crop development, Equation 8 was used to incorporate the values of sensitivity “ λ ” in equation 6 and thus Figure 5 was obtained without regarding the precedent effect (product of the sensibilities)

Figure 5 shows the interdependence of sensitivity at different stages, so the impact of water stress on a stage “i” is dependent on the water stress in the precedent stage “i-1”; it is necessary to emphasize that the lower the value of the relative yield means a greater impact. You can see that, except for maize, other crops have low relative yield in the absence of moisture at different stages of development. However, for all crops, the vegetative development stage has greater impact to water deficit reflected in lower relative yield. This stage occurs between 20 and 60 days after crop emergence. Figure 6 shows the product of the sensitivities of the stages that reflect the overall effect of water stress on relative yield.

Figure 6 shows that maize has the least impact to water deficit; however, according to rainfall patterns shown during the growing season, it would yield only 35 % of the expected maximum yield. Note the similarity to the deficit function indicated for this crop in Figure 1 where Water Stress Index is 40 %.

Utilizando los factores “ K_y ” del Cuadro 1 para diferentes cultivos en cuatro etapas de desarrollo utilizando la ecuación 8 se obtienen los resultados del Cuadro 2:

La evapotranspiración actual del cultivo se obtuvo mediante la afectación de la evapotranspiración potencial (E_{t_0}) por un factor de cultivo (K_c). El coeficiente K_c , expresa la relación entre E_{t_0} y E_{ta} , en otras palabras la relación entre el cultivo de referencia y otro cultivo (Allen *et al.*, 1988; Brouwer y Heibloem, 1986) (Cuadro 3).

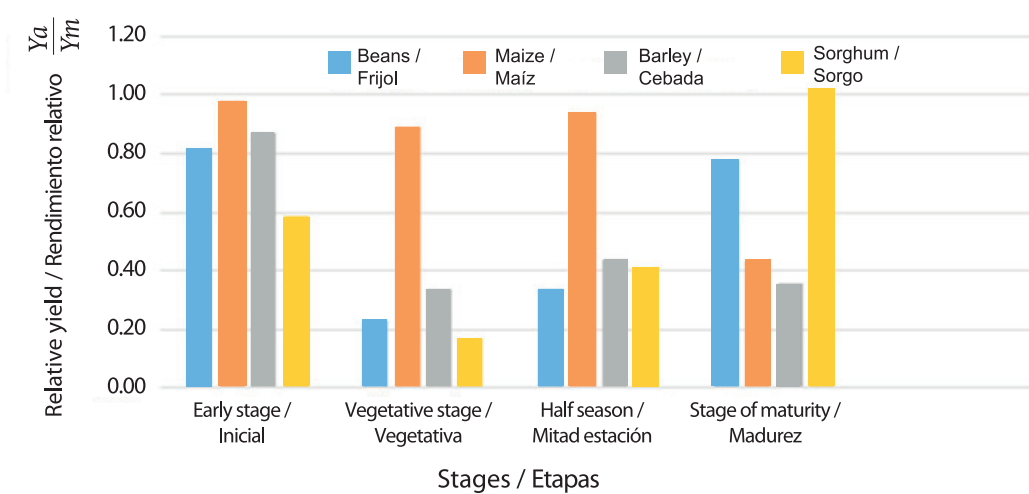
Para cuantificar la variación del rendimiento relativo por etapa de desarrollo de los cultivos, se utilizó la ecuación 8 incorporando los valores de sensibilidad “ λ ” en la ecuación 6 y así se obtuvo la Figura 5 sin considerar el efecto antecedente (producto de las sensibilidades).

En la Figura 5 se puede observar la interdependencia de la sensibilidad en diferentes etapas, así, el impacto del estrés hídrico en una etapa “i” es dependiente del estrés hídrico en la etapa antecedente “i-1”; es menester recalcar que mientras más bajo el valor del rendimiento relativo significa un impacto mayor. Se puede observar que, a excepción del maíz, los demás cultivos presentan rendimientos relativos bajos al faltar humedad en las distintas etapas de desarrollo. Sin embargo, para todos los cultivos la etapa de desarrollo vegetativo es la que presenta mayor impacto al déficit hídrico reflejado en un menor rendimiento relativo. De manera general esta etapa ocurre entre los 20 y 60 días después de la emergencia del cultivo.

La Figura 6 presenta el producto de las sensibilidades de las etapas que reflejan el efecto global del estrés hídrico en el rendimiento relativo.

Table 3. Growth factor Kc for some crops at different stages of development.**Cuadro 3. Factores de cultivo Kc para algunos cultivos en diferentes etapas de desarrollo.**

Crop / Cultivo	Factor kc			
	Early stage / Inicial	Vegetative stage / Vegetativa	Half season / Mitad estación	Stage of maturity / Madurez
Beans / Frijol	0.35	0.70	1.10	0.90
Maize / Maíz	0.40	0.80	1.15	0.70
Wheat / Trigo	0.35	0.75	1.15	0.45
Sorghum / Sorgo	0.35	0.75	1.15	0.45
Oats / Avena	0.35	0.75	1.15	0.45

**Figure 5. Relative yield for some crops regarding the sensitivity “λ” on phonological stages for San Luis del Cordero, Durango.****Figura 5. Rendimiento relativo para algunos cultivos considerando la sensibilidad “λ” en sus etapas fenológicas para el municipio de San Luis del Cordero en el estado de Durango.**

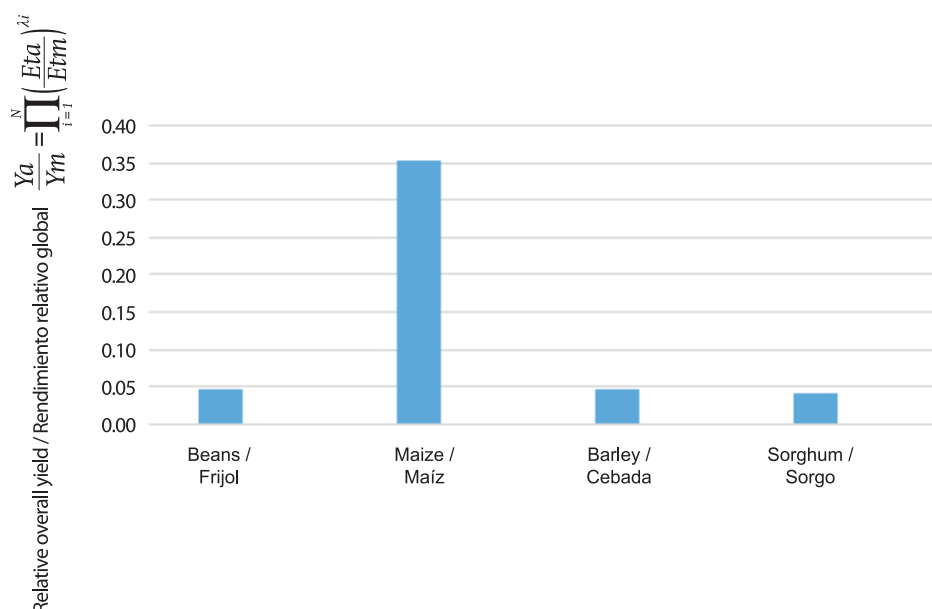


Figure 6. Multiplicative effect when regarding the sensitivity stage of crop growth.

Figura 6. Efecto multiplicativo al considerar la sensibilidad por etapa de crecimiento de los cultivos.

Conclusiones

The low and erratic rainfall in rainfed areas is an essential characteristic of subsistence agriculture; in this sense, any action that contributes to the avoidance of agroclimatic risk, becomes relevant. The ex ante quantification of the risk in crop production is presented as a strategy to support decision making. Thus, the methodology described in this paper provides analytical possibility of approaching the design of strategies to mitigate the impact on deficient rainfed areas in the country. The method allows to quantify the impact of water deficit at different crop stages highlighting the need to supplement, where possible, with some irrigation scheme at critical stages detected.

For the full implementation of the method it is necessary to have basic information about the water requirements of the crops, which are obtained with experiments under controlled water supply; from here, we obtained the information of maximum yields under not restrictive moisture conditions. Current evapotranspiration in rainfed areas depends on the ground water regime imposed by the rainfall.

It is considered that this methodology is useful in the design of mitigation strategies such as changing planting dates, change of crop trying to maximize the productivity of rainwater. It should be understood that this scheme is part of a joint strategy that may

De la Figura 6 se desprende que el cultivo de maíz presenta el menor impacto al déficit hídrico de manera global; sin embargo, acorde al régimen pluvial mostrado durante el desarrollo del cultivo, éste solo rendiría el 35 % del rendimiento máximo esperado. Nótese la similitud con la función de déficit señalada para este cultivo en la Figura 1 en la que el índice de Estrés Hídrico es de 40 %.

Conclusiones

La escasa y errática precipitación pluvial en zonas de temporal es característica esencial de la agricultura de subsistencia; en este sentido, toda acción que coadyuve a la evasión del riesgo agroclimático, adquiere relevancia. La cuantificación ex ante del riesgo en la producción de los cultivos se presenta como una estrategia de soporte a la toma de decisiones. Así, la metodología descrita en el presente trabajo ofrece la posibilidad analítica de aproximarse al diseño de estrategias de mitigación de impacto en zonas de temporal deficiente en el país. El método permite cuantificar el impacto del déficit hídrico en las distintas etapas del cultivo resaltando la necesidad de suplementar, donde sea posible, con algún esquema de riego en las etapas críticas detectadas.

Para la aplicación plena del método es necesario contar con información básica de los requerimientos hídricos de los cultivos mismas que se obtienen con experimentación bajo condiciones controladas de

also include water harvesting and conservation tillage, among others projects.

Acknowledgements

This research was carried out by funding from the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock Research INIFAP through the Technology Profile: METHOD FOR THE CHARACTERIZATION OF WATER STRESS ON RAINFED CROPS

End of English Version

References / Referencias

- Allen Richard G.; Luis S. Pereira; Dirk Raes; Smith Martin. 1988. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO. Rome, Italy. pp 174.
- Blaney, H. F.; Criddle, W. D. 1950, Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological Irrigation Data, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech. Pap. No. 96, pp. 48
- Blaney, H. F.; Criddle, W. D. 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. No. 1275. Technical Bulletin. USDA. Estados Unidos. pp 59
- Bootsma, A.; Boisvert, J.; Dumanski, J. 1994. Climate-Based Estimates of Potential Forage Yields in Canada Using a Crop Growth Model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67, 151-172. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90001-9](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(94)90001-9)
- Brouwer, C.; Heibloem, M. 1986. Irrigation water management: Irrigation water needs. FAO. Roma, Italia. [En línea] Disponible para la World Wide Web en: <http://www.fao.org/docrep/S2022E/S2022E00.htm>
- Díaz Padilla G.; Panes Rafael, G.; Medina García, G.; Sánchez Cohen, I.; Soria Ruiz, J.; Vásquez Alvarado, J. M.; Quijano Carranza, J. A.; Legorreta Padilla, F.; Ruiz Corral, A. 2012. Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. INIFAP. Publicación especial No. 8. 137 pp.
- Doorembos, J.; Kassam A. H. 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33, FAO, Rome, 193.
- Hauviller, A. P.; Días, H.; Pérez, D.; Rodríguez L., M. 2006. Un aporte a la estimación de la evapotranspiración del cultivo juvenil de Arnadano utilizando metodología según FAO en localidades de la Mesopotamia Argentina. INTA. pág [en línea] Disponible para la World Wide Web en: <http://www.inta.gov.ar/mendoza/jornadas/Trabajospresentados/Hauviller.pdf>
- Jensen, M. E. 1968. Water consumption by agricultural plants. Chap.1 in *Water Deficits and Plant Growth*, Vol II, T. T. Kozlowski, ed., Academic Press, New York., pp. 1-22

aprovisionamiento de agua; de aquí, se obtiene la información de rendimientos máximos bajo condiciones no restrictivas de humedad. La evapotranspiración actual en zonas de temporal es función del régimen hídrico en el suelo impuesto por la precipitación pluvial.

Se considera que esta metodología es útil en el diseño de estrategias de mitigación como el cambio de fechas de siembra, o el cambio de cultivo tratando de maximizar la productividad del agua de lluvia. Se debe entender que este esquema forma parte de una estrategia mixta que puede incluir también obras de captación de agua de lluvia y labranza de conservación, entre otras.

Agradecimientos

La presente investigación se llevó a cabo mediante el financiamiento del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias a través de la Ficha Tecnológica: MÉTODO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO EN CULTIVOS DE TEMPORAL

Fin de la versión en español

- Kipkorir, E. C.; Raes, D. 2002. Transformation of yield response factor into Jensen's sensitivity index. *Irrigation and Drainage Systems* 16: 47 – 52
- Leuven, K. U. 2002. Budget: a Soil Water and Salt Balance Model. Reference Manual. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences Institute for Land and Water Management. Belgium. Pp 79
- Oweis, T.; Hachum, A.; Kijne, J. 1999. Water harvesting and supplementary irrigation for improved water use efficiency in dry areas. SWIM Paper 7. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute
- Sánchez Cohen I. 2005. Manejo Integral del Agua en Cuencas Hidrológicas. Una Aproximación de Simulación de Procesos. Libro Científico No.2. INIFAP CENID RASPA. Pp 272.
- Sánchez Cohen, I.; Velasquez Valle, M. A.; Catalán Valencia, E. A.; Inzunza Ibarra, M. A.; Esquivel Arriaga, G.; Bueno Hurtado, P.; Díaz Padilla, G. 2013. Modelo de balance hídrico como apoyo a toma de decisiones en zonas agrícolas bajo incertidumbre climática. Folleto Técnico No. 28. INIFAP CENID RASPA. pp 53.
- Sánchez Cohen I.; Esquivel Arriaga, G.; Velásquez Valle, M. A.; Inzunza Ibarra, Marco A.; Muñoz Villalobos, Arcadio; Bueno Hurtado, P. 2014. Climate Based Risk Assessment for Maize Producing Areas in Rainfed Agriculture in Mexico. *Journal of Water Resources and Protection*. Vol. 6, 1228-1237

- Sánchez-Cohen, I.; Díaz-Padilla, G.; Velásquez-Valle, M.; Slack, D. C.; Heilman, P.; Pedroza-Sandoval, A. 2015. A decision support system for rainfed agricultural areas of Mexico. *Computers and Electronics in Agriculture* 114 (2015) 178–188.
- Sánchez Tienda, J. 1999. Uso consuntivo del cultivo del aguacate: Metodología Blaney y Criddle modificada relacionando fenología y precipitación. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 5:201-207
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2014. Consultado el 09-09-2014 en <http://www.siap.gob.mx/>
- Smith M.; Pasquale Steduto. 2006. Yield response to water: the original FAO water production function. FAO. Rome Italy. Pp 13.
- Stephen, John C.; Stewart, Ernest H. 1963. A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration. IAHS. Bélgica. Pp.11. [en línea] Disponible en la World Wide Web en: http://iahs.info/redbooks/a062/iahs_062_0123.pdf
- Tsakiris, G. P. 1982. A method for applying crop sensitivity factors in irrigation scheduling. *Agric. Water Manage.* 5: 335-343.
- Xu, C. Y.; Singh, V. P. 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water resources Management* 16: 197-219.