



Sexto
Congreso Nacional de
Riego, Drenaje y Biosistemas
COMEII- 2021 / Hermosillo, Sonora



Artículo: COMEII-21020

Hermosillo, Son., del 9 al 11 de junio de 2021

ESTIMACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADOS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO

Arellano, Monterrosas José Luis

Consultor independiente

Avenida Laguna de Montebello Número 125 Fraccionamiento Montebello; Tuxtla Gutiérrez, Chiapas,
México CP 29070

Correo electrónico: aremonterrosas@hotmail.com; josearemonterrosas@gmail.com

Resumen

Debido a sus características geológicas, de clima, relieve, suelos y vegetación propios de Península de Yucatán, el aprovechamiento del agua para riego agrícola proviene fundamentalmente de sus aguas subterráneas. Por otra parte, a lo largo de la historia, los antiguos mayas han desarrollado una serie de sistemas hidroagrícolas de riego y drenaje, así como estrategias tecnológicas ancestrales propias para el florecimiento de la agricultura de riego en la región.

Desde mediados del siglo XX, el Estado mexicano ha construido la infraestructura hidroagrícola básica para un aprovechamiento de las aguas subterráneas de la Península de Yucatán para el riego agrícola. Sin embargo, ante los retos y desafíos actuales del impacto del Cambio Climático en la disponibilidad de agua para riego y su uso eficiente y sustentable, es necesario una mejor estimación de los requerimientos de riego para un diseño más adecuado de los sistemas de riego presurizados propios de la agricultura de riego de Yucatán.

En este trabajo se hace un análisis de la información climatológica del estado de Yucatán para la estimación de los requerimientos de riego a partir del balance agrohídrológico y el ajuste estadístico de los datos de evaporación máxima en 24 horas como criterios para el diseño de sistemas de riego presurizado.

Palabras claves: requerimientos de riego, evaporación, diseño de sistemas de riego presurizado, agricultura de riego en Yucatán.



1. Introducción

Debido a sus características geológicas, de clima, relieve, suelos y vegetación en la Península de Yucatán, el aprovechamiento del agua para riego agrícola es fundamentalmente proveniente de sus aguas subterráneas. De esta forma, a lo largo de su historia, los pueblos mayas han desarrollado una serie de sistemas hidroagrícolas de riego y drenaje, así como estrategias tecnológicas ancestrales propias para el florecimiento de la agricultura de riego en la región.

De esta forma, coexisten en el paisaje rural de la Península de Yucatán sistemas tradicionales de milpa bajo roza-tumba y quema en suelos pedregosos delgados de *tzeck'é!*; huertos familiares mayas en suelos arcillosos de *chak lu'um*; con terrenos mecanizados en suelos profundos de suelos rojos (*k'ankab*) con áreas con ganadería extensiva en suelos anegadizos como los *ak'alchés* y; pequeños sistemas de riego en suelos fértiles negros de *ek'luum* para el cultivo de hortalizas y cítricos.

El maestro Efraín Hernández Xolocotzin escribió en 1959 en su estudio sobre denominado “Agricultura de Yucatán” (Hernández, 1985), la siguiente reflexión sobre la agricultura de riego en Yucatán:

“... los aprovechamientos de estas aguas para establecimiento de sistemas de riego (...) representan uno de los recursos naturales potenciales de mayor importancia. Su aprovechamiento, poco extendido en la actualidad, puede convertirse en uno de los factores decisivos para la futura agricultura yucateca.”

De esta forma, desde mediados del siglo XX, el Estado mexicano ha construido la infraestructura de riego básica para un aprovechamiento de la riqueza de sus aguas subterráneas de la Península de Yucatán. Sin embargo, para el uso sustentable de éstas valiosas aguas (ahora amenazadas por la contaminación, su uso ineficiente y las perturbaciones regionales del cambio climático) y el desarrollo rural sustentable de la región, es importante comprender las particularidades de la agricultura yucateca de riego así como sus procesos de organización intrínsecos que permitan incorporar las innovaciones tecnológicas a través de la capacitación y la asistencia técnica especializada para la preservación de sus acuíferos y el desarrollo de sus pueblos.

I. REVISIÓN DE LITERATURA.

1.1.- La demanda de agua de los cultivos y el diseño de sistemas de riego.

La cantidad de agua que las plantas transpiran es mucho mayor a la que se utiliza para el crecimiento vegetativo y el proceso de fotosíntesis. Para la estimación de las necesidades de agua en los cultivos a nivel parcelario, no es posible separar el agua proveniente de la evaporación de la superficie del suelo (EV) y la que fluye a través del



follaje de los cultivos proveniente de la transpiración (T), por lo que la suma de ambos procesos, se denomina evapotranspiración (EVT):

$$EVT = EV + T \quad [1]$$

El agua que se pierde por evapotranspiración debe reponerse periódicamente para su almacenamiento en el suelo a través de la lluvia o el riego para no dañar el potencial productivo del cultivo por estrés hídrico. Diversas metodologías se han propuesto para la estimación de la EVT, proceso que depende entre otras variables principalmente de: las condiciones climáticas, del tipo y estado de desarrollo del cultivo y, de la disponibilidad de agua del suelo.

En el diseño de sistemas de riego, así como para la estimación de la cantidad de agua a aplicar en cada riego en la parcela, es fundamental la estimación de la demanda de agua o requerimiento de riego del cultivo. La estimación de una lámina de riego de diseño adecuada, depende en gran medida de una buena estimación de la cantidad de agua que requiere el cultivo a su máxima demanda para garantizar su aplicación oportuna para no afectar su productividad. Sin embargo, muchas veces, la lámina de riego de diseño, se propone o recomienda sin considerar las condiciones agrohidrológicas propias del suelo y del cultivo, particularmente de su demanda o requerimiento de riego máximo para un diseño hidráulico adecuado del sistema que garantice una aplicación oportuna de la lámina de riego requerida.

Para el diseño de obras hidráulicas, se analizan los registros históricos de gastos máximos diarios y se ajustan estadísticamente a diferentes periodos de retorno (Tr). De esta forma; por ejemplo, para el diseño de bordos de protección de áreas agrícolas menores a 1,000 hectáreas, se considera como criterio de diseño la avenida asociada a Tr de 10 a 25 años; para la protección de poblaciones pequeñas un Tr de 50 a 100 años; mientras que para estructuras menores como bordos de 2 a 50 años y en zanjas de drenaje de 5 a 50 años; finalmente, para el diseño de un vertedor de demasías de una presa de almacenamiento, se considera un gasto de diseño asociado a un Tr de 10,000 años (CONAGUA, 2011).

Para el diseño de sistemas de conservación del suelo y agua, se ajustan estadísticamente los datos de intensidad de precipitación máxima en mm/hora para periodos de retorno de 10 años para prácticas de carácter temporal y de 25 a 50 años para obras permanentes (CP, 1977). Para sistemas de drenaje agrícola, se utiliza como criterio de diseño la precipitación máxima en mm/hora, asociada a periodos de retorno de 25 años (IMTA, 2009).

De esta forma, de manera análoga al criterio de diseño de sistemas de conservación del suelo y agua, así como de drenaje agrícola, para el diseño de los sistemas de riego, particularmente de los presurizados, se propone utilizar como criterio la Evaporación Máxima diaria (EVmax) asociada a un periodo de retorno de 25 años.

1.2.- El proceso de la evapotranspiración y sus conceptos relacionados.

Para Hartfield y Fuchs (1990), la *evapotranspiración* (EVT) representa el agua que se pierde tanto de la superficie del suelo como de la vegetación. La evapotranspiración (EVT) es entonces, la transmisión de agua de la tierra a la atmósfera por procesos combinados de la evaporación de la superficie del suelo y la transpiración de las plantas (Wang y Dickinsol, 2012).

El proceso de EVT es un fenómeno complejo de intercambio de masa y energía en el sistema atmosférico global desde la humedad del suelo a la atmósfera donde intervienen diferentes variables climatológicas: radiación, temperatura, velocidad del viento, humedad atmosférica, humedad del suelo y, albedo (Segura y Ortiz, 2017).

La evaporación (EV) y la transpiración (T) son procesos que ocurren simultáneamente. La evaporación en un terreno cultivado se determina no solo a partir de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales del suelo, se estima principalmente como una fracción de la radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el follaje del cultivo cubre más la superficie del suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en la principal componente del proceso (**Figura 1**).

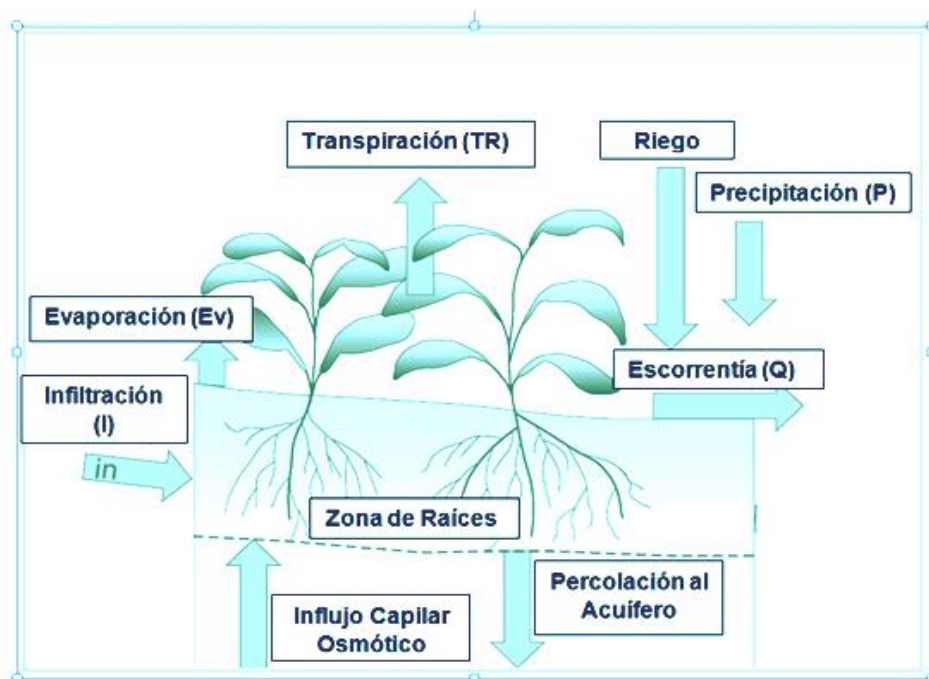


Figura 1. El proceso de evapotranspiración en los cultivos.

La evapotranspiración (EVT) se expresa normalmente como una tasa; es decir, en milímetros (mm) por unidad de tiempo (normalmente día). Esta unidad expresa la



cantidad de agua perdida de una superficie cultivada expresada como una lámina o altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un período completo de cultivo o un año.

Los factores principales que afectan al proceso de evaporación y transpiración son: el clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo. Por otra parte, los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros.

En México existen dos conceptos relacionados: Evapotranspiración (EVT) y Uso Consuntivo (UC). La evapotranspiración (EVT), es la cantidad de agua utilizada por las plantas para realizar sus funciones fisiológicas y de transpiración, más el agua que se evapora de la superficie de la superficie del suelo en el cual se desarrolla. El Uso Consuntivo (UC) considera la evapotranspiración más el agua que utilizan las plantas en la formación de sus tejidos durante su ciclo de desarrollo y que representa aproximadamente el uno por ciento del agua total utilizada. Actualmente es más utilizado el concepto de Evapotranspiración (EVT) que el de Uso Consuntivo (UC).

Con el proceso de EVT, se consideran dos conceptos relacionados: la *Evapotranspiración actual* (EVT_a), denominada también como *Evapotranspiración real* (EVT_r) y, la *Evapotranspiración potencial* (EVT_p), denominada también como *Evapotranspiración de referencia* (EVT_o).

La pérdida de agua que ocurre con el proceso de EVT, se presenta en una superficie en constante cambio; el follaje de las plantas no cubre totalmente la superficie del suelo y se incrementa con el desarrollo del propio follaje y los cambios de la humedad del suelo. La cuantificación de esta pérdida de agua representa la *Evapotranspiración actual* (EVT_a) que es la evaporación del agua proveniente de la superficie del suelo o bien del agua libre sobre la superficie foliar y el agua que fluye a través de las estomas de las plantas; *i.e.* la transpiración. El concepto de la EVT_a es probablemente fácil de entender; sin embargo, es muy difícil de calcular (Hartfield y Fuchs, 1990). La *Evapotranspiración real* (EVT_r) es la cantidad de agua perdida por el complejo suelo-planta, en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas específicas (Segura y Ortiz, 2017).

Por otra parte, la *Evapotranspiración potencial* (EVT_p), cuantifica la demanda evaporativa de la atmosfera, este concepto fue primero definido por Penman en 1948 para una superficie cubierta por un cultivo de referencia, como "*la cantidad de agua transpirada por unidad de superficie en una unidad de tiempo por un cultivo verde de porte corto que cubre totalmente el terreno, de una altura uniforme y que nunca le falte agua*" (Hartfield y Fuchs, 1990).

Bajo esta definición de EVT_p, Doorenbos y Pruitt (1991), propusieron el concepto de *Evapotranspiración del cultivo de referencia* (EVT_o) como "*la tasa al cual el agua, si está disponible puede removerse desde la superficie del suelo y la planta de un cultivo*



específico (i.e. el cultivo de referencia)". Los cultivos de referencia más comunes son el pasto y la alfalfa.

Algunos autores como Doorenbos y Pruitt (1991) y el Soil Conservation Service (1997); Quiñores, (1997) y; Ángeles (2000), denominan a la EVT_r como la *Evapotranspiración del cultivo* (EVT_c) y, expresan a la EVT_p también como EVT_o .

A la Evapotranspiración potencial (EVT_p) algunos autores, la denominan también como Evapotranspiración del cultivo de referencia y la expresan como EVT_o . La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo (Doorenbos y Pruitt, 1991; Soil Conservation Service, 1997).

Para Segura y Ortíz (2017), la *Evapotranspiración del cultivo de referencia* (EVT_o), es la máxima cantidad de agua que se puede perder en una capa continua de vegetación que cubre todo el terreno, cuando la cantidad de agua suministrada al suelo es ilimitada.

La EVT_p es un parámetro relacionado con el clima que expresa el potencial de evaporación de la atmósfera. Existen diferentes ecuaciones empíricas para calcular la EVT_p utilizando datos climatológicos como el método de Penman, el de Penman-Monteith y, el de Hargreaves y Samari, entre otros (Hartfield y Fuchs, 1990; Segura y Ortíz, 2017).

La EVT_p también se estima a partir de los registros de evaporación EV en un tanque evaporimétrico tipo A (Cuenca, 1989; Hartfield y Fuchs, 1990; Doorenbos y Pruitt 1991; Soil Conservation Service, 1997):

$$EVT_p = K_T \cdot EV \quad [2]$$

Donde:

EVT_p = Evapotranspiración potencial (mm/día).

K_T = Coeficiente de tanque evaporímetro (adimensional).

EV = Evaporación (mm/día).

Los valores de K_T se obtienen de tablas propuestas por Cuenca (1989); Doorenbos y Pruitt (1991); el Soil Conservation Service (1997); De la Peña y Llerena (2001).

Actualmente el método de Penman-Monteith se recomienda como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia. El método de Penman-Monteith requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento (Hartfield y Fuchs, 1990; Doorenbos y Pruitt, 1991; Soil Conservation Service, 1997). Sin embargo, el método del tanque evaporimétrico es el procedimiento más sencillo para estimar la evaporación y existe una relación lineal entre la evaporación y la evapotranspiración potencial por lo que el método del tanque



evaporimétrico es probablemente el instrumento meteorológico más consistente para estimar la evapotranspiración potencial. Por otra, el uso del método del tanque evaporimétrico ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para la calcular la EVT_p , debido a que la medición de la evaporación integra el efecto de la radiación, viento, temperatura y humedad relativa específica del sitio de estudio (Hartfield y Fuchs, 1990; Campos, 2007; Chávez-Ramírez, *et al.*, 2013).

La *Evapotranspiración del cultivo* (EVT_c) se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas de grandes extensiones de cultivo con un excelente manejo y adecuado aporte de agua que bajo determinadas condiciones climáticas alcanza su máximo potencial productivo. La EVT_c generalmente se estima a partir de la EVT_p con uso de del coeficiente del cultivo K_c :

$$EVT_c = K_c * EVT_p \quad [3]$$

El coeficiente de cultivo K_c depende de las características anatómicas, morfológicas y fisiológicas de la especie de la planta (especie, variedad) y de su etapa de desarrollo. El K_c expresa la variación de la capacidad del cultivo para extraer el agua del suelo durante su ciclo vegetativo, por lo que el tamaño de la planta, su área foliar y sistema radicular afectan su valor (Palacios, 1982).

Para la estimación de la EVT_p , el coeficiente del cultivo K_c integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de referencia en condiciones de campo (generalmente un tipo de pasto), el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. De esta forma, para cada cultivo en específico, se tendrán diferentes valores de coeficiente del cultivo (K_c). Por otra parte, los valores del coeficiente K_c varían a lo largo de las diferentes etapas de crecimiento del cultivo (Palacios, 1982; Hartfield y Fuchs, 1990; Doorenbos y Pruitt, 1991; Soil Conservation Service, 1997; Quiñores, 1997; Ángeles, 2000).

Por otra parte, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes agroambientales que afectan el crecimiento del cultivo que restringen la evapotranspiración del cultivo (EVT_c), generalmente a esta EVT_c , se le denomina como *Evapotranspiración actual del cultivo* (EVT_a), algunos autores como Palacios (1982), la denominan también como *Evapotranspiración real* (EVT_{real}), es la que normalmente se estima en campo bajo condiciones agroambientales normales. La EVT_a o EVT_{real} , es entonces la EVT_c ajustada por un coeficiente que generalmente se asocia a la humedad aprovechable del suelo, este coeficiente se denomina K_s , el coeficiente del suelo:

$$EVT_a = K_s * EVT_c \quad [4]$$

Donde K_s es función tanto del contenido de humedad del suelo como de la demanda de evapotranspiración del cultivo (Palacios, 1982). De esta forma, integrando la expresión anterior, la evapotranspiración actual del cultivo (EVT_a), se expresa finalmente como:

$$EVT_a = K_s * K_c * EVT_p \quad [5]$$

Donde:

EVT_a = Evapotranspiración actual del cultivo (mm/día).

K_s = Coeficiente del suelo (adimensional).

K_c = Coeficiente del cultivo (adimensional).

EVP_p = Evapotranspiración potencial (mm/día).

1.3.- El balance agrohidrológico y el requerimiento de riego.

El balance de humedad del suelo o balance agrohidrológico, se establece a partir de la diferencia entre la precipitación y la evaporación media mensual. El balance agrohidrológico, permite la definición de los planes de riego y cultivos a lo largo del año: la temporada de riego, de drenaje (desalojo de excedentes) y de aplicación de riegos de auxilio y segundos cultivos, particularmente en zonas tropicales como el sur sureste del país y la península de Yucatán (Bhuiyan y Undan, 1990).

La evaporación (EV), es un estimador de la evapotranspiración (EVT) o consumo de agua de los cultivos. Considerando la relación entre la precipitación media mensual y la evapotranspiración mensual, se estima el balance del agua en el suelo a lo largo del año. El conocimiento del balance de humedad en el suelo permite evaluar los servicios hidrológicos, la disponibilidad de agua en el suelo para el desarrollo de los cultivos (riego y drenaje), realizar estudios hidrológicos, de conservación de suelos, de drenaje, de repoblación forestal, el establecimiento del régimen de humedad del suelo, así como establecer criterios de diferenciación climática.

El balance hídrico consiste en definir mes a mes los siguientes parámetros (una lámina de un mm equivalente a un litro por m^2): P es precipitación media mensual; EVT_p es la evapotranspiración potencial o de referencia; donde R es la reserva de humedad del suelo y; VR es la variación de la reserva; D, es el déficit de agua y Ex, es el exceso de agua.

La diferencia $P - EVT_p$ es el balance mensual de entradas y salidas de agua del suelo. La diferencia clasifica los meses en “secos” cuando $P - EVT_p < 0$ y en “húmedos” cuando $P - EVT_p > 0$ según, si las entradas de agua en el suelo superan o no a las salidas.

Cuando $P - EVT_p < 0$, entonces se presenta un déficit de humedad en el suelo (D) o un Requerimiento de Riego (RR):

$$RR = EVT_p - Prec \quad [6]$$



Por el contrario, cuando $P - EVT_p > 0$ entonces se presenta un exceso de agua en el suelo (Ex) o un Requerimiento de Drenaje (RD):

$$RD = Prec - EVT_p \quad [7]$$

Cuando en un mes se produzcan más entradas que salidas ($P > EVT_p$), el agua excedente se almacenará en el suelo; por el contrario, cuando las salidas sean mayores que las entradas, se reducirá el almacenamiento de humedad en el suelo. Sin embargo, cuando el suelo alcance la capacidad total de almacenamiento, el agua añadida en "exceso", inundará el terreno, escurrirá superficialmente y se infiltrará profundamente (percolación profunda).

Es fundamental conocer la capacidad de almacenamiento de humedad máxima del suelo o la cantidad de agua por unidad de superficie (mm) que el suelo es capaz de almacenar en su perfil para satisfacer oportunamente las necesidades hídricas del cultivo.

Para la estimación de los requerimientos de riego (RR) a partir de la demanda de agua, representada por la evapotranspiración del cultivo (EVT_c) y la oferta de agua, a partir de la precipitación efectiva (Prec), se aplicaron las siguientes ecuaciones (Bhuiyan y Undan, 1990; Arellano (2001):

$$RR_i = EVT_{ci} - Prec_i \quad [8]$$

$$EVT_{ci} = K_c \cdot EVT_{pi} \quad [9]$$

$$EVT_{pi} = K_T \cdot EV_i \quad [10]$$

Donde:

RR_i = Requerimiento de riego en el mes i en mm.

$Prec_i$ = Precipitación media en el mes i en mm.

EVT_{ci} = Evapotranspiración del cultivo en el mes i en mm.

EVT_{pi} = Evapotranspiración potencial en el mes i en mm.

K_c = Coeficiente del cultivo (adimensional).

K_T = Coeficiente de tanque evaporímetro (adimensional).

EV_i = Evaporación media en el mes i en mm.

Los valores de K_c y K_T se obtienen de tablas propuestas por Doorenbos y Pruitt (1991) y el Soil Conservation Service (1997). Los valores de Preci y E_{Vi} de registros climatológicos. Para fines de estimación de la E_{VTP} a máxima demanda de agua, en este trabajo se considera $K_T = 1$; es decir $E_{VT} = E_V$.

De esta forma, se estima el Balance de Humedad (BH) para cada mes de cada estación de estudio:

$$BHi = Preci - E_{Vi} \quad [11]$$

Donde:

BHi = Balance de Humedad en el mes i en mm.

Preci = Precipitación media en el mes i en mm.

E_{Vi} = Evaporación media en el mes i en mm.

Si $BHi < 0$, entonces $Preci < E_{Vi}$, en ese mes i se presenta un Déficit de Humedad (DHi) igual a un Requerimiento de Riego (RRi).

Si $BHi > 0$, entonces $Preci > E_{Vi}$, en ese mes i se presenta un Exceso de Humedad (EHi) igual a un Requerimiento de Drenaje (RDi).

Si $BHi = 0$, entonces $Preci = E_{Vi}$, en ese mes i el sistema suelo está en equilibrio dinámico.

I. Métodos y Materiales.

2.1.- El ámbito geográfico y los aspectos biofísicos.

Geográficamente, la Península de Yucatán (**Figura 2**), se localiza dentro de los siguientes límites: al sur, latitud $17^{\circ}50'$ norte; al norte, latitud $21^{\circ}53'$ norte; al este, longitud $86^{\circ}43'$ oeste y, al oeste longitud $92^{\circ}25'$ oeste, con una superficie en el territorio nacional de $140,303 \text{ Km}^2$ (Hernández, 1985).

La Península de Yucatán se caracteriza por ser una plataforma geológicamente reciente emergida de las aguas marinas durante el periodo terciario (inferior y superior) y en menor medida del cuaternario. Por su composición geológica, está constituida por una extensa y sólida masa calcárea exterior, conocida regionalmente como laja o *chaltún*, producto de la consolidación de sedimentos fósiles, conformados por residuos conchíferos de origen marino formados de carbonatos de calcio y de magnesio bajo la forma de calcita, dolomita y aragonita (Duch, 1991).

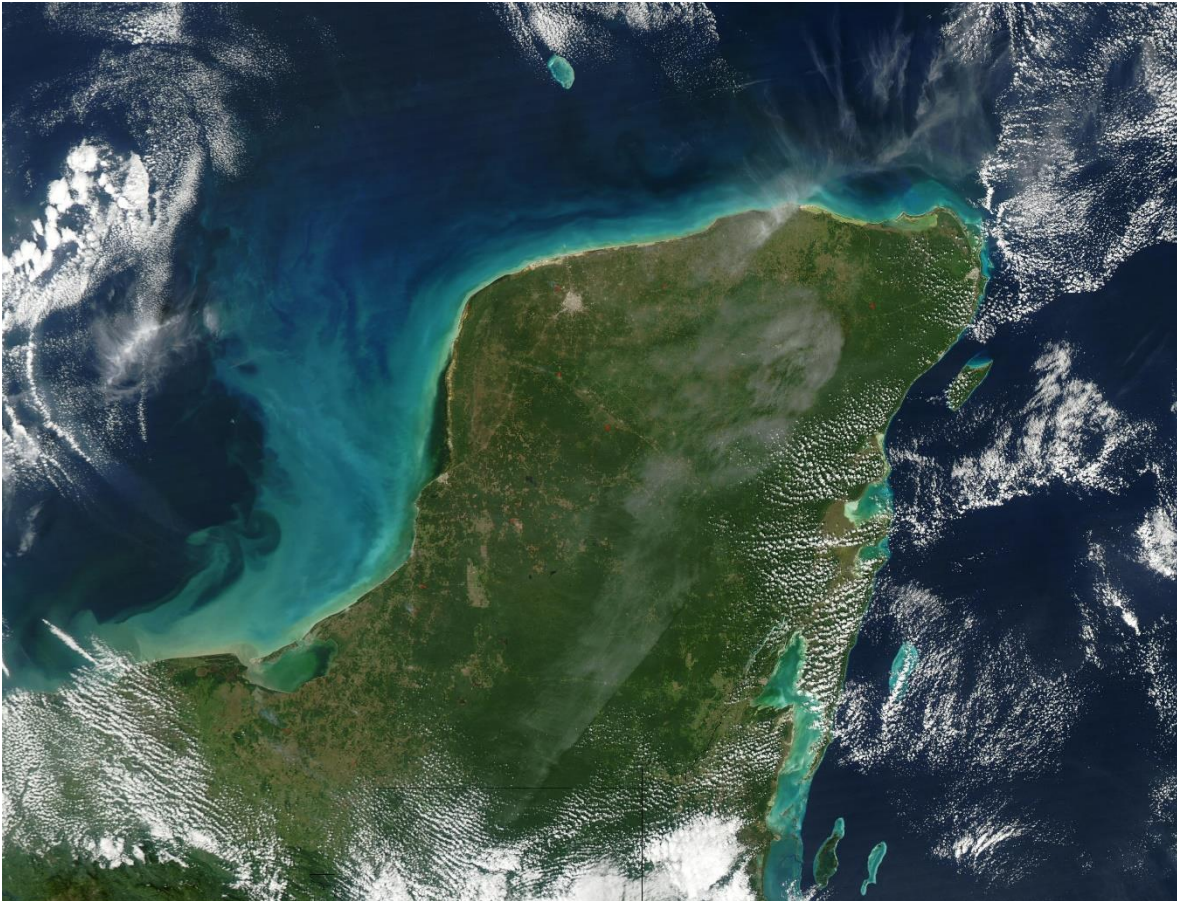


Figura 2. Imagen de satélite de la Península de Yucatán.

Para Miranda (citado por Hernández, 1985), las regiones fisiográficas de la Península de Yucatán propiamente dicha comprenden las siguientes subregiones: a) Macizos de Campeche y zonas adyacentes; b) Planicie del caribe y nordeste; c) Planicies del norte y noreste; d) Franja costera del canal de Yucatán; e) Franja de transición del centro del Petén (**Figura 3**).

Según Duch (1991), el estado de Yucatán comprende las siguientes sub-provincias fisiográficas: a) Llanuras cársticas yucatecas: terrenos de planos a ligera y moderadamente ondulados con promontorios pequeños y hundimientos de forma circular de diámetros y profundidades variables; b) Lomeríos cársticos campechanos: terrenos cerriles asociados con llanuras más o menos extensas; c) Llanuras carsotectónicas quintanarroenses: terrenos planos con ondulaciones ligeras; d) Llanuras costeras del Caribe.

En el paisaje que configura el relieve, los suelos y la vegetación de la Península de Yucatán, destacan cuatro regiones: a) La zona plana, situada al NE de la sierrita. Esta zona es conocida como *kabaché* o monte bajo, cuenta con suelos rojos, pedregosos y poco profundos (*k'ankab*), aunque también abundan los suelos ricos en humus denominados *tzeck'el* en manchones de suelos profundos. En esta zona se ubicaban las

haciendas henequeneras y actualmente se ubica la zona citrícola. b) La segunda zona es la Puuc de la Sierrita de Ticul donde abundan los suelos pedregosos de *tzeck'el* y en menor proporción los de *ek'luum* donde se siembran hortalizas y maíz. c) la tercera zona es la que forman las hondonadas situadas al sur, entre el *Puuc* y las pequeñas elevaciones conocidas como *witz*. En estas depresiones se presentan suelos profundos y bajos inundables donde predominan los suelos rojos (*k'ankab*), los suelos anegadizos como los *ak'alchés* y los suelos *yaxhoom*. En esta zona se han desmontado y mecanizado grandes extensiones y antiguamente existían plantíos de caña de azúcar. d) la cuarta zona son los *wits* o cerros localizados al sur de las hondonadas y que se extienden hasta Campeche, en esta zona dominan los suelos negros fértiles, los *ek'luum* donde se cultivaba preferentemente maíz (Morales y Rosales, 1984; Hernández, 1985).

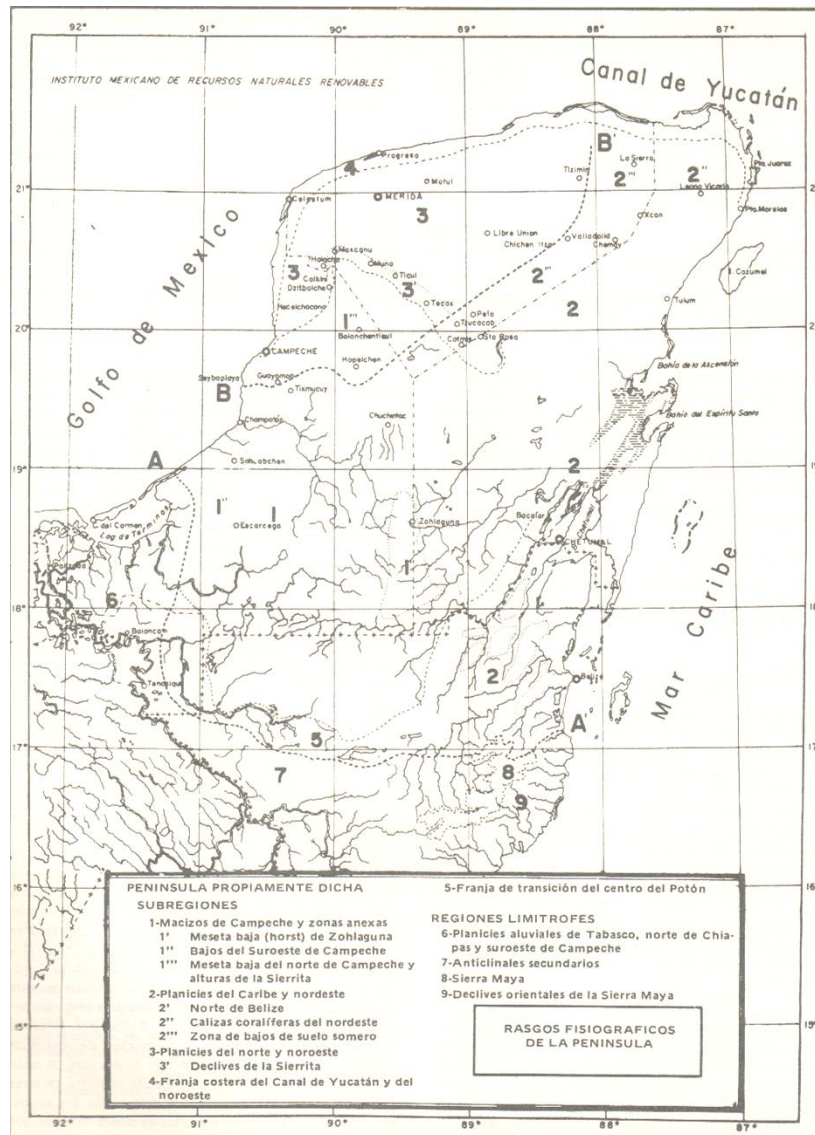


Figura 3. Los rasgos fisiográficos de la Península de Yucatán (Hernández, 1985).



El sistema subterráneo forma una compleja y extensa red, probablemente interconectada que se alimenta de las abundantes filtraciones del paquete de roca caliza de casi toda la plataforma continental cárstica de la Península de Yucatán. El destino final de todas estas aguas es la Penilaguna que bordea el litoral costero (Hernández, 1985).

La accesibilidad de las aguas subterráneas ha configurado el desarrollo de los pueblos y la agricultura en la Península de Yucatán misma que está definida por la presencia de cenotes o la facilidad de perforar pozos. Por ejemplo, la zona maicera de Los Chenes en Campeche está delimitada por los pozos para riego (*chen* en maya es pozo). No se encuentran vestigios de zonas arqueológicas prehispánicas en la zona oriental del estado donde la roca caliza es muy dura para la perforación de pozos con herramienta manual, tampoco se localizan en la meseta baja de Zohlaguna donde las aguas subterráneas son muy profundas (Hernández, 1985). En el sur de Yucatán, hacia La Sierrita, el agua hay que extraerla de pozos a profundidades que van de 30 a 100 metros (Morales y Rosales, 1984).

En la Península de Yucatán según Bautista *et al.* (2005b), dominan las Rendzinas y Litosoles en un 67% en las zonas cársticas, los Gleysoles (15.5%) en las zonas costeras, los Luvisoles (4.44%) en las planicies cársticas; los Vertisoles (3.02%) al sur y noreste; los Solonchak en la zona costera; los Regosoles e Histosoles en el litoral y planicies costeras principalmente.

Cuadro 1. Principales características de los suelos reportados por INEGI en la Península de Yucatán (Bautista *et al.*, 2005b).

| Serie de suelo | Principales características |
|----------------|--|
| Cambisol (B) | Suelos jóvenes y poco desarrollados que pueden presentar ligera acumulación de arcillas, CaCO ₃ , Fe, Mn. Son suelos muy susceptibles a la erosión. |
| Castanozem (K) | Presentan una capa superior de color pardo o rojo oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes. Acumulación de caliche suelta o ligeramente cementada en el subsuelo. |
| Feozem (H) | Presentan una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes. |
| Gleysol (G) | Suelos que se inundan en alguna época del año, se caracterizan por presentar colores grises, azulosos o verdosos que al secarse y exponerse al aire, pueden presentar manchas rojas. |
| Litosol (I) | Suelos con una profundidad menor a los 10 cm. |
| Luvisol (L) | Suelos que tienen un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo, son levemente ácidos y altamente fértiles, son de color rojo o pardo rojizo. |
| Nitosol (N) | Suelos muy profundos (más de 150 cm), enriquecidos con arcilla y son de color rojo. |
| Regosol (H) | Suelos que no presentan una diferenciación clara entre sus horizontes. |

Los tipos de vegetación en la Península de Yucatán son una expresión del clima, la fisiografía, y la geología a través del tiempo. La vegetación del estado de Yucatán es tropical sin elementos boreales y se caracteriza por tener vegetación de litoral costero, selva baja caducifolia, selva baja caducifolia y mediana subperennifolia (Flores y Espejel, citados por Bautista *et al.*, 2005c).

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García, citada por Hernández (1985), Duch (1991); Orellana y Espadas (2003) y; Bautista *et al.* (2005c), los tipos de clima que se reportan en el estado de Yucatán corresponden al tipo A(w); es decir, cálido subhúmedo con lluvias en verano con los siguientes subtipos: Aw₀ (el más representativo de la Península de Yucatán), denominado cálido subhúmedo con lluvias en verano y marcada sequía en la mitad más calurosa del año (canícula). Otro subtipo presente es el subtipo A(w₁), cálido subhúmedo con lluvias en verano, correspondiente al subhúmedo intermedio y; el subtipo A(w₂), el cálido subhúmedo con lluvias en verano, el más húmedo de los subhúmedos en el cono sur de Yucatán.

Según se muestra en la **Figura 4**, en Yucatán, la precipitación media anual varía de 444 a 1,227 mm (INEGI y Gobierno del estado de Yucatán, 2002). En la región hidrológico administrativa XII Península de Yucatán, la precipitación media anual para el periodo de 1971 a 2014 fue de 1,218 mm mientras que de 1981 a 2010 fue de 1,207 mm con un promedio máximo de 1,649 mm en 2013 (CONAGUA, 2014; 2016).

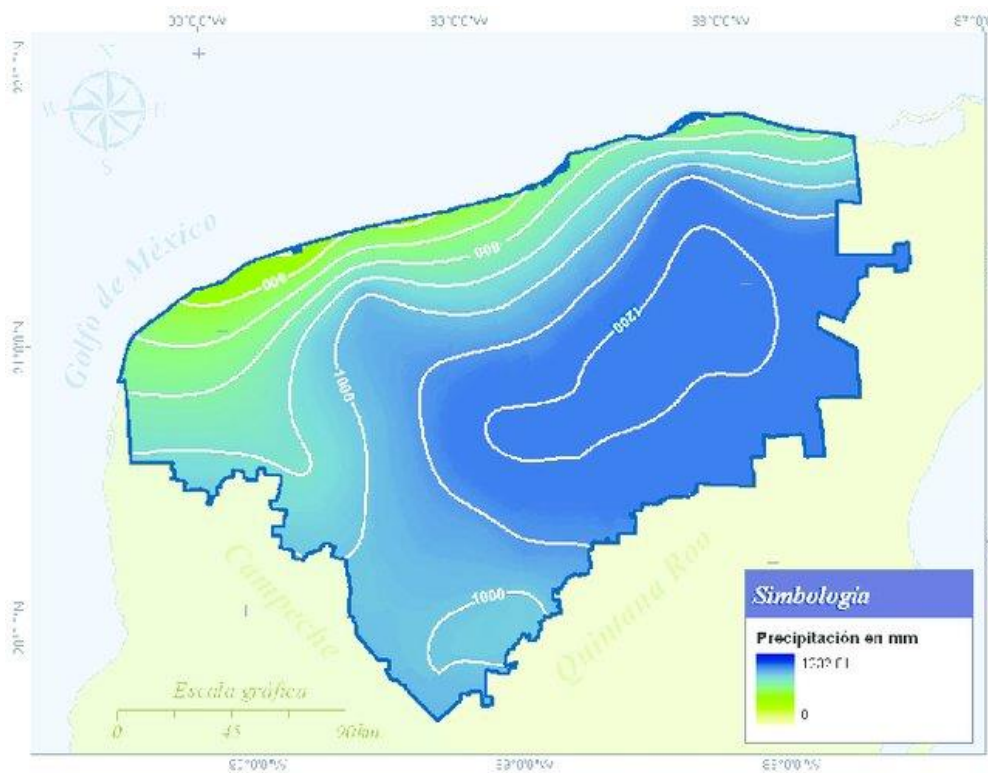


Figura 4. La precipitación media anual en el estado de Yucatán (Orellana, *et al.*, 2009).

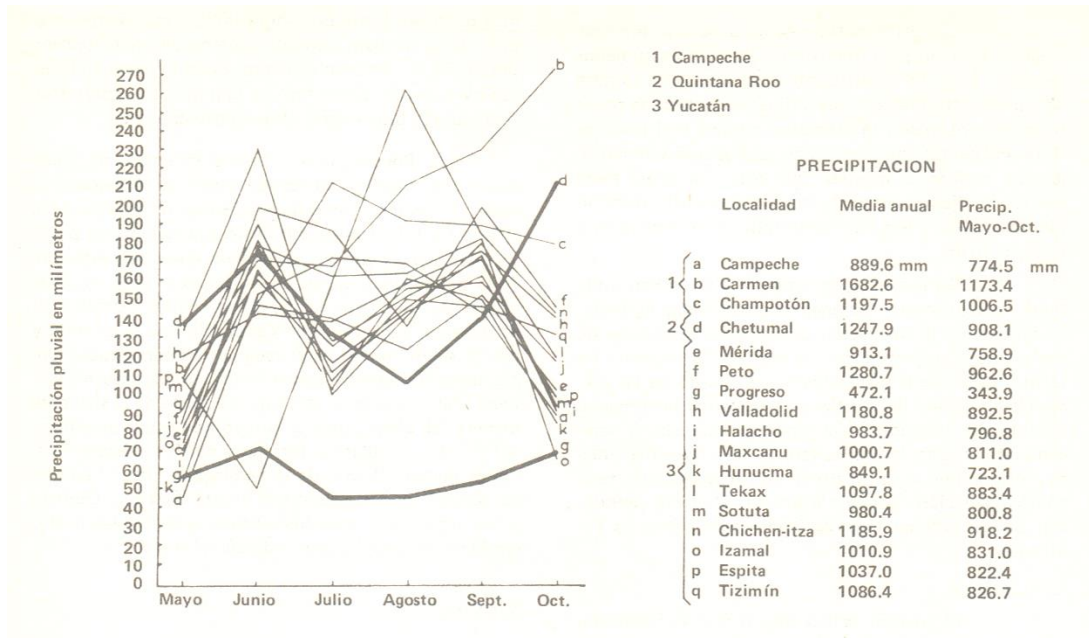


Figura 5. Distribución de la precipitación de mayo a octubre en la Península de Yucatán (Hernández 1985).

Por lo general, la temporada de lluvias inicia en mayo y termina en octubre, presentándose entre julio y agosto un pequeño periodo de 15 días de sequía, es la sequía intraestival o *canícula* (*kin pek* o *kin ik* en maya, según Arellano *et al.*, 1992). Generalmente septiembre es el mes más lluvioso con poco más de 150 mm, mientras que el mes más seco es marzo o abril con valores de 20 a 30 mm (Duch, 1991; INEGI y Gobierno del estado de Yucatán, 2002).

En la región oriente de Yucatán se presentan las más altas precipitaciones con valores de 700 a 1,500 mm al año con periodos de sequía de 3 a 6 meses (Medina *et al.*, 1984).

En la Península de Yucatán, la distribución de la precipitación de mayo a octubre muestra una distribución análoga y son favorables para el desarrollo del maíz (**Figura 5**). Por otra parte, las zonas maiceras de buena productividad se ubican en áreas con precipitaciones de mayo a octubre mayores a 700 mm y buen temporal; es decir, con una buena distribución de la precipitación a lo largo del ciclo vegetativo, particularmente durante el periodo crítico de espigamiento del 10 al 30 de agosto (Hernández, 1985).

Las temperaturas medias anuales en el estado de Yucatán, se distribuyen desde los 24 a los 28°C. Las temperaturas altas se presentan hacia el suroeste del estado en los límites con Campeche, mientras que las más bajas en el norte, entre Telchac y Dzilam. A partir de los rangos de temperatura se definen dos zonas térmicas en el estado: la cálida entre 24 y 26°C y la muy cálida mayor de 26°C (Orellana, *et al.*, 2009).

La Evaporación media anual (EV) en Yucatán es de 2,255 mm con una variación mensual de 136 mm en diciembre a 264 mm en mayo (INEGI y Gobierno del estado de Yucatán,

2002). La distribución geográfica de la evaporación anual, guarda relación con la de la temperatura media anual (**Figura 6**).

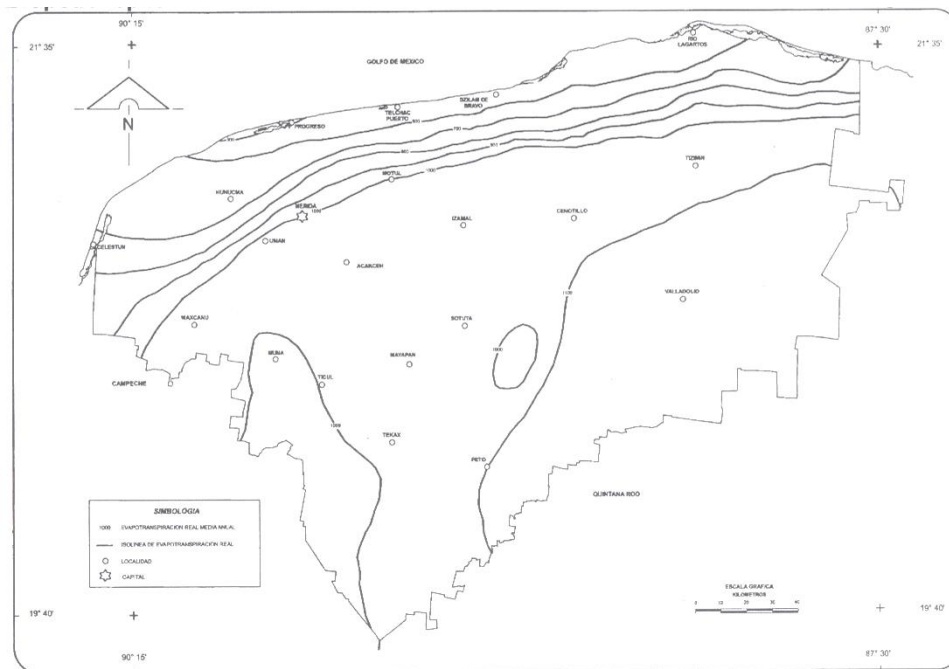


Figura 5. La evapotranspiración media anual en el estado de Yucatán (INEGI y Gobierno del estado de Yucatán, 2002).

La distribución espacial de la Evapotranspiración potencial anual (EVP_p) en Yucatán es similar al de la precipitación y varía espacialmente con un gradiente en dirección de nortenoeste al sur-sureste de 600 en la zona del litoral norte a 1,100 mm en las zonas sur y sureste.

2.2.- La agricultura de riego en Yucatán.

Si bien existe evidencia arqueológica de sistemas de riego y drenaje prehispánicos en la Península de Yucatán como los sistemas de camellones conocidos en Xicalanco, Campeche como *jilones* (Ochoa y González, 2011) o los camellones del río Hondo fechados del 1,100 al 230 A.C.; las terrazas de riego en la zona del río Bec ubicado entre Quintana Roo y Campeche (del 600 al 830 D.C.); los sistemas de campos elevados o camellones y drenes para el control de las inundaciones a lo largo del río Candelaria, en el suroeste de la Península de Yucatán; los sistemas de drenaje y campos elevados o camellones tipo chinampas en el valle inundable de Edzá en Campeche. Sin embargo, esta larga experiencia de la tecnología hidroagrícola maya, de una agricultura intensiva de riego y drenaje se perdió durante la decadencia del periodo del colapso maya (Turner y Thomas, Schmidt y Benavides, citados por Paoli, 1984).



Las áreas de agricultura intensiva de riego se desarrollan en una serie de pequeñas depresiones o *rejollas* denominadas *k'op* en maya, donde se ubican las mejores tierras con un nivel freático somero.

En los últimos 50 años la agricultura de Yucatán se ha transformado significativamente, mientras en 1969 la contribución al valor de la producción agropecuaria y forestal del estado tenía la siguiente distribución por subsector: silvicultura (3.40%), agricultura (75.80%) y, ganadería (20.90%); en 2006 cambia drásticamente: silvicultura (0.03%), agricultura (29.33%) y, ganadería (70.66%). El declive de la producción henequenera, así como el crecimiento de pastizales y el fomento a la ganadería extensiva son las principales causales de este cambio con las implicaciones de deterioro ambiental y pérdida a la biodiversidad que ello representa (Eastmond y García de Fuentes, s/f).

En 2006, la superficie dedicada a actividades agropecuarias en Yucatán, representaba 780,247 hectáreas, de las cuales, un 72% son pastos, un 21% maíz, 3% cítricos, 3% henequén, 1% hortalizas y otros frutales y, 1% otros cultivos (Eastmond y García de Fuentes, s/f).

Los principales sistemas productivos de la agricultura de Yucatán son: maíz; los cítricos, otros frutales y hortalizas de riego, las huertas diversificadas y, la ganadería.

El cultivo de maíz se desarrolla fundamentalmente bajo condiciones de temporal en el ciclo agrícola primavera-verano en suelos negros tipo vertisoles (*Akalche* en la clasificación maya). En algunas comunidades se cultiva maíz en el ciclo otoño-invierno en pequeñas unidades de riego en suelos rojos denominados regionalmente como *Kan kab*, que corresponden a los Luvisoles (Uzcanga-Pérez *et al.*, 2015).

Las primeras obras de riego que realizó el Estado en el sur de Yucatán fueron en 1938 a través de la extinta Comisión Nacional de Irrigación (CNI), después del reparto agrario de 1923. Con las obras de riego, se fomentó el establecimiento de las huertas diversificadas donde se sembraban hortalizas y cultivos semi-perennes (papaya, plátano, achiote, etc.) mientras crecían los cítricos y otros frutales como los chicozapotes, aguacates y mangos. Las huertas diversificadas aún existen en la actualidad en las llamadas *Unidades Antiguas* con riego que representan el modelo local de huerta diversificada de la región (Morales y Rosales, 1984; Rosales y Rejón, 1984).

De 1940 a 1960, la CNI y la SRH, establecen las primeras Unidades de Riego, principalmente en el municipio de Oxhutzcab. En 1959, las Unidades de Riego quedaron a cargo de la SRH. Mediante la perforación de pozos, su equipamiento y la construcción de canales, de 1950 a 1963 la SRH amplió la superficie de riego a 2,500 hectáreas, mismas que en 1964 formaban las denominadas Unidades Antiguas del Distrito de Riego núm. 048 Ticul, Yucatán. En 1964, la SRH da inicio al Plan Chac para la Rehabilitación de las obras de riego. De 1964 a 1980 con motivo de la implementación del Plan Chac, el número de usuarios de riego creció 10 veces con 6.070 (Morales, 1984).

El modelo de unidades citrícolas del sur de Yucatán junto con el Programa de Rehabilitación de obras de riego o Plan Chac desarrollado en la región por el Estado

mexicano a través de CONAFRUT y la SRH, fueron después parte de la estrategia del Sistema Alimentario Mexicano (SAM) del Estado mexicano a principios de los 80's. Con el Plan Chac de 1981 a 1982 se pretendía rehabilitar y ampliar la infraestructura de riego en 1,200 hectáreas y se fomentó la producción de hortalizas y frutales. En el Distrito de Riego núm. 048 Ticul con una superficie proyecto de 9 mil hectáreas, también se aplicó el Plan Chac (Morales y Rosales, 1984; Morales, 1984).

A principios de los 80's las Unidades Antiguas con riego incorporadas al Plan Chac en los municipios de Oxkutzcab, Akil, Ticul, Muna, Dzan, Tekax, Sacalum y, Mani contaban con 46 pozos, una superficie de riego de 3,441 hectáreas y 1,475 usuarios (Rosales y Rejón, 1984).

En la región sur de Yucatán, a partir de la década de los 70's los campesinos y pequeños productores, principalmente de Oxkutzcab, empezaron a transformar los sistemas agrícolas extensivos y poco sostenibles del suelo, a sistemas intensivos. Los cambios se realizaron desarrollando los huertos mayas diversificados (*petkot*) según Gómez-Pompa *et al.*, 1987).

Es el sistema agrícola conocido en la región oriente de Yucatán como el *conuco* donde se cultivan hortalizas y frutales de temporal o con riego de auxilio con agua de lluvia almacenada en pequeños almacenamientos naturales o *sartenejas* denominadas en maya como *xpek*, *catzin* o *xux-ha* (Duch, 1991).

Según Muñoz (2006), la incorporación de las Unidades de Riego del Plan Chac en la zona sur de Yucatán, particularmente en Muna, transformó el conocimiento tradicional de la milpa y la cosmovisión de la agricultura maya de la región.

El área con infraestructura de riego más importante es la denominada “zona citrícola del sur de Yucatán” (**Figura 7**). Los cultivos más importantes son: naranja, limón, toronja, mango y hortalizas. Otras áreas citrícolas de riego más pequeñas son Hunucmá y las unidades de riego ubicadas en la zona ex - henequenera como Acanceh y Dzilam. En el centro y poniente de Yucatán, también existen pequeñas unidades de riego tecnificado donde se cultivan hortalizas, sábila y flores; al noreste de Tizimín también se cultiva con riego superficial de compuertas maíz intercalado con sandía, tomate, chile y calabaza (INEGI y Gobierno del estado de Yucatán, 2002).

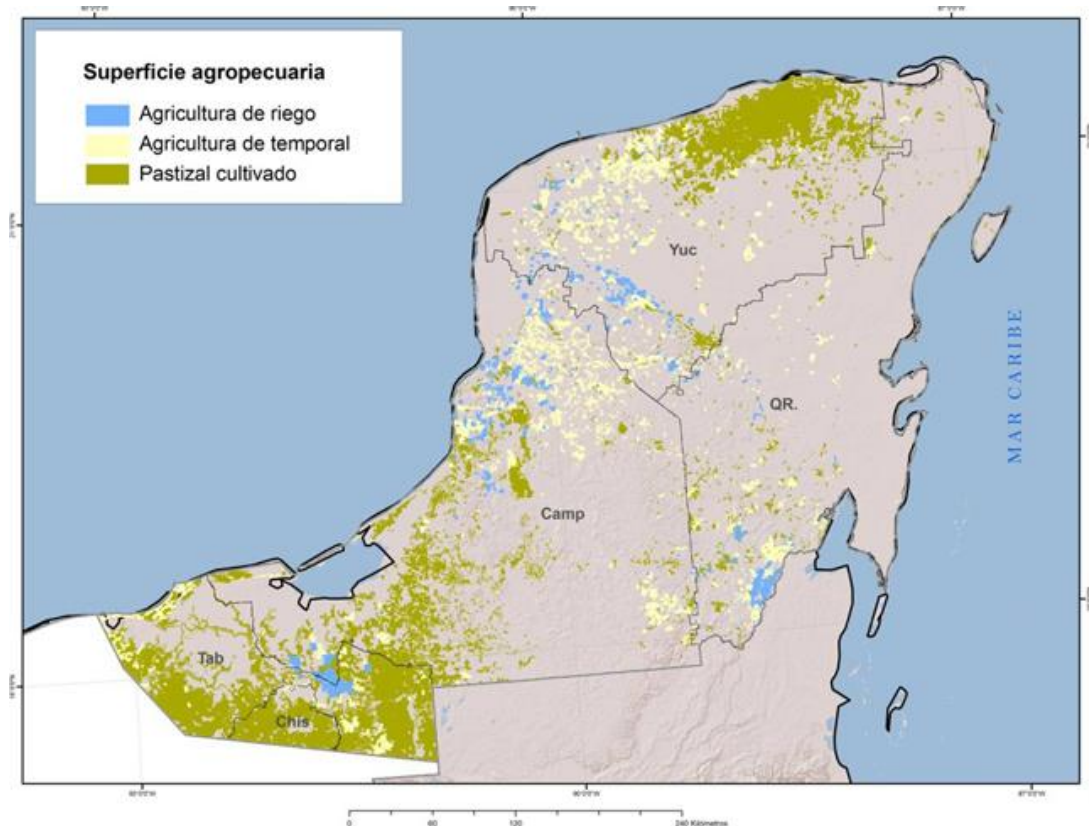


Figura 7. El uso del suelo dedicado a la agricultura de riego y temporal y la ganadería en la Península de Yucatán.

En Yucatán, también es significativa la producción de hortalizas de riego (pepino, chiles, tomate, papaya, melón y, sandía). En 2006, se cultivaron 6,763 hectáreas con una producción total de 140,417 toneladas. Las principales zonas de hortalizas y otros frutales son: a) el norte de Yucatán; b) la zona frutícola de Oxhutzcab, Muna y Tekax; c) alrededor de Tizimín (Eastmond y García de Fuentes, s/f).

Según CONAGUA (2014), en la Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán que comprende los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, en 2014 la superficie agrícola fue de 1´193,099 hectáreas, donde la superficie de riego, representó únicamente un 7.6%. En la región en los últimos dos años, la superficie de riego se amplió en la región con 10,092 hectáreas. Asimismo, en la Región Hidrológico-Administrativa XII, se cuenta con dos Distritos de Riego: el 048 Ticul, Yucatán y el 102 Río Hondo, Quintana Roo los cuales representan una superficie total de 17,785 hectáreas con 4,988 usuarios, una superficie física regada de 14,505 hectáreas, un volumen anual distribuido de 85 millones de m³ de agua, un valor de producción de 597 millones de pesos y una productividad económica de 7 \$/m³, de las más altas del país solo después de la de los Distritos de Riego de Chiapas con 7.91 \$/m³. Por otra parte, en la región se cuenta con un total de 4,078 Unidades de Riego (666 en Campeche, 595 en Quintana Roo y, 2,817 en Yucatán), que representan una superficie total de 59,977 hectáreas, una superficie cosechada de 77,676 hectáreas, un volumen de producción de 2´779,168 toneladas, un



rendimiento promedio de 17 Ton/ha, y un valor de producción de 1,849 millones de pesos. Estos datos dan cuenta de la importancia económica y del potencial productivo de las Unidades de Riego en la región (CONAGUA, 2014; 2016).

El Distrito de Riego 048 Ticul, Yucatán cuenta con una superficie total de 9,689 hectáreas, una superficie física regada de 8,312 hectáreas, 4,749 usuarios y un volumen anual distribuido de 48.2 millones de m³ de agua. Por su parte, las 2,817 Unidades de Riego de Yucatán, representan una superficie total de 43,835 hectáreas, una superficie cosechada de 42,048 hectáreas, un volumen de producción de 838,300 toneladas, un rendimiento promedio de 20 Ton/ha, y un valor de producción de 941.7 millones de pesos. Estos datos dan cuenta de la importancia económica y del potencial productivo de las Unidades de Riego en el estado de Yucatán (CONAGUA, 2016).

Por otra parte, en el estado de Yucatán tiene concesionados 1,673 millones de m³ para uso agrícola (el 100% proveniente de aguas subterráneas) que representan el 84% de los usos consuntivos del agua en el estado (CONAGUA, 2016).

La ganadería bovina en Yucatán representa una actividad importante en el estado debido a que los pastizales representan la tercera parte de la superficie estatal (1'303,321 hectáreas) y permite el uso de forrajes y subproductos agroindustriales para la obtención de productos de origen animal para la alimentación humana (Osorio-Arce, *et al.*, 1999).

En la región, la ganadería se realiza bajo dos sistemas: con manejo semi-intensivo y con manejo de agostaderos con pastos nativos. En ambos sistemas se tienen ollas de agua para abrevadero de ganado en época de secas.

2.3.- Estaciones climatológicas de estudio.

Las estaciones climatológicas del área de influencia y las Unidades de Riego de estudio se muestran en la **Figura 8** y el **Cuadro 2**.

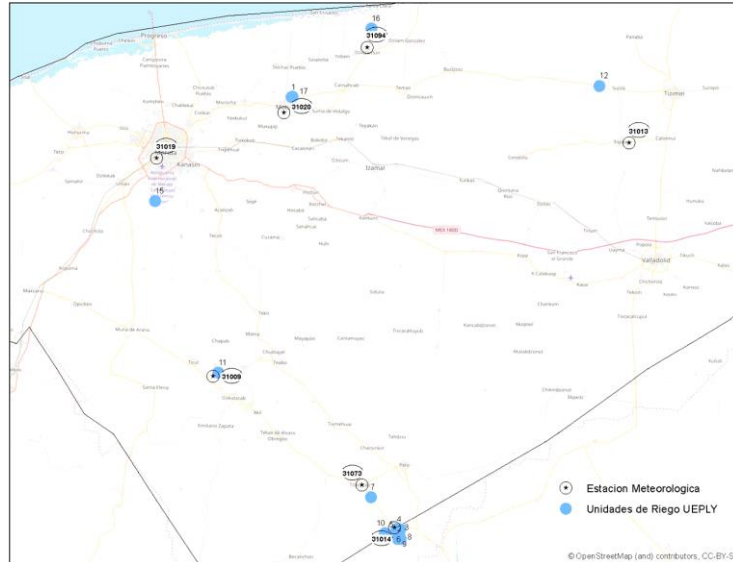


Figura 8. Ubicación de las estaciones climatológicas del área de influencia de las Unidades de Riego de estudio en la Península de Yucatán.

Cuadro 2. Ubicación geográfica de las Unidades de Riego de estudio.

| No. | Unidad de Riego | Coordenadas (UTM) | |
|-----|--------------------------------|-------------------|--------------|
| | | X | Y |
| 1 | La Piedra | 265,023.36 | 2,337,407.20 |
| 2 | La Trinidad | 296,873.00 | 2,204,516.00 |
| 3 | La Nueva Cholul | 297,579.00 | 2,205,552.00 |
| 4 | El Triunfo | 297,820.28 | 2,207,342.25 |
| 5 | La Vaquita | 295,785.00 | 2,205,810.00 |
| 6 | La Curva | 296,770.00 | 2,207,557.00 |
| 7 | San Manuel | 288,993.00 | 2,216,998.00 |
| 8 | El Desafío | 297,894.00 | 2,204,538.00 |
| 9 | Los Jabines El 9 | 297,554.00 | 2,205,847.00 |
| 10 | San Andrés (Tres Hermanas) | 293,190.00 | 2,206,227.00 |
| 11 | San Gregorio | 243,050.36 | 2,254,494.06 |
| 12 | San Martin | 357,732.00 | 2,340,767.00 |
| 13 | Alberto Antonio Pérez Coronado | 382,148.06 | 2,340,049.35 |
| 14 | Pedro Rodríguez Borges | 224,091.00 | 2,346,307.00 |
| 15 | Baldomero Solorio Sánchez | 224,036.00 | 2,306,096.00 |
| 16 | José Luis Cámara Dzidzantún | 289,135.23 | 2,357,969.75 |
| 17 | La Esperanza | 265,432.51 | 2,337,493.68 |
| 18 | San Cristóbal | 263,181.00 | 2,337,274.00 |



Administrativamente, las Unidades de Riego se ubican en el estado de Yucatán y geográficamente están comprendidas entre las coordenadas 19° 45' y 21° 30' de latitud norte y 89° 45' y 88° 00' de longitud oeste.

Cuadro 3. Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas de Yucatán.

| Estación climatológica: | | Coordenadas: | | Periodo de registro: | Unidad de Riego: |
|-------------------------|----------------|--------------|------------|----------------------|-------------------------|
| Número | Nombre | Latitud N | Longitud O | | |
| 31009 | Dzan | 20.3606 | -89.4764 | 1966-2014 | 11 |
| 31013 | Espita | 21.0081 | -88.2828 | 1943-2014 | 12,13 |
| 31014 | Ingenio Catmis | 19.9561 | -88.9483 | 1954-2014 | 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 |
| 31019 | Mérida | 20.9500 | -89.6500 | 1951-2014 | 14,15 |
| 31020 | Motul | 21.0789 | -89.2836 | 1952-2015 | 1, 17,18 |
| 31073 | Tzucacab | 20.0706 | -89.0439 | 1978-2014 | 7 |
| 31094 | Dzidzantum | 21.2600 | -89.0450 | 1986-2015 | 16 |

La ubicación geográfica de cada una de las estaciones climatológicas de estudio, así como las Unidades de Riego a las cuales representa, se muestran en el **Cuadro 3**.

Cuadro 4. Fuente de información climatológica de las estaciones de estudio.

| No. Estación: | Datos Meteorológicos: |
|---------------|---|
| 31009 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Diarios/31009.txt |
| 31013 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Diarios/31013.txt |
| 31014 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Diarios/31014.txt |
| 31019 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Diarios/31019.txt |
| 31020 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Diarios/31020.txt |
| 31073 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Diarios/31073.txt |
| 31094 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Diarios/31094.txt |

Para cada una de las estaciones climatológicas, se analizó la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) disponible en su página web. Los vínculos de la página web y la información estadística se muestran en los **Cuadros 4 y 5**. Las estaciones climatológicas analizadas cuentan con periodos de registro mayores a 19 años.

Cuadro 5. Fuente de información estadística de las estaciones climatológicas.

| No. Estación: | Estadísticas: |
|---------------|---|
| 31009 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Estadistica/31009.pdf |
| 31013 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Estadistica/31013.pdf |
| 31014 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Estadistica/31014.pdf |



| | |
|-------|---|
| 31019 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Estadistica/31019.pdf |
| 31020 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Estadistica/31020.pdf |
| 31073 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Estadistica/31073.pdf |
| 31094 | http://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Estadistica/31094.pdf |

3.3.- Análisis estadístico de la evaporación máxima diaria.

Para realizar el análisis estadístico de Evaporación Máxima diaria (EVmax), se complementó la información de los registros históricos diarios con uso de la base de datos CLICOM.

Para su incorporación en la base de datos, se verifica que en los años que cuenten con menos de 200 registros de evaporación máxima diaria, los datos correspondan al periodo considerado como crítico para el estado de Yucatán (datos marcados en rojo en el **Cuadro 12**). Una vez integrados los datos por año y estación climatológica, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Selección de los datos correspondientes de evaporación máxima diaria para cada año de registro.
2. Se organizan los datos en forma ascendente (de menor a mayor) y se le asigna un número de orden de registro k para cada valor de evaporación máxima.
3. Contabilizar el número n de datos que tiene el registro de datos máximos.
4. A cada dato de evaporación máximo, se le calcula una probabilidad de no excedencia P y un periodo de retorno Tr .
5. Se obtienen los estadísticos muestrales de cada serie de evaporación máxima, media y desviación estándar.
6. Se ajusta cada serie de evaporación máxima a diferentes Funciones de Distribución de Probabilidades como las anotadas por Springall (1986): Normal, Lognormal, Exponencial, Gamma, Gumbel y Gumbel Dos Poblaciones.
7. Una vez aplicadas las distribuciones de probabilidad, se evalúa para cada distribución el Error Estándar de Ajuste (EEA). Se selecciona la función de distribución de probabilidad que proporcione el mínimo EEA (prueba de Kolmogorov).
8. Una vez obtenida la distribución de mejor ajuste, se estiman los valores de Evaporación Máxima diaria (EVmax_i) asociados a diferentes periodos de retorno $Tr = 2, 5, 10, 20$ y 50 años.

La distribución seleccionada, permitirá la estimación de la Evaporación Máxima diaria (EVmax_i) asociada a diferentes periodos de retorno Tr .



Para realizar el análisis estadístico, se utilizó el programa de funciones de distribución AX+B 1.30 (www.hydrobits.com), mismo que normalmente se utiliza para este tipo de análisis de datos hidrológicos como la estimación de los gastos máximos asociados a diferentes periodos de retorno para el diseño de obras hidráulicas.

3.- Resultados y Discusión.

3.1.- Distribución de la temperatura, la precipitación y la evaporación.

En los cuadros 6, 7 y 8, se muestran los datos promedio mensuales de Temperatura media (Temp), evaporación (EV), precipitación (Prec), y Déficit de Humedad (DH) para cada una de las siete estaciones climatológicas de influencia de las Unidades de Riego de estudio.

Para todas las estaciones climatológicas de estudio se tiene un periodo de lluvias bien definido. La temporada de lluvias inicia en mayo y termina en octubre donde, de un 75.7% a un 82.7% de la lluvia anual cae de mayo a octubre en Dzidzantum y Dzan respectivamente (**Cuadro 6**).

Según se muestra en los climogramas anexos, se presenta entre julio y agosto un pequeño periodo de sequía intraestival o *canícula*. Por otra parte, generalmente septiembre es el mes más lluvioso con valores de 156 mm en Dzidzantum a 291 mm en Mérida, estas lluvias provienen de los ciclones tropicales, mientras que el mes más seco con valores de 21.7 mm en marzo en Motul a 40.3 mm en abril en Mérida (**Cuadro 6**). Estos resultados son análogos a los reportados por INEGI y Gobierno del estado de Yucatán (2002).

Cuadro 6. Distribución de la precipitación anual en Yucatán.

| Estación climatológica: | | Mayo a octubre (%) | Noviembre a abril (%) | Mes más lluvioso (mm) | Mes más seco (mm) |
|-------------------------|----------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| Número | Nombre | | | | |
| 31009 | Dzan | 82.7 | 17.3 | Sep. 246.0 | Feb. 28.0 |
| 31013 | Espita | 80.4 | 19.6 | Sep. 204.0 | Mar 31.0 |
| 31014 | Ingenio Catmis | 78.2 | 21.8 | Sep. 192.0 | Feb. 33.6 |
| 31019 | Mérida | 77.2 | 22.8 | Sep. 291.0 | Abr. 40.3 |
| 31020 | Motul | 79.5 | 20.5 | Sep. 207.0 | Mar. 21.7 |
| 31073 | Tzucacab | 77.7 | 22.3 | Sep. 198.0 | Mar. 24.8 |
| 31094 | Dzidzantum | 75.7 | 24.3 | Sep. 156.0 | Mar. 24.8 |

Los valores promedio anual de temperatura varían de 26.3C° en Mérida a 25.4C° en Espita (**Figura 14**). Los valores de evaporación anual varían de 1,899.1 mm en el Ingenio Catmis a 1,516 mm en Dzidzantum, esta tendencia es análoga a la distribución geográfica de la evapotranspiración potencial (**Figura 10**). Asimismo, la precipitación varía de 1,286.6 mm en Mérida a 904.4 mm en Dzidzantum. Finalmente, el déficit de humedad varía de 804.7 mm en el Ingenio Catmis a 376.8 mm en Tzucacab (**Cuadro 7**).

Cuadro 7. Valores promedios anuales de temperatura, evaporación y precipitación.

| Estación climatológica: | | Temperatura (C°) | Evaporación (mm) | Precipitación (mm) | Déficit de Humedad (mm) |
|-------------------------|----------------|------------------|------------------|--------------------|-------------------------|
| Número | Nombre | | | | |
| 31009 | Dzan | 26.1 | 1,777.6 | 1,242.4 | 435.2 |
| 31013 | Espita | 25.3 | 1,780.4 | 1,151.6 | 628.8 |
| 31014 | Ingenio Catmis | 25.9 | 1,899.1 | 1,094.4 | 804.7 |
| 31019 | Mérida | 26.3 | 1,663.4 | 1,286.6 | 376.8 |
| 31020 | Motul | 25.8 | 1,685.4 | 1,099.7 | 585.7 |
| 31073 | Tzucacab | 25.5 | 1,615.5 | 1,216.9 | 398.6 |
| 31094 | Dzidzantum | 26.9 | 1,516.0 | 904.4 | 611.6 |

Los valores máximos de temperatura anual varían de 48.0C° en el Ingenio Catmis a 42.0C° en Dzidzantum y Espita (**Figura 14**). Las tasas de evaporación máxima anual diaria, fundamentales en el diseño de sistemas de riego, varían de 17.8 mm/día en el Ingenio Catmis y Tzucacab en el mes de junio, a 17.1 mm/día en el mes abril en Motul. Asimismo, la precipitación máxima diaria varía de 250.0 mm/día en septiembre en el Ingenio Catmis y Tzucacab a 160.0 mm/día en junio en Dzidzantum (**Cuadro 8**).

Cuadro 8. Valores extremos de temperatura, evaporación y precipitación.

| Estación climatológica: | | Temperatura máxima | | Evaporación Máxima | | Precipitación Máxima | |
|-------------------------|----------------|--------------------|--------------|--------------------|--------|----------------------|--------------------|
| Número | Nombre | (C°) | Mes | (mm/día) | Mes | (mm/día) | Mes |
| 31009 | Dzan | 44.0 | abril, mayo | 17.4 | marzo | 190.0 | marzo |
| 31013 | Espita | 42.0 | mayo | 17.7 | abril | 200.0 | agosto, septiembre |
| 31014 | Ingenio Catmis | 48.0 | mayo | 17.8 | junio | 250.0 | septiembre |
| 31019 | Mérida | 45.0 | marzo | 17.4 | agosto | 193.5 | septiembre |
| 31020 | Motul | 46.0 | mayo | 17.1 | abril | 186.6 | julio |
| 31073 | Tzucacab | 44.0 | julio | 17.8 | junio | 250.0 | septiembre |
| 31094 | Dzidzantum | 42.0 | abril, junio | 17.2 | julio | 160.0 | junio |

La distribución geográfica de la tasa de evaporación máxima diaria guarda relación con la temperatura máxima diaria; las áreas con mayores tasas de evaporación diaria de 17.8 mm/día se ubican en el sur de Yucatán, entorno a Tzucacab y el Ingenio de Catmis. Las zonas con tasas de evaporación menores de 17.2 mm/día se ubican en la zona de Motul.

Los valores extremos de temperatura y evaporación diaria en la Península de Yucatán, están asociados a la presencia de años secos (años con presencia de *El Niño*). En la Península de Yucatán, se presenta una tendencia hacia años cada vez más secos representa una mayor demanda de agua para el desarrollo de los cultivos. Esta mayor



demanda hídrica de los cultivos es un efecto del cambio climático (Ojeda, *et al.*, 2008; 2011).

En la página del monitor de sequía de México del Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE), se muestra el comportamiento de la sequía en todo el país. El 15 de febrero de 2016 y el 15 de junio de 2018, se reportó la presencia de una sequía anormalmente seca con impactos de largo periodo (mayor a seis meses en la hidrología regional y los servicios ecosistémicos) en la Península de Yucatán (CONAGUA, 2016; 2018).

Si bien la sequía en la península de Yucatán no se presenta de manera catastrófica como en otros estados del país. La sequía produce pérdidas y bajos rendimientos en cultivos, cabezas de ganado y colmenas, disminución de la calidad de los productos, así como incremento en los costos de producción y disminución de ingresos a los productores (Estrada-Medina, *et al.*, 2016).

Con uso de imágenes de satélite, Romero *et al.* (2017), estiman que en la península de Yucatán se presenta una tasa de recesión en la humedad del suelo suficiente para el desarrollo de una sequía en la disponibilidad de agua del suelo para el desarrollo de los cultivos. De esta forma ante estas condiciones de recurrencia y variabilidad de la sequía del suelo, es necesario el desarrollo de estrategias para el almacenamiento de la humedad del suelo en la agricultura de temporal y de uso eficiente del agua en la agricultura de riego en la Península de Yucatán.

3.2.- Requerimientos de riego en la Península de Yucatán.

A partir del análisis de la información climatológica disponible, se obtienen los siguientes resultados en la estimación de los requerimientos de riego en la Península de Yucatán.

Según se muestra en los Anexos y el **Cuadro 9**, en la estación climatológica del Ingenio Catmis, se obtienen los valores máximos de evaporación de 226.3 mm/mes en el mes de mayo, de máximo déficit de humedad con 168.0 mm/mes en el mes de abril y de 11 meses con déficit de humedad.

La distribución geográfica del Déficit de Humedad (Precipitación-Evaporación) en Yucatán (**Cuadro 11**) es contraria al de la evapotranspiración potencial anual y al de la precipitación anual, es decir, varía de 300 a 1,000 mm en dirección del sur-sureste al norte-noroeste (INEGI y Gobierno del estado de Yucatán, 2002).

Cuadro 9. Evaporación y déficit de humedad máximos mensuales.

| Estación climatológica: | | Evaporación Máxima | | Déficit de Humedad Máximo | | Meses con Déficit de Humedad |
|-------------------------|--------|--------------------|------|---------------------------|-------|------------------------------|
| Número | Nombre | (mm/mes) | Mes | (mm/mes) | Mes | |
| 31009 | Dzan | 204.6 | mayo | 147.0 | abril | 8 |
| 31013 | Espita | 223.2 | mayo | 174.0 | abril | 9 |



| | | | | | | |
|-------|----------------|--------------|------|--------------|-------|-----------|
| 31014 | Ingenio Catmis | 226.3 | mayo | 168.0 | abril | 11 |
| 31019 | Mérida | 176.7 | mayo | 127.1 | abril | 10 |
| 31020 | Motul | 204.6 | mayo | 162.0 | abril | 9 |
| 31073 | Tzucacab | 192.2 | mayo | 136.4 | marzo | 7 |
| 31094 | Dzidzantum | 155.0 | mayo | 108.5 | mayo | 8 |

De acuerdo a los resultados del **Cuadro 10**, se obtiene que, en la mayoría de las estaciones climáticas de estudio, de los meses de junio a octubre se presenta un periodo de exceso de humedad para el desarrollo de los cultivos (la evaporación es menor que la precipitación), con un mayor exceso de humedad en el mes de septiembre, con 159.0 mm. En contraste, de octubre a mayo se presenta déficit de humedad (la evaporación es mayor que la precipitación), con un mayor déficit de humedad máximo en el mes de abril de 174.0 mm. El déficit de humedad máximo anual obtenido es de 804.7 mm en la zona del Ingenio Catmis.

Según se muestra en el **Cuadro 10**, en la Península de Yucatán, prácticamente todo el año se tienen requerimientos de riego, excepto únicamente en el mes de septiembre donde se tiene un requerimiento de drenaje de 159 mm, derivado de los aportes de humedad provenientes de los ciclones tropicales.

La zona con mayores requerimientos de riego es la zona cañera del sur con 804.7 mm anuales mientras que los menores requerimientos anuales de riego se presentan en Mérida con 376.8 mm. En el tramo de Tzucacab al Ingenio Catmis se tiene una gran variación en el requerimiento de riego de 398.6 a 804.7 mm. De esta forma, el requerimiento anual de riego en la Península de Yucatán presenta dos tendencias geográficas crecientes: de Mérida hacia Espita y de Mérida hacia el Ingenio.

Cuadro 10. Requerimiento de Riego en la Península de Yucatán.

| Estación | Requerimiento de Riego (mm) | | | | | | | | | | | | Total |
|------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | |
| Dzan | -74.4 | -86.8 | -130.2 | -147.0 | -96.1 | 3.0 | 0 | 31.0 | 105.0 | 21.7 | -57.0 | -74.4 | -435.2 |
| Espita | -62.0 | -78.4 | -148.8 | -174.0 | -117.8 | 21.0 | -21.7 | -3.1 | 72.0 | 0.0 | -54.0 | -62.0 | -628.8 |
| Ingenio | -77.5 | -92.4 | -155.0 | -168.0 | -132.5 | -18.0 | -37.2 | -15.5 | 42.0 | -6.2 | -63.0 | -74.4 | -804.7 |
| Mérida | -55.8 | -75.6 | -102.3 | -127.1 | -86.8 | -9.0 | -6.2 | -9.3 | 159.0 | 34.1 | -42.0 | -55.8 | -376.8 |
| Motul | -58.9 | -78.4 | -145.7 | -162.0 | -136.4 | 0 | 0 | 9.3 | 78.0 | 3.1 | -42.0 | -52.7 | -585.7 |
| Tzucacab | -62.0 | -72.8 | -136.4 | -129.0 | -83.7 | 18.0 | 27.9 | 27.9 | 66.0 | 24.8 | -39.0 | -40.3 | -398.6 |
| Dzidzantum | -62.0 | -61.6 | -99.2 | -102.0 | -108.5 | 9.0 | 31.0 | 31.0 | 18.0 | -21.7 | -54.0 | -49.6 | -611.6 |
| RR Máximo | -77.5 | -92.4 | -155.0 | -174.0 | -132.5 | -18.0 | -37.2 | -15.5 | 159.0 | -6.2 | -57.0 | -74.4 | -804.7 |

Por otra parte, prácticamente a lo largo de todo el año en la estación climatológica del Ingenio Catmis se tienen los mayores requerimientos de riego mensuales, excepto en la estación climatológica de Espita donde se tienen los mayores valores de requerimientos de riego en el mes de abril con 174 mm (el máximo mensual obtenido en la Península de Yucatán). Asimismo, durante los meses de noviembre a diciembre (al inicio del año hidrológico), se obtienen los máximos valores mensuales de 57 y 74.4 mm respectivamente en la estación climatológica de Dzan (**Cuadro 10**).



Cuadro 11. Distribución de la evaporación (EV) y la evapotranspiración (EVT_p) estimada por FAO según Segura y Ortiz (2017) para la estación climática Mérida, Yucatán.

| Parámetro | Meses | | | | | | | | | | | | Total |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | |
| EV (mm) | 105.4 | 120.4 | 145.7 | 167.4 | 176.7 | 159.0 | 167.4 | 151.9 | 132.0 | 124.0 | 105.0 | 108.5 | 1663.4 |
| EVT _p (mm) | 89.0 | 98.0 | 140.0 | 158.0 | 165.0 | 149.0 | 145.0 | 141.0 | 121.0 | 109.0 | 89.0 | 81.0 | 1485.0 |

Para la estación climática del Observatorio de Mérida, Yucatán Campos (2007), reporta una evaporación anual de 2,070.9 mm. Para la misma estación, Segura y Ortiz (2017) proporcionan datos de evaporación (EV) y evapotranspiración potencial anual (EVT_p) estimados por FAO (**Cuadro 11**). Con estos valores de evaporación anual (EV) de 1,663.4 mm y de evapotranspiración anual (EVT_p) de 1,485.0 mm, se estima un coeficiente de tanque (K_T) de 89.28%.

Por otra parte, según las tablas de K_T mostradas por Doorenbos y Pruitt (1991); el Soil Conservation Service (1997) y Quiñores (1997), para las condiciones climáticas de la península de Yucatán, se estima un K_T de 0.85 (tanque evaporímetro rodeado de pasto, con viento ligero, humedad relativa media y radio de cultivo mayor a 1,000 metros). De esta forma, se considera que un valor de K_T de 0.85 es un mejor estimador de la (EVT_p) a partir de la EV en la península de Yucatán.

Los valores máximos anuales de requerimientos de riego de 804.7 mm, corresponden al 73.15% de la evapotranspiración potencial anual de 1,100 mm, reportada por INEGI y Gobierno del estado de Yucatán (2002) para la península de Yucatán.

3.3.- La evaporación máxima diaria y la lámina de riego de diseño.

Los datos de Evaporación Máxima diaria (EV_{max}) recopilados por año y estación climatológica de estudio, se muestran en el **Cuadro 12**.

Cuadro 12. Datos de evaporación máxima diaria por año de registro y estación climatológica en Yucatán.

| Estación climatológica | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------------|--------|----------------|--------|-------|----------|------------|
| Número: | 31009 | 31013 | 31014 | 31019 | 31020 | 31073 | 31094 |
| Nombre: | Dzan | Espita | Ingenio Catmis | Mérida | Motul | Tzucacab | Dzidzantum |
| Año | Evaporación Máxima Diaria (mm) | | | | | | |
| 1954 | - | - | 13.2 | - | - | - | - |
| 1955 | - | - | 13.1 | - | - | - | - |
| 1956 | - | - | 11.4 | - | - | - | - |
| 1957 | - | - | 11.9 | - | - | - | - |
| 1958 | - | - | 11.6 | - | - | - | - |
| 1959 | - | - | 10.7 | - | - | - | - |
| 1960 | - | - | 12.9 | - | - | - | - |
| 1961 | - | - | 9.7 | - | - | - | - |



| | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1962 | - | - | 11.3 | - | - | - | - |
| 1963 | - | - | 12.1 | - | - | - | - |
| 1964 | - | - | 11.1 | - | - | - | - |
| 1965 | - | - | 10 | - | - | - | - |
| 1966 | 7.7 | - | 9.8 | - | - | - | - |
| 1967 | 10.6 | - | 9.8 | - | - | - | - |
| 1968 | 11.4 | - | 10.3 | - | 10.1 | - | - |
| 1969 | 10.5 | - | 9.6 | - | 8.5 | - | - |
| 1970 | 12 | - | - | - | 11.8 | - | - |
| 1971 | 11.9 | - | - | - | 13.7 | - | - |
| 1972 | 11.3 | - | 11.3 | - | 11.6 | - | - |
| 1973 | 11.3 | - | 9.8 | - | 11.5 | - | - |
| 1974 | 11.6 | - | 9.5 | - | 10.9 | - | - |
| 1975 | 10.8 | - | 7 | - | 10.1 | - | - |
| 1976 | 9.9 | 17.6 | - | - | - | - | - |
| 1977 | 11 | - | - | - | 8.7 | - | - |
| 1978 | 9.3 | - | - | - | 11.8 | - | - |
| 1979 | 10.8 | - | - | - | 12.2 | - | - |
| 1980 | 9.7 | - | 4.3 | - | 11 | - | - |
| 1981 | 11.7 | - | 9.6 | - | 10.2 | 7.3 | - |
| 1982 | 9.5 | - | 9.9 | - | 10.4 | 10.8 | - |
| 1983 | 8.6 | 15 | 10.7 | - | 9.5 | 10.2 | - |
| 1984 | 11.6 | - | 8.6 | - | 13.7 | 11.2 | - |
| 1985 | 8.2 | - | - | - | 13.1 | 9.7 | - |
| 1986 | 10 | - | 11.1 | 8.4 | 12.5 | 10.6 | 9.2 |
| 1987 | 9.6 | - | - | 9.9 | 11.3 | 11.4 | 10.4 |
| 1988 | 10.7 | - | - | 7.5 | 11.7 | - | 9.6 |
| 1989 | 9.9 | - | - | 8.6 | 11.7 | - | 9.5 |
| 1990 | 10.1 | 4.8 | - | 8.5 | 11.6 | 9.9 | 9.1 |
| 1991 | 9.4 | 10.8 | 11.4 | 8.8 | 12 | 9.1 | - |
| 1992 | 9.1 | 9.9 | 11.9 | 12 | 11.3 | 17 | - |
| 1993 | - | 10.6 | 11.4 | 8.5 | 11.6 | - | - |
| 1994 | - | 11 | - | - | 11.7 | - | - |
| 1995 | - | - | - | 6 | 12 | 9.9 | - |
| 1996 | - | - | - | 11.8 | 11.9 | - | - |
| 1997 | - | 12.5 | - | 12.6 | 12.7 | 13.6 | - |
| 1998 | - | 17.7 | - | - | 17.1 | 14.5 | - |
| 1999 | - | 7.8 | 16.8 | 14.6 | 15 | 14.8 | - |
| 2000 | - | - | 16.9 | - | 16.3 | 15.6 | - |
| 2001 | - | - | 14.6 | 11.6 | 12.1 | 17 | 14.5 |
| 2002 | 10.6 | 14 | 17.8 | 12.5 | 16.6 | 17.8 | 14.7 |



| | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2003 | 17.4 | 12.8 | 14.9 | 17.4 | 16.8 | 15.5 | 15.3 |
| 2004 | 14.9 | 13.7 | 17 | 17.3 | 14 | 14.5 | 14.9 |
| 2005 | 12.6 | 11.8 | 12.2 | 14 | 11.5 | 10.6 | 15.7 |
| 2006 | 13.8 | 10.9 | 13.9 | 17.1 | 12.6 | 14.4 | 15.8 |
| 2007 | 15 | 13.5 | 13.6 | 15 | 14.9 | 14 | 11.6 |
| 2008 | 13.3 | 10.6 | 14.6 | 16.9 | 11.8 | 14.6 | 14.1 |
| 2009 | 13.7 | 12.2 | 12.1 | - | 11.5 | 13 | 7.3 |
| 2010 | 12.9 | 5.8 | 11.7 | - | 14.1 | 14.1 | 11.2 |
| 2011 | 15.2 | 13.2 | 15 | - | 12.6 | 16.3 | 16.9 |
| 2012 | 16.1 | 8.8 | 17.4 | - | 12.6 | 11.5 | 17.1 |
| 2013 | 16.6 | 16.6 | - | - | 12.1 | 16.5 | 17.2 |
| 2014 | 16.8 | 8.9 | - | - | 9.4 | 11.6 | 12.1 |
| 2015 | - | - | - | - | 12.8 | - | 15.7 |

En las figuras del Anexo de este trabajo, se muestran las pantallas de salida del programa AX+B 1.30 del análisis de estadístico de cada estación climatológica de estudio.

Cuadro 13. Evaporación máxima diaria (mm/día) para diferentes periodos de retorno (Tr) para cada estación climatológica de estudio en Yucatán.

| Estación climatológica: | | Función de Distribución de Probabilidades | Evaporación Máxima diaria (mm/día) para diferentes Tr (años) | | | | | |
|-------------------------|---------------------|---|--|------|------|------|------|------|
| Número | Nombre | | Registrada | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 31009 | Dzan | Log Normal Doble | 17.4 | 13.8 | 16.0 | 16.6 | 16.8 | 16.7 |
| 31013 | Espita | Normal | 17.7 | 14.2 | 17.1 | 17.6 | 17.6 | 17.7 |
| 31014 | Ingenio Catmis | Gamma doble | 17.8 | 14.6 | 16.9 | 17.0 | 17.3 | 17.4 |
| 31019 | Mérida Observatorio | Gumbel doble | 17.4 | 16.5 | 17.2 | 17.3 | 17.4 | 17.8 |
| 31020 | Motul | Log Normal Doble | 17.1 | 13.7 | 15.4 | 16.0 | 16.3 | 16.5 |
| 31073 | Tzucacab | Normal | 17.8 | 15.4 | 16.7 | 17.3 | 17.6 | 17.9 |
| 31094 | Dzidzantum | Normal | 17.2 | 15.7 | 17.1 | 17.7 | 18.2 | 18.5 |

En el **Cuadro 13** y las **Figuras 9 y 10**, se muestran los resultados de la mejor Función de Distribución de Probabilidades de ajuste, así como los valores de Evaporación máxima diaria (mm/día) para diferentes periodos de retorno (Tr) para cada una de las estaciones climatológica de estudio.

Figura 9.- Función de Distribución de Probabilidades de ajuste y Evaporación máxima diaria (mm/día) para diferentes periodos de retorno (T_r) para cada estación climatológica de estudio en Yucatán.

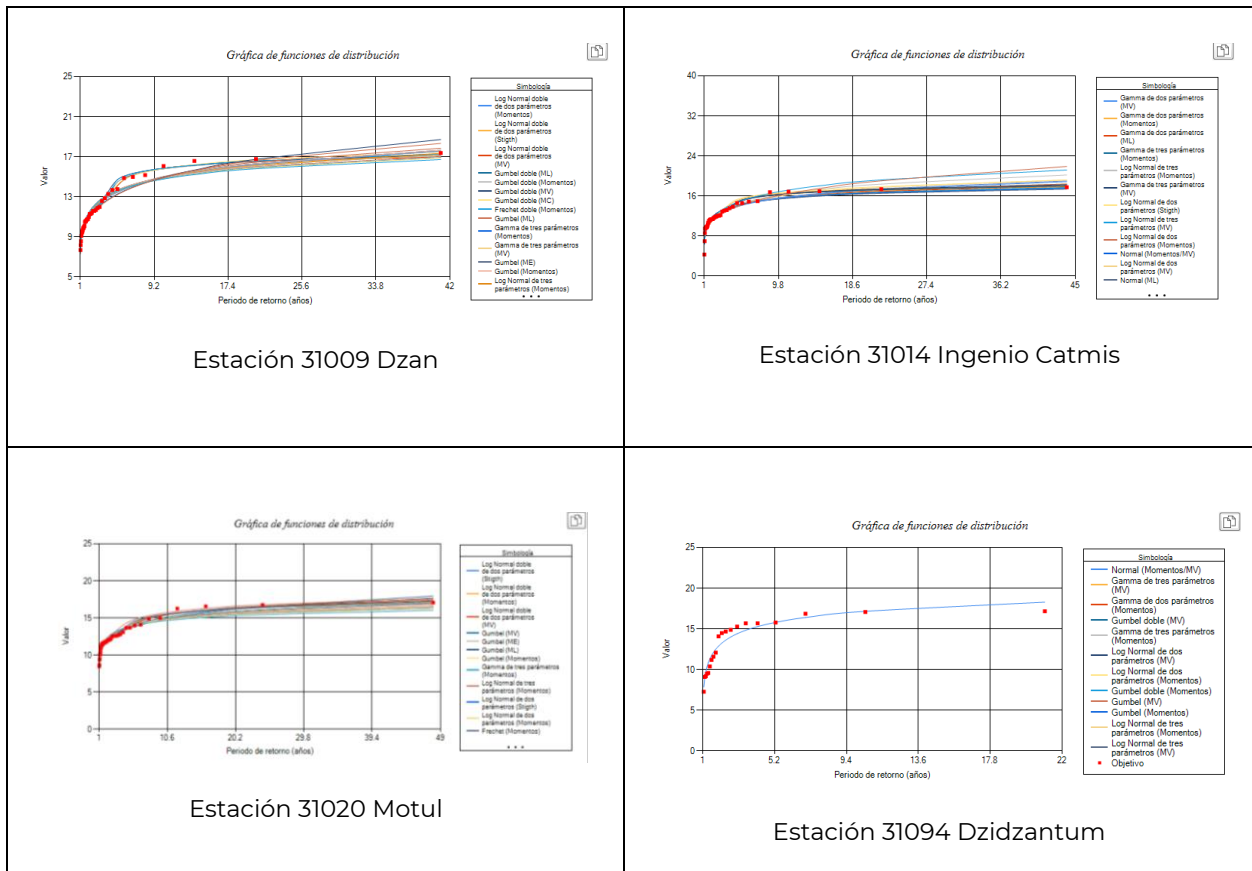
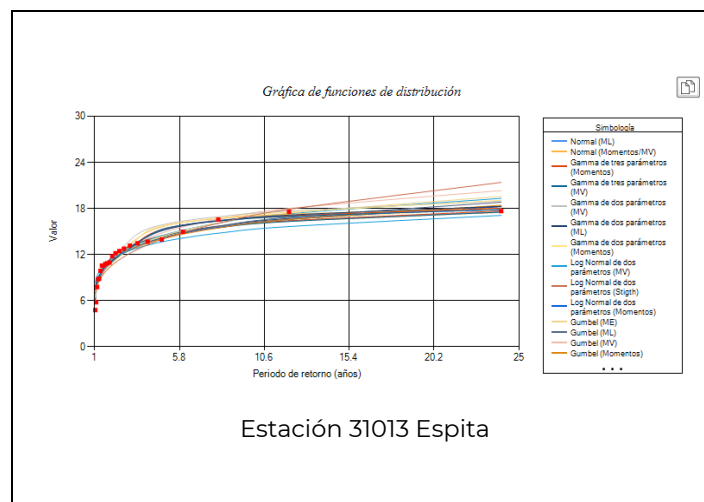
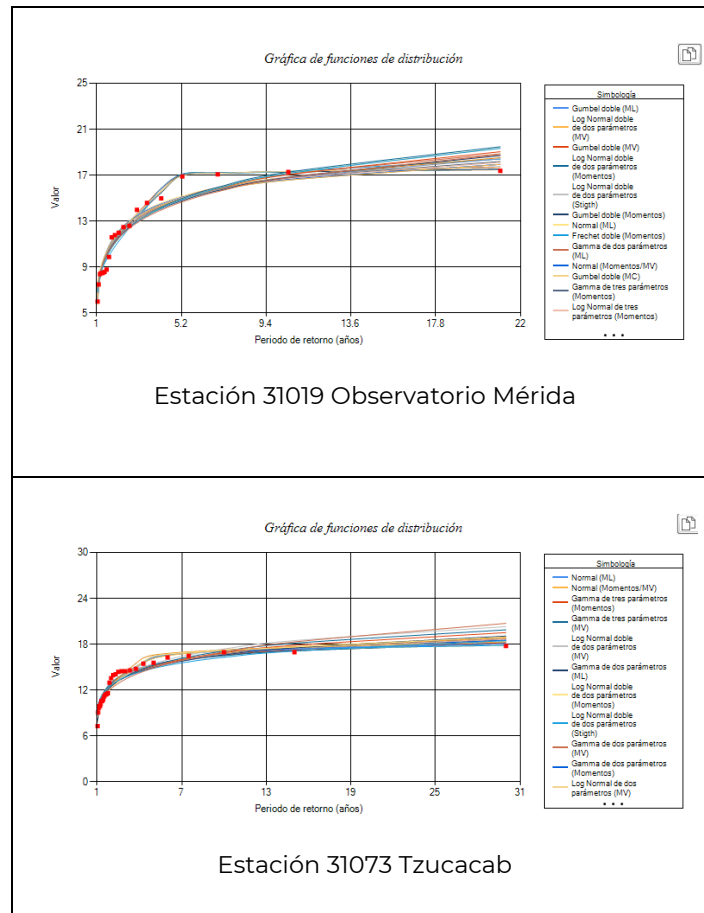


Figura 10.- Función de Distribución de Probabilidades de ajuste y Evaporación máxima diaria (mm/día) para diferentes periodos de retorno (T_r) para cada estación climatológica de estudio en Yucatán.





3.4.- Revisión de la lámina de riego de diseño de los proyectos de tecnificación.

En la Península de Yucatán, todos los aprovechamientos de agua para riego agrícola son de aguas subterráneas, principalmente de pozos profundos. En el **Cuadro 14** se muestran los volúmenes de agua concesionados, superficie y cultivos de cada proyecto de tecnificación de riego de estudio.

En el **Cuadro 15** se muestran los datos técnicos de cada proyecto de tecnificación de riego de estudio (EV , K_T , EVT_p , K_c , EVT_c , Ln , Tr , Lb , La , Ea). A partir de los datos técnicos de los proyectos de tecnificación de riego de Yucatán, se obtiene que para su diseño en más del 80% de los proyectos se considera una tasa de evaporación (EV) de 7.00 mm/día. Asimismo, se obtienen tasas de evapotranspiración potencial (EVT_p) de diseño de 3 a 8.3 mm/día (**Cuadro 15**). Para las condiciones agroclimáticas cálido sub-húmedas dominantes en la Península de Yucatán, la FAO (citada por Ángeles, 2000), recomiendan valores de EVT_p de 7 a 8 mm/día.

En el análisis de la información climatológica de las estaciones de Yucatán, se obtuvieron valores máximos de evaporación (EV) diaria de 17.1 a 17.8 mm/día. Sin embargo, en el diseño de sistemas de riego en Yucatán es importante considerar la distribución geográfica de la tasa de evaporación máxima diaria (EV) para la estimación de la evapotranspiración actual del cultivo (EVT_c).



Cuadro 14. Volúmenes anuales concesionados y anuales brutos de riego.

| No. | Unidad de Riego | Volumen anual concesionado (m ³) | Área total (hectáreas) | Proyecto de riego | |
|-----|------------------|--|------------------------|-------------------|---------|
| | | | | Área (Ha) | Cultivo |
| 1 | La Piedra | 3,832.50 | 60.00 | 25.00 | Pasto |
| 2 | La Trinidad | 316,887.50 | 25.74 | 25.00 | Pasto |
| 3 | La Nueva Cholul | 213,570.00 | 40.31 | 40.00 | Maíz |
| 4 | El Triunfo | 217,220.00 | 35.00 | 20.00 | Pasto |
| 5 | La Vaquita | 195,438.00 | 38.00 | 20.00 | Pasto |
| 6 | La Curva | 727,687.00 | 38.00 | 30.00 | Pasto |
| 7 | San Manuel | 318,165.00 | 25.00 | 25.00 | Pasto |
| 8 | El Desafío | 830,425.00 | 23.63 | 20.00 | Maíz |
| 9 | Los Jabines El 9 | 72,775.00 | 25.00 | 18.00 | Pasto |
| 10 | San Andrés | 226,162.50 | 45.00 | 20.00 | Pasto |
| 11 | San Gregorio | 186,388.00 | 32.60 | 25.00 | Limón |
| 12 | San Martín | 397,132.50 | 25.00 | 20.00 | Pasto |
| 13A | Dos Arbolitos | 252,313.00 | 20.00 | 20.00 | Pasto |
| 13B | Los Troncos | n.d. | 50.00 | 50.00 | Maíz |
| 14 | San Pedro | n.d. | 38.62 | 20.00 | Maíz |
| 15A | Kanpepen pozo 1 | 438,517.76 | 25.00 | 25.00 | Pasto |
| 15B | Kanpepen pozo 2 | n.d. | 25.00 | 25.00 | Pasto |
| 16 | Dzidzantún | 509,575.00 | 117.22 | 100.00 | Pasto |
| 17 | La Esperanza | 162,641.25 | 66.00 | 26.00 | Pasto |
| 18 | San Cristóbal | 25,241.00 | 16.00 | 16.00 | Pasto |

Los valores de EV de 7.00 mm/día, utilizados en el diseño de sistemas de riego presurizados en Yucatán, son con mucho, menores a los valores de EV diarios máximos diarios registrados en promedio de 17.5 mm/día y corresponden a periodos de retorno menores de 5 años (**Cuadro 16**). Por otra parte, para una tasa de EV de 17.5 mm/día y, considerando un valor de $K_T = 0.85$, se estima una tasa de EVT_p de 14.9 mm/día, valor casi del doble del considerado como EV de diseño de 7.00 mm/día. Entonces los sistemas de riego presurizados no están diseñados para abastecer la máxima demanda de agua de los cultivos en la región.

Considerando un coeficiente de tanque (K_T) de 85% y para las tasas de evaporación máximas registradas, debería de utilizarse para el diseño de sistemas de riego en la Península de Yucatán valores estimados de EVT_p de 14.5 a 15.1 mm/día, valores incluso mayores a los recomendados por la FAO de 7 a 8 mm/día, así como a los utilizados en los proyectos de tecnificación de riego (de 3 a 8.3 mm/día).



Cuadro 15. Datos de diseño de los proyectos de tecnificación.

| No. | Unidad de Riego | Tipo de sistema de riego | Proyecto de riego | | Datos técnicos del proyecto de riego | | | | | | | | | |
|-----|----------------------------|--------------------------|-------------------|---------|--------------------------------------|-------|------------------|-------|------------------|------------|------------|---------|---------|-----------|
| | | | Área (Ha) | Cultivo | EV (mm/día) | K_T | EVT_p (mm/día) | K_c | EVT_c (mm/día) | L_n (mm) | T_r (hr) | Lb (mm) | La (mm) | E_a (%) |
| 1 | La Piedra | Aspersión fija | 25.00 | Pasto | 7.00 | 0.51 | 3.60 | 0.75 | 2.75 | 13.54 | n.d. | n.d. | 29.00 | n.d. |
| 2 | La Trinidad | Aspersión fija | 25.00 | Pasto | 7.00 | 0.90 | 6.30 | 0.83 | 5.20 | 13.54 | n.d. | n.d. | 36.41 | n.d. |
| 3 | La Nueva Cholula | Aspersión | 40.00 | Maíz | 6.59 | 0.80 | 5.25 | 0.82 | 4.28 | 14.36 | 1.8 | 25.92 | 30.44 | 85.2 |
| 4 | El Triunfo | Aspersión fija | 20.00 | Pasto | 7.00 | 0.52 | 3.67 | 0.75 | 2.75 | 13.54 | 2.0 | 27.08 | 29.00 | 93.4 |
| 5 | La Vaquita | Aspersión fija | 20.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.60 | 4.20 | 11.30 | 2.6 | 29.38 | 29.40 | 99.9 |
| 6 | La Curva | Aspersión fija | 30.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.60 | 4.20 | 11.30 | 2.6 | 29.38 | 29.40 | 99.9 |
| 7 | San Manuel | Aspersión fija | 25.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.60 | 4.20 | 11.30 | 2.6 | 29.38 | 29.40 | 99.9 |
| 8 | El Desafío | Aspersión fija | 20.00 | Maíz | 8.30 | 1.00 | 8.30 | 0.60 | 5.00 | 13.60 | 2.0 | 27.20 | 36.70 | 74.0 |
| 9 | Los Jabines | Aspersión fija | 18.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.60 | 4.20 | 11.30 | 2.6 | 29.38 | 29.40 | 99.9 |
| 10 | San Andrés (Tres Hermanas) | Aspersión fija | 20.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.60 | 4.20 | 11.30 | 2.6 | 29.38 | 29.40 | 99.9 |
| 11 | San Gregorio | Microaspersión | 25.00 | Limón | 4.86 | 0.71 | 3.45 | 0.87 | 3.00 | 1.08 | 2.2 | 2.43 | n.d. | n.d. |
| 12 | San Martín | Aspersión fija | 20.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.75 | 5.25 | 13.54 | 2.0 | 27.08 | 26.25 | 103 |
| 13A | Dos Arbolitos | Aspersión fija | 20.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.60 | 4.20 | 11.30 | 2.6 | 29.38 | 29.40 | 99.9 |
| 13B | Los Troncos | Pivote central | 50.00 | Maíz | 5.61 | n.d. | 5.40 | 0.75 | 4.05 | 0.36 | 10.5 | 3.79 | 15.12 | 25.0 |
| 14 | San Pedro | Pivote central | 20.00 | Maíz | 3.96 | n.d. | 4.40 | 0.75 | 3.30 | 0.23 | 18.0 | 21.19 | 25.12 | 84.4 |
| 15A | Kanpepen pozo 1 | Aspersión fija | 25.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.75 | 5.25 | 13.54 | 2.0 | 27.08 | 26.25 | 103 |
| 15B | Kanpepen pozo 2 | Aspersión fija | 25.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.75 | 5.25 | 13.54 | 2.0 | 27.08 | 26.25 | 103 |
| 16 | Dzidzantún | Pivote central | 50.00 | Pasto | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 6.50 | 0.275 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| 17 | La Esperanza | Aspersión fija | 26.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.60 | 4.20 | 11.30 | 2.6 | 29.38 | 29.40 | 99.9 |
| 18 | San Cristóbal | Aspersión fija | 16.00 | Pasto | 7.00 | 1.00 | 7.00 | 0.60 | 4.20 | 11.30 | 2.6 | 29.38 | 29.40 | 99.9 |

Donde:

EV es la evaporación diaria de diseño; EVT_p es la evapotranspiración potencial; K_c es el coeficiente global del cultivo; EVT_c es la evapotranspiración del cultivo; Lb es la lámina de riego de aplicación o lámina bruta; T_r es el tiempo de riego (hr); L_n es la lámina de reposición en el suelo o lámina neta; La es la lámina de riego aplicada; E_a es la eficiencia de aplicación del riego a nivel parcelario, $E_a = (La/L_n) * 100$; n. d. dato no disponible.

Según se muestra en el **Cuadro 13**, de los resultados de ajuste probabilístico, los datos máximos registrados en Dzidzantún corresponden a un periodo de retorno de 10 años, el del Observatorio de Mérida a 20 años y los de Espita y Tzucacab corresponden a periodos de retorno de 25 años, incluso los registros de Dzan, Catmis y Motul corresponden a periodos de retorno mayores a 25 años. De esta forma, se considera que un criterio de periodo de retorno de 20 a 25 años para la evaporación máxima diaria es adecuado para el diseño de sistemas de riego presurizados.

Por lo anterior, es necesario realizar mejores estimaciones de la EVT_p así como de la EVT_c para los principales cultivos bajo riego de la península de Yucatán (pastos, cítricos,



hortalizas y frutales) para un diseño adecuado del sistema de riego que permita un uso más eficiente del agua de riego a nivel parcelario.

Tanto la EVT_p como la precipitación, son variables climáticas con una distribución probabilística normal en el año y en el mes. La EVT_p es un valor fundamental para el diseño de sistemas de riego por lo que se recomienda considerar para su diseño, las necesidades de riego para el periodo de máxima demanda de agua del cultivo (Quiñóres, 1997).

Para el diseño de sistemas de riego presurizados (aspersión, microaspersión y goteo), Peña (1997) considera como criterio para su diseño agronómico, el requerimiento diario máximo de riego expresado como tasa (mm/día); Enciso (1997) considera como criterio a la evapotranspiración potencial (EVT_p) diaria máxima (mm/día). Por su parte Ángeles (2000), considera que debido a que los sistemas de riego de microaspersión y goteo humedecen parte del terreno, es necesario ajustar los valores de la EVT_c convencionales. Asimismo, los valores de EVT_p deben de ajustarse con los valores de K_c de cada cultivo y etapa fenológica, para una mejor estimación de la EVT_c . Para pastos forrajeros con baja velocidad de viento y humedad relativa menor del 20%, Ángeles (2000), recomienda un valor promedio de K_c de 1.0. Asimismo, para cítricos recomienda valores de K_c a lo largo del año de 0.75 a 0.85.

4.- Conclusiones.

El Distrito de Riego 048 Ticul, Yucatán cuenta con una superficie total de 9,689 hectáreas, una superficie física regada de 8,312 hectáreas, 4,749 usuarios y un volumen anual distribuido de 48.2 millones de m^3 de agua. Por su parte, las 2,817 Unidades de Riego de Yucatán, representan una superficie total de 43,835 hectáreas, una superficie cosechada de 42,048 hectáreas, un volumen de producción de 838,300 toneladas, un rendimiento promedio de 20 Ton/ha, y un valor de producción de 941.7 millones de pesos. Estos datos dan cuenta de la importancia económica y del potencial productivo de las Unidades de Riego en el estado de Yucatán.

En 2016 en el estado de Yucatán, se tenían concesionados 1,673 millones de m^3 para uso agrícola (el 100% proveniente de aguas subterráneas) mismos que representan el 84% de los usos consuntivos del agua en el estado.

En la Península de Yucatán, prácticamente todo el año se tienen requerimientos de riego, excepto únicamente en el mes de septiembre donde se tiene un requerimiento de drenaje de 159 mm, derivado de los aportes de humedad provenientes de los ciclones tropicales. De esta forma, en la Península de Yucatán, el riego es prácticamente necesario para complementar las necesidades hídricas de los cultivos para la obtención de su máximo potencial productivo.

La zona con mayores requerimientos de riego en la Península de Yucatán, es la zona cañera del sur con 804.7 mm anuales. A lo largo de todo el año en la estación climatológica del Ingenio de Catmis se tienen los mayores requerimientos de riego mensuales, excepto en la estación climatológica de Espita donde se tienen los mayores



valores de requerimientos de riego en el mes de abril con 174 mm, el máximo mensual obtenido en la Península de Yucatán. Asimismo, durante los meses de noviembre a diciembre (al inicio del año hidrológico), se obtienen los máximos valores mensuales de 57 y 74.4 mm respectivamente, en la estación climatológica de Dzan.

Para el diseño de sistemas de riego en la Península de Yucatán deberá de estimarse la evapotranspiración potencial (EVT_p) con valores de coeficiente de tanque (K_T) de 0.85 con uso de las tasas de evaporación (EV) máximas registradas de 17.1 a 17.8 mm/día.

Se considera que el criterio de periodo de retorno de 20 a 25 años propuesto para la evaporación máxima diaria es adecuado para el diseño de sistemas de riego presurizados. Se requiere complementar este criterio con un análisis beneficio-costos, considerando también la vida útil del sistema de riego.

Los sistemas de riego presurizados revisados, no están diseñados para abastecer la máxima demanda de agua de los cultivos en la región.

Es necesario calibrar a nivel de campo, los modelos para la estimación de K_c así como de la Evapotranspiración actual (EVT_a) de los principales cultivos de la Península de Yucatán.

Es necesario mejorar el uso sustentable del agua y de la eficiencia de riego tanto a nivel parcelario como en el sistema de distribución a través de programas de rehabilitación, modernización y tecnificación de la infraestructura de riego, pero particularmente de procesos de organización y capacitación de los usuarios del distrito y las unidades de riego, así como de una adecuada transferencia de tecnología y asistencia técnica especializada en ingeniería de riego y drenaje.

Finalmente, se requiere también de procesos específicos de fomento a la agricultura de riego, particularmente asistencia técnica especializada en riego y drenaje, así como de su financiamiento y comercialización.

5.- Literatura Citada

Ángeles, Montiel Vicente. 2000. Diseño agronómico de sistemas de riego presurizado (aspersión, microaspersión y goteo). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo estado de México. 167 pp.

Arellano, Rodríguez J. A.; Rodríguez, Rivera R. y; Uuh, Chi P. 1992. Glosario de términos agrícolas maya-español. *Etnoflora yucateca*. Fascículo 7. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán. 83 pp.

Arellano, Monterrosas José Luis. 2001. Estimación de los Volúmenes Anuales de Riego a Concesionar en el Estado de Chiapas. En: Memorias del XI Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 1. Ingeniería de Riego. Guanajuato, Guanajuato.

Bautista, F. 2005. Información edafológica para el manejo de recursos naturales. En: Bautista, F.; Palacio-Aponte, G. (Eds.). *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de*



- Yucatán. Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales.* Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. Pp. 1-8.
- Bautista, F.; Palacio-Aponte, G.; Ortiz-Pérez, M.; Batlori-Sampedro, E. y; Castillo-González, M. 2005a. El origen y el manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la Península de Yucatán. En: Bautista, F.; Palacio-Aponte, G. (Eds.). *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán. Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales.* Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. Pp.21-32.
- Bautista, F.; Batlori-Sampedro, E.; Palacio-Aponte, G.; Ortiz-Pérez, M. y; Castillo-González, M. 2005b. Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán. En: Bautista, F.; Palacio-Aponte, G. (Eds.). *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán. Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales.* Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. Pp.33-58.
- Bautista, F.; Palma-López, D. y; Huchin-Malta, Wendy. 2005c. Actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán. En: Bautista, F.; Palacio-Aponte, G. (Eds.). *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán. Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales.* Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. Pp. 105-122.
- Bhuiyan, S. I. y Undan, R. C. 1990. Irrigation for tropical areas. In: Hoffman, Glenn J.; Howell, Terry A. y; Solomon, Kenneth H. (edited). *Management of Farm Irrigation Systems.* ASSAE Monograph. St. Joseph, MI. USA. pp. 581-628.
- Campos, Aranda Daniel Francisco. 2007. Estimación y aprovechamiento del escurrimiento. Daniel Francisco Campos Aranda Ed. San Luis Potosí, S.L.P. 440 pp.
- Chávez-Ramírez, Eduardo; González-Cervantes Guillermo; Dzul-López, Enrique; Sánchez-Cohen, Ignacio; López-Santos Armando y; Chávez-Simental, Jorge Armando. 2013. Uso de estaciones climatológicas automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración. *Tecnología y Ciencias del Agua.* Vol. IV, núm. 4. Pp. 115-126.
- Colegio de Postgraduados. 1977. Manual de Conservación del Suelo y del Agua. Colegio de Postgraduados. SARH. Chapingo. México.
- CONAGUA. 2011. Manual para el control de inundaciones. SEMARNAT. CONAGUA. Ciudad de México. 326 pp.
- CONAGUA. 2012. Programa Hídrico Regional. Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México. 206 pp.
- CONAGUA. 2014. Programa Hídrico Regional 2014–2018 de la Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. SEMARNAT. CONAGUA. Ciudad de México. 139 pp.
- CONAGUA. 2016. Estadísticas del agua en México. SEMARNAT. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México. 275 pp.



- Cuenca, H. Richard. 1989. Irrigation System Design. An Engineering Approach. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. USA. 460 pp.
- De la Peña, de la Torre Ildelfonso y Llerena, Villalpando Félix Alberto. 2001. Manual del uso y manejo del agua de riego. Tercera edición. Texcoco edo. de México. 216 pp.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. 1991. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. No. 24. Roma, Italia. 194 pp.
- Duch, Gary Jorge. 1995. Los suelos, la agricultura y vegetación en Yucatán. En: Hernández, E.; Bello, E. y; Levy, S. (Eds.). La milpa en Yucatán. Un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo I. Colegio de Postgraduados.
- Duch, Gary Jorge. 1991. Fisiografía del estado de Yucatán. Su relación con la agricultura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo estado de México. Pp. 229.
- Duch, Gary Jorge. 1989. Los bajos inundables (ak'alches) de la Península de Yucatán. Las expectativas de una evaluación ambiental referida a su aprovechamiento. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencia Forestales. Chapingo estado de México. Pp. 50.
- Dzib, Aguilar Luis Antonio. 2012. La producción de maíz en Yucatán y los fertilizantes. EnIACe. Año V, No. 17. MasAgro. CIMMYT. Pp. 26-27.
- Eastmond, Amarella y García de Fuentes Ana. s/f. Impactos de los sistemas agropecuarios sobre la biodiversidad.
- Enciso, Medina Juan. 1997. Riego por aspersión. En: Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. CONAGUA. IMTA. pp. 1-123 a 1-139.
- Estrada-Medina, Héctor; Cobos-Gasca, Víctor; Acosta-Rodríguez José Luis; Peña-Fierro, Sergio, *et al.* 2016. La sequía de la península de Yucatán. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. VII, núm. 5. Pp. 151-165.
- Gómez-Pompa, A.; Flores, J. S. y; Sosa, V. 1987. The "Petkol" a man-made tropical forest of the maya. *Interciencia*. 2:10-15.
- Hatfield, L. y Fuchs, M. 1990. Evapotranspiration models. In: Hoffman, Glenn J.; Howell, Terry A. y; Solomon, Kenneth H. (edited). Management of Farm Irrigation Systems. ASSAE Monograph. St. Joseph, MI. USA. pp. 33-59.
- Hernández, Xolocotzin Efraín. 1985. La agricultura en la Península de Yucatán. En: *Xolocotzia*. Tomo I. Obras de Efraín Hernández Xolocotzin. Revista de Geografía Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo estado de México. Pp. 371-409.
- IMTA. 2009. Establecimiento de módulos demostrativos de drenaje agrícola en el área de influencia de las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, Chiapas. Informe final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Riego y Drenaje. Jiutepec, Morelos. 138 pp.



- INEGI y Gobierno del estado de Yucatán. 2002. Estudio hidrológico del estado de Yucatán. Aguascalientes, Ags. 92 pp.
- Medina, Zaldívar, Jorge; Franco, Cáceres Carlos y; Domínguez castro José Luis. 1984. Conformación y características de la región oriente del estado de Yucatán. *Revista de Geografía Agrícola. Análisis Regional de la Agricultura*. Número 5-6. Universidad Autónoma Chapingo. Pp. 139-143.
- Morales, Carmen. 1984. Delimitación y características de la región sur de Yucatán. *Revista de Geografía Agrícola. Análisis Regional de la Agricultura*. Número 5-6. Universidad Autónoma Chapingo. Pp. 164-170.
- Morales, Carmen y Rosales, Margarita. 1984. El sur de Yucatán. *Revista de Geografía Agrícola. Análisis Regional de la Agricultura*. Número 5-6. Universidad Autónoma Chapingo. Pp. 144-150.
- Moya, G. X.; Caamal, A.; Ku, K. B.; Chan, X. E.; Armendriz, I.; Flores, J.; Moguel, J.; Noh, P. M.; Rosales, M.; Xool, D. J. 2003. La agricultura campesina de los mayas en Yucatán. *LEISA. Revista de agroecología*. Edición especial. Ocho estudios de caso. Pp. 7-17.
- Muñoz, Cervantes E. G. 2006. Cha'c, un dios entre la milpa y el riego. *Revista de Geografía Agrícola. Análisis Regional de la Agricultura*. Número 36. Universidad Autónoma Chapingo. Pp. 43-53.
- Ochoa, Lorenzo y González-Jácome, A. 2011. El antes y el después de los humedales en la Península de Yucatán, Campeche. En: Martínez, Saldaña Tomás (editor general). Riegos ancestrales en Iberoamérica. Técnicas y organización social del pequeño riego. BBA. CP. UACH. UAAAN. INIFAP. Pp. 177-185.
- Ojeda, B. W.; Sifuentes, I. E.; Íñiguez, C. M. y Montes, M. M. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*. 45:1-11.
- Ojeda, Bustamante Waldo; Martínez, Austria Polioptro y Hernández, Barrios Leonardo. 2008. Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. En: Martínez, Austria Polioptro y Aguilar, Chávez Ariosto (editores). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen II. SEMARNAT. IMTA. Jiutepec, Morelos México. Pp. 73-83.
- Orellana, Roger; Espadas, Celene; Conde, Cecilia y; Gay, Carlos. 2009. Atlas escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán. Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán y, Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Mérida, Yucatán.
- Orellana, Roger; Espadas, C.; Nava, F. 2010. Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. Mérida, Yucatán.
- Osorio-Arce, M. M.; Segura, C. J. C.; Osorio, A. D. A. y; Marfil, A. A. 1999. Caracterización de la ganadería lechera del estado de Yucatán, México. *Revista Biomédica*. Vol. 10. Núm. 4. Pp. 217-227.



- Palacios, V. E. 1982. Estimación de los requerimientos de agua de los cultivos para conocer el cuándo y cuánto regar. En: Recopilación de artículos publicados en diferentes revistas técnicas. CP. Centro de Hidrociencias. Pp. 69-97.
- Paoli, Antonio. 1984. Movimientos político-sociales y definición geo-histórica de la Península de Yucatán. *Revista de Geografía Agrícola. Análisis Regional de la Agricultura*. Número 5-6. Universidad Autónoma Chapingo. Pp. 112-122.
- Quiñones, Pedroza H. E. 1997. Necesidades hídricas de los cultivos. En: Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. CONAGUA. IMTA. pp. 1-13 a 1-40.
- Romero, David; Torres-Irineo, E.; Kern, S.; Orellana, R.; Hernández-Cerda, M. E. 2017. Determination of the soil moisture recession constant from satellite data: a case study of the Yucatán peninsula. *International Journal of Remote Sensing*. 38:20, 5793-5813.
- Rosales, Margarita y Rejón, Lourdes. 1984. Hacia una aproximación a las unidades de producción en la región sur de Yucatán. *Revista de Geografía Agrícola. Análisis Regional de la Agricultura*. Número 5-6. Universidad Autónoma Chapingo. Pp. 171-189.
- Segura-Castruita, M. A. y; Ortíz-Solorio, C. A. 2017. Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. 8. Núm. 3. Pp. 93-110.
- Soil Conservation Service. 1997. Requerimientos de agua para riego. Traducción del capítulo 2, parte 623 del Manual Nacional de Ingeniería del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. CONAGUA. CP. 405 Pp.
- Springall, Galindo Rolando. 1986. Apuntes de análisis estadístico y probabilístico de datos hidrológicos. Hidrología superficial. UNAM. Facultad de Ingeniería. México, D.F. 140. Pp.
- Uzcanga-Pérez, N. G.; Cano-González, A.; Ramírez-Silva, J.; Aguilar-Duarte, y; Tun-Dzul, J. 2015. Indicadores económicos del cultivo de maíz según la clasificación maya de los suelos en la Península de Yucatán. Memorias del XL Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. División III. pp. 973-977.