

Sistema de información agroclimático para México-Centroamérica

José Ariel Ruiz-Corral¹

Guillermo Medina-García^{2§}

Giovanni Emmanuel García Romero¹

¹Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco-INIFAP. Carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno km 8, Tepatitlán, Jalisco, México. ²Campo Experimental Zacatecas-INIFAP. Carretera Zacatecas-Fresnillo km 24.5, Calera, Zacatecas, México.

§Autor de correspondencia: medina.guillermo@inifap.gob.mx

Resumen

Se obtuvo un sistema de información conformado por imágenes raster mensuales, estacionales y anuales, correspondientes a parámetros climáticos y agroclimáticos para la región México-Centroamérica. Este logro involucró procesos de conformación de bases de datos climáticos diarios y mensuales para el período 1961-2010, revisión de información para eliminar datos aberrantes y estimar datos perdidos; interpolación geográfica mediante el método Anusplin para generar imágenes raster mensuales de variables climáticas básicas (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación), álgebra de mapas y análisis espacial para generar parámetros agroclimáticos derivados de las variables climáticas básicas; utilización de información climática de una red de estaciones agrometeorológicas automatizadas para estimar parámetros ajustados al método de referencia; estimación de parámetros agroclimáticos mediante métodos indirectos y utilización de información derivada de modelos de asimilación de datos para la generación de parámetros agroclimáticos complementarios. Los resultados mostraron la obtención de un sistema de información compuesto de imágenes raster que representan el valor promedio para el período 1961-2010 de 144 variables mensuales (temperatura máxima Tx, temperatura mínima Ti, temperatura media Tm, rango térmico RT, suma térmica ST, grados-día desarrollo acumulados GDD, fotoperíodo F, precipitación P, evapotranspiración potencial ETP, índice de humedad IH, radiación solar Rs y humedad relativa HR); 41 variables estacionales correspondientes a la estación de crecimiento (las variables anteriores más duración de la estación de crecimiento DEC, y número de mese húmedos MH= $P \geq ETP$); 13 variables anuales (mismas variables mensuales más número de meses húmedos) y la variable altitud. Las imágenes raster están referidas en el sistema WGS, pueden ser utilizadas en cualquier sistema de información geográfica (SIG) y cuentan con una resolución de 30" arco. El sistema es potencialmente útil para caracterizar la variación de las condiciones agroclimáticas de México y Centroamérica.

Palabras clave: Centroamérica, estacionales y anuales, estación de crecimiento, imágenes raster, México, parámetros agroclimáticos mensuales.

Recibido: noviembre de 2017

Aceptado: enero de 2018

Introducción

La variación espacio-temporal del clima, implica la necesidad de contar con bases de datos y sistemas de información que permitan caracterizar adecuadamente dicha variación en términos cuantitativos. La disponibilidad de sistemas de información es relativamente limitada cuando se requiere cierto nivel de especialización de la información y cuando las regiones de estudio son de extensión territorial considerable.

Actualmente, los sistemas de información nacionales e internacionales disponibles hacen referencia fundamentalmente a variables climáticas básicas (Medina y Ruiz, 2004; Hijmans *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2008; SMN, 2017), esto es temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación pluvial, las cuales en un sistema de información geográfica (SIG) pueden ser transformadas en otros parámetros climáticos o agroclimáticos. Aun así, existen parámetros agroclimáticos que difícilmente se encuentran disponibles a través de estos sistemas de información, tales como evapotranspiración potencial, índice de humedad, estación de crecimiento, humedad relativa y radiación solar.

Por esta razón, la motivación de la presente investigación fue generar un sistema de información agroclimática para usarse en ambiente SIG y correspondiente a dos regiones que tradicionalmente carecen de este tipo de información: México y Centroamérica.

La generación de un sistema de información agroclimática requiere fuentes de información climática y además recursos adicionales de datos que permitan inferir variables que no pueden ser derivadas fácilmente a partir de variables climáticas básicas, tal es el caso de humedad relativa, radiación solar y velocidad de viento. Una alternativa reciente como fuente de información para estos parámetros la constituyen los modelos globales y sistemas de asimilación de datos (Rodell *et al.*, 2004; Friedl *et al.*, 2010; Rui y Beaudoin, 2017).

Otra estrategia para tratar de recuperar o generar información respecto a parámetros agroclimáticos es utilizar datos de redes de estaciones agrometeorológicas automatizadas, sin embargo, en México carecen de un record de datos extenso, por lo que no son viables para utilizarse directamente en la generación de valores normales climáticos o agroclimáticos (OMM, 2011), pero sí en trabajos de generación, validación o ajuste de modelos estimativos.

Las redes de estaciones agrometeorológicas automatizadas proveen datos de variables climáticas básicas y datos de variables agroclimáticas, esto representa la ventaja de modelar variables agroclimáticas a partir de variables climáticas básicas y poder inferir información a una determinada área de estudio a través de la aplicación de modelos estimativos. En la presente investigación, se utilizaron datos de una red de estaciones agrometeorológicas automatizadas para generar rasters mensuales de evapotranspiración potencial (ETP) por el método de Thornthwaite (1948) ajustado al método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), aprovechando que las estaciones de dicha red arrojan el dato de ETP con este último método.

Con la recuperación de todos los parámetros mencionados anteriormente, es posible conformar sistemas de información más robustos que permitan mejorar las capacidades de análisis y caracterización agroclimática de una región determinada. En el presente estudio, se obtuvieron

imágenes raster temáticas de la mayor parte de estos parámetros, lo cual hizo posible entre otros logros, la generación de la capa de estación de crecimiento y la caracterización de parámetros climáticos y agroclimáticos referidos a este período. Se espera que el sistema de información que se presenta a través de este documento, se constituya como una herramienta valiosa para desarrollar aplicaciones a mayor detalle de la información climática en la agricultura.

Materiales y métodos

Información climática

Se trabajó con datos diarios y mensuales de precipitación y temperatura de 3 026 estaciones meteorológicas localizadas en México y Centroamérica. Para las estaciones de México se consideró el período 1961-2010 y para las estaciones de Centroamérica se tomó en cuenta el período 1961-2014.

En cuanto a las variables humedad relativa y radiación solar, se utilizó información derivada del modelo global y sistema de asimilación de datos en tierra de la NASA (NASA, 2017), el cual proviene del satélite meteorológico GEOS-4 (Goddard Earth Observing System versión 4) para el período 1983-2007, y del satélite GEOS-5.2 para el período 2008-2015.

Para estimar la variable ETP se utilizó información diaria y mensual de temperatura y ETP Penman-Monteith derivada de la red de estaciones agrometeorológicas del INIFAP, la cual proveyó datos entre los años 2000 y 2016.

Análisis y depuración de información climatológica

A partir de la información de las estaciones meteorológicas se crearon archivos de texto para cada año de cada una de las estaciones y se procedió a identificar los datos fuera de tipo con ayuda del programa Excel y un programa de computadora desarrollado en el lenguaje C++ para este propósito. Los registros fuera de tipo fueron eliminados de la base de datos. Las correcciones hechas con esta herramienta se derivaron de los siguientes criterios: la temperatura mínima no debe ser mayor que la temperatura máxima, la diferencia entre el dato de temperatura posterior y anterior no debe ser mayor de 7 °C.

Al ocurrir esta condición el programa revisa las posibles causas y acepta como válidas, la presencia de una helada, la ocurrencia de precipitación o la presencia de un norte o frente frío. Para el caso de la precipitación, fueron revisadas todas las lluvias de más de 90 mm en un período de 24 h, aceptando como válidos aquéllos eventos que se repitieron en por lo menos una estación vecina. Para esto se revisaron los registros climatológicos de por lo menos tres estaciones cercanas, procurando que presentaran las mismas o similares condiciones agroecológicas, topográficas y fisiográficas. Posteriormente, la información se filtró por calidad de datos mediante el programa R-Climdex (Zhang y Yang, 2004). En este programa se toman en cuenta los siguientes criterios: la temperatura mínima no debe sobrepasar la temperatura máxima, la cual no debe exceder los 50 °C, y la precipitación pluvial no debe sobrepasar los 500 mm en 24 h.

La estimación de datos perdidos de temperatura se realizó con la media aritmética para el caso de un día perdido, y siguiendo la tendencia de los datos cuando se tenían hasta cinco fechas con información faltante. En el caso de la precipitación, ésta se estimó con valor cero para días ubicados fuera de la temporada de lluvias, cuando eran hasta cinco días sin dato, siempre que se tratara de años normales, esto es sin considerar años niño y años niña.

Para períodos con datos faltantes superiores a 5 días se utilizó el programa CLIMGEN (Nelson, 2003) para estimar datos de temperatura y precipitación. Este programa se basa en estadísticas generadas a partir de los datos diarios. Sólo se generaron datos faltantes respetando los datos reales que se tenían. Después de estos procesos de corrección y estimación de información, se unieron nuevamente los archivos de texto que se tenían por años, para pegarlos en una hoja de cálculo de Excel diseñada con tablas dinámicas y fórmulas, mediante las cuales se obtuvieron las estadísticas climáticas normales para cada una de las estaciones seleccionadas con base en variables climáticas básicas.

Se calcularon estadísticas climáticas normales para el período 1961-2010 en el caso de estaciones meteorológicas de México y para el período 1961-2014 para las estaciones meteorológicas de Centroamérica. Para ello se utilizó la hoja de cálculo Excel de Microsoft.

Procedimientos

Generación de imágenes mensuales normales de variables climáticas básicas

A partir de la base de datos climatológicos diarios y mensuales integrada y las coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas consideradas, se generó una matriz de datos climáticos normales (promedios históricos) georreferenciados. Esta matriz de datos climáticos se utilizó como insumo para alimentar procesos de interpolación geográfica y mediante el método Anusplin obtener imágenes mensuales que se recuperaron en formato raster en el sistema Idrisi Selva (Eastman, 2012) correspondientes a los valores normales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación para México y Centroamérica. Los procesos de interpolación se ejecutaron considerando una resolución de 30'' arco.

Parámetros climáticos y agroclimáticos derivados de variables climáticas básicas

A partir de las variables climáticas básicas y con la aplicación de procedimientos de álgebra de mapas en el sistema Idrisi Selva, se generaron los siguientes parámetros mensuales adicionales: temperatura media, rango u oscilación térmica, suma térmica, grados-día desarrollo y fotoperiodo. Los procedimientos de álgebra de mapas se implementaron en la calculadora del sistema Idrisi Selva y consistieron en los siguientes cálculos:

$$T_m = (T_x + T_i)/2$$

Donde: T_m = temperatura media mensual (°C); T_x = temperatura máxima media mensual (°C) y T_i = temperatura mínima media mensual (°C).

$$RT = T_x - T_i$$

Donde: RT= rango u oscilación térmica mensual (°C).

$$ST = \sum_{i=1}^n T_m$$

Donde: ST= suma térmica mensual (°C); n= número de días del mes en cuestión.

$$GDD = (T_m - T_b)n$$

Donde: GDD= grados-día de desarrollo acumulados en el mes; T_b= 10 °C (temperatura umbral mínima o temperatura base de diversas especies cultivadas).

$$F = 2h/15$$

Donde: F= fotoperíodo (horas); h= ángulo horario de la salida o puesta del sol; $h = \text{ArcCos}(-\tan \phi \tan \delta)$; ϕ = latitud en grados; δ = declinación solar en grados; $\delta = 23.45 \text{sen} = [360 \left(\frac{284 + D_j}{365} \right)]$; D_j= día juliano. Para este estudio se tomó el día juliano correspondiente al día 15 del mes en cuestión.

Dado que el cálculo de F implicó contar con una imagen de latitud del área de estudio, ésta se obtuvo mediante interpolación con el método distancia inversa ponderada, utilizando una matriz georreferenciada de valores de latitud cada grado. La interpolación se realizó en el sistema Idrisi Selva.

Evapotranspiración potencial, índice de humedad y estación de crecimiento

A partir de los datos diarios y mensuales de temperatura de la red de estaciones agrometeorológicas del INIFAP, se calculó a escala diaria y mensual la ETP por el método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite y Mather, 1955; Feddema, 2005), los valores mensuales de ETP de Thornthwaite (ETPTH), se compararon con los valores mensuales de ETP Penman-Monteith (ETPPM) y se obtuvieron factores de ajuste regionales mes por mes para obtener valores de ETPTH ajustados a ETPPM. Los factores de ajuste regionales se calcularon considerando una regionalización agroclimática de México-Centroamérica realizada en este mismo estudio considerando las zonas de aridez propuestas por UNEP (UNEP, 1992a) y el esquema de zonas térmicas utilizado por García en la adaptación del sistema de clasificación climática Köppen a la República Mexicana (García, 2004).

Los factores de ajuste se obtuvieron primero obteniendo las diferencias ETPPM - ETPTH en cada uno de los meses y en cada una de las estaciones agrometeorológicas, luego calculando el valor de la mediana de estas diferencias, pero considerando solamente las estaciones agrometeorológicas que pertenecían a una misma región agroclimática. Finalmente se utilizaron los factores de ajuste para actualizar las imágenes de ETPTH y así obtener los rasters mensuales ajustados a ETPPM.

Con los valores mensuales de precipitación y ETPPM ajustados se procedió a calcular el índice de humedad (IH).

$IH = P/ETPPM$ ajustado

Donde: IH= índice de humedad mensual (adimensional) y representa el porcentaje de satisfacción de la demanda hídrica del mes en cuestión; P= precipitación acumulada promedio mensual del mes en cuestión (mm).

Obtenidas 12 imágenes mensuales de IH para el área de estudio, se procedió a generar una matriz de datos georreferenciados de IH mensuales mediante la extracción de valores de IH a partir de las imágenes mensuales con el sistema ArcGis (ESRI, 2006) y para una cuadrícula de 4.5' arco. Esta matriz se trabajó en Excel para calcular la fecha de inicio (IEC) y fecha de finalización (FEC) de la estación de crecimiento (EC), utilizando el método de FAO (FAO, 1978), el cual considera que la EC inicia cuando $IH < 0.5$ y termina cuando $IH \geq 0.5$, y termina cuando $IH \leq 0.5$. Las fechas de IEC y FEC se transformaron en días julianos y se calculó el parámetro duración de la estación de crecimiento (DEC) mediante la expresión:

$DEC = FEC - IEC$

Donde: DEC= duración de la estación de crecimiento (días).

Generación de imágenes mensuales normales de variables derivadas de datos asimilados

Las variables humedad relativa y radiación solar se obtuvieron a partir de información de datos asimilados. Para ello se utilizó información derivada del modelo global y sistema de asimilación de datos en tierra de la NASA (NASA, 2017), el cual proviene del satélite meteorológico GEOS-4 (Goddard Earth Observing System versión 4) para el período 1983-2007 y del satélite GEOS-5.2 para el período 2008-2015. Dicha información se descargó del sitio: <http://gmao.gsfc.nasa.gov/>. Dado que esta fuente de información posee una resolución de $1^\circ \times 1^\circ$ de longitud y latitud, para efectos de la descarga de datos se consideró una serie de puntos coordenados representativa de los nodos formados del cruce de una malla de $1^\circ \times 1^\circ$ longitud x latitud dentro de México-Centroamérica.

La descarga de información se realizó de manera automatizada mediante una aplicación programada en la plataforma de R. A partir de esta descarga de datos se conformó una serie de tiempo 1984-2015 de datos diarios de radiación solar y humedad relativa para cada nodo coordinado. Se utilizaron los datos diarios de estas variables para calcular valores promedio normales mensuales y se conformó una matriz de datos georreferenciada a partir de la cual se hicieron interpolaciones con el método kriging ordinario y el modelo espacial de mejor ajuste, el cual fue obtenido con el programa GS+; en todos los casos el mejor modelo fue el exponencial.

Resultados y discusión

Variables climáticas básicas

Se obtuvieron imágenes raster de temperatura máxima media, temperatura mínima media y precipitación acumulada promedio mensual para cada uno de los meses de enero a diciembre, dando un total de 36 rasters correspondientes a las variables climáticas básicas de

México-Centroamérica. Cada imagen está compuesta de dos archivos: un archivo con extensión. RST que corresponde al raster y uno más con extensión. RDC que corresponde a la documentación del raster.

Parámetros climáticos y agroclimáticos derivados de variables climáticas básicas

A partir de las variables climáticas básicas y con la aplicación de procedimientos de álgebra de mapas en el sistema Idrisi Selva, se generaron los siguientes parámetros mensuales adicionales: temperatura media, fotoperiodo, oscilación térmica, suma térmica y grados-días de desarrollo, produciendo un total de 60 imágenes mensuales más.

Evapotranspiración potencial

La generación del mapa de regiones agroclimáticas de México y Centroamérica produjo 26 regiones, para las cuales se obtuvo un factor de corrección para ajustar la ETP de Thornthwaite (ETPTH) a ETP Penman-Monteith (ETPPM) regionalmente y para toda el área de estudio. Los valores de ajuste por región agroclimática mes por mes de enero a diciembre se describen a continuación. Dichos valores tienen que aplicarse a los valores de ETPTH para llevarlos a valores milímetros mensuales de ETPPM.

Región húmeda fría: 22.5, 25.2, 34.8, 34.9, 28.0, 14, 13.6, 12, 7.1, 12.7, 17.9, 21.4
 R. Hiperárida semicálida: 62.1, 71.6, 95.8, 101, 94.8, 30.2, -1.4, -8.5, 71.1, 42, -2.5, 57.9
 R. Hiperárida cálida: 63.7, 65.6, 98.6, 112.6, 108.2, 22.5, -28.5, -40.2, -26.8, 34.2, 82.4, 55.5
 R. Árida templada: 74.4, 84.5, 112.9, 108, 98.4, 67.2, 52.8, 58.6, 45.8, 66.2, 62.3, 66.6
 R. Árida semicálida: 60.5, 77.6, 93, 89.5, 81.3, 37.9, 25.8, 23.2, 21.8, 49.7, 59.8, 60.3
 R. Semiárida semifría: 62.2, 73.3, 94, 90.5, 75.5, 49.4, 42.1, 49, 34.8, 52.4, 54, 59.4
 R. Árida cálida: 67.3, 77.4, 100.8, 102.3, 88.5, -4.7, -53, -53.8, -32.5, 26.3, 55.1, 62
 R. Semiárida templada: 67.8, 80.8, 102.6, 97.6, 82, 58.8, 48.6, 56.1, 40.7, 60.2, 58.8, 64.2
 R. Subhúmeda-seca semifría: 56.5, 65.9, 85.3, 83.4, 69, 40, 35.6, 42, 28.9, 44.7, 49.2, 54.7
 R. Semiárida semicálida: 60.2, 70.4, 88.9, 82, 65, 46.3, 44.6, 52.4, 40.7, 52.6, 57.4, 54.9
 R. Semiárida cálida: 52, 63.7, 77.3, 73, 56.2, -15.2, -45.2, -47.2, -36.7, 11.9, 41.8, 50.8
 R. Subhúmeda-húmeda semifría: 39.2, 71.4, 86, 74.5, 60.9, 40.8, 38, 48.4, 32.8, 50.6, 55.1, 57.6
 R. Subhúmeda-seca templada: 62.6, 71.4, 86, 74.5, 60.9, 40.8, 38, 48.4, 32.8, 50.6, 55.1, 57.6
 R. Semiárida muy cálida: 16.6, 4.5, 18.4, -10.6, -66, -54.9, -24, -19.5, -18.2, -14.2, -0.8, 7.8
 R. Subhúmeda-seca semicálida: 48.1, 60.6, 77.9, 66.3, 53, 36.9, 33.2, 40.4, 36.1, 47.5, 59.3, 56.1
 R. Húmeda semifría: 33.7, 37.9, 52.3, 52.3, 42, 21, 20.4, 18, 10.7, 19, 26.9, 32.1
 R. Subhúmeda-seca cálida: 39.2, 47.2, 53, 37.2, 23, 2.5, 2.2, 0.6, 6, 11.8, 27.5, 32.8
 R. Subhúmeda-húmeda templada: 52.8, 60.4, 72.4, 69.2, 50.8, 34.2, 32.3, 33.6, 23.6, 37.7, 41.4, 46.4
 R. Subhúmeda-húmeda semicálida: 45, 46.1, 53.7, 54.1, 41.5, 22.7, 17.4, 12.7, 15, 31.5, 35.9, 38.2
 R. Subhúmeda-seca muy cálida: 15.2, 27.2, 43.9, 35.4, -5.8, -44.1, -52, -46, -43, -39.5, -10.6, -0.4
 R. Húmeda templada: 43, 45.6, 69.6, 61.8, 53.4, 29.5, 29.2, 16.8, 5.9, 15.3, 32.6, 39.8
 R. Subhúmeda-húmeda cálida: 29.6, 36.4, 39.5, 18.8, -5.9, -23.1, -20.9, -17.1, -15.4, 4.5, 23.9, 27.3
 R. Húmeda semicálida: 14, 17, 31.7, 10.2, 3.8, -3.4, 0.4, 6.5, -3.9, 13.4, 13.6, 15.1

R. Subhúmeda-húmeda muy cálida: 24.5, 26.7, 30.1, 15.1, -15.8, -23.7, -17.6, -9.6, -14.9, 2.8, 21.3, 21.9

R. Húmeda cálida: 13.6, 18.6, 23.6, -6.9, -28, -38.6, -33.4, -28.4, -25.9, -6.8, 3.9, 6.4

R. Húmeda muy cálida: 3.7, 13.5, 15.2, -5.2, -27.1, -40.1, -31.8, -27.7, -23.8, -13.4, 4.2, 10.1.

Índice de humedad y estación de crecimiento

Una vez obtenida la ETP ajustada a Penman-Monteith fue posible realizar un balance hídrico simple a través del cálculo del índice de humedad mensual (IHM) producto del cociente P/ETPPM mes por mes. Con los valores de IHM se dedujeron las fechas promedio de inicio y fin de la estación de crecimiento, con lo que se obtuvo el parámetro duración de la estación de crecimiento (DEC). Los resultados de este parámetro mostraron gran diversidad en cuanto a la disponibilidad del número de días de DEC en la región México-Centroamérica, ya que los valores obtenidos van desde 0 hasta 365 días al año, es decir, existen regiones donde no existe estación de crecimiento, así como regiones donde es posible cultivar todo el año.

Los parámetros IH y DEC representan un recurso informático importante y una ventaja comparativa con relación a los sistemas de información ambiental actualmente disponibles para México y Centroamérica, tal es el caso del sistema WorldClim que aun cuando es el sistema de mayor utilización a escala mundial y regional, no contiene información de estos parámetros (Hijmans *et al.*, 2005). La disponibilidad de información sobre estos parámetros a través del SIAMEXCA permitirá incrementar la precisión en el diagnóstico de las condiciones de humedad disponible para la agricultura (Hargreaves y Allen, 2003).

Variables derivadas de modelos globales y datos asimilados

Las imágenes mensuales de humedad relativa promedio y radiación solar promedio se obtuvieron satisfactoriamente y se constituyen como un recurso informático para caracterizar la disponibilidad de estos parámetros en la región de estudio. Aplicaciones regionales relacionadas con la presencia y distribución potencial de patógenos de cultivos y la caracterización de índices de confort ambiental para el ganado (Marami *et al.*, 2015), entre otras, ahora son posibles con la disponibilidad de estos parámetros.

El sistema de información agroclimática de México-Centroamérica (SIAMEXCA) provee al usuario la capacidad de poder generar imágenes raster correspondientes a variables climáticas y agroclimáticas adicionales de una manera sencilla a través de rutinas de álgebra de mapas dentro de un sistema de información geográfica (SIG). Este es el caso de variables como temperatura nocturna y temperatura diurna, importantes para cultivos termoperiódicos (Markovskaya *et al.*, 1996) o con tipo fotosintético CAM (Yamori *et al.*, 2014). Otros parámetros agroclimáticos importantes como horas frío, unidades frío o unidades fototérmicas también pueden ser estimados mediante estos procedimientos.

El sistema de información agroclimática obtenido (SIAMEXCA) puede ser descargado a través de la siguiente liga: <http://www.inifapcirpac.gob.mx/siamexca.html>.

Finalmente es de comentar que el sistema SIAMEXCA es susceptible de un proceso de mejora continua, el cual esperamos los autores se ejecute una vez que se presente la oportunidad de incorporar nueva información.

Conclusiones

El sistema de información agroclimática obtenido para México y Centroamérica, puede constituirse como una herramienta informática de gran ayuda para la caracterización de las disponibilidades climáticas para la práctica de agricultura en estas regiones geográficas. El sistema SIAMEXCA es susceptible de un proceso de mejora continua.

Agradecimientos

Este artículo y sistema es producto del proyecto INIFAP 1228033017: cambio climático y su impacto sobre el rendimiento, producción y viabilidad del cultivo de maíz en las áreas agrícolas de México.

Literatura citada

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements-. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome. 176-28 pp.
- Díaz, P. G.; Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G. y Serrano, A. V. 2008. Estadísticas climatológicas básicas del estado de México (período 1961-2003). INIFAP-CIRGOC-C.E. Cotaxtla-Sitio Exp. Teocelo. Xalapa, Veracruz, México. Libro técnico núm. 20. 32-37 pp.
- Eastman, J. R. 2012. Idrisi manual, the selva Edition. Clark Labs, Clark University. Massachusetts, USA. 106-113 pp.
- ESRI. 2006. ArcGIS 9, ArcMap Tutorial. Manual de programa. Redlands, CA, USA. 31-39 pp.
- Feddema, J. J. 2005. A revised thornthwaite-type global climate classification. *Physical Geography*. 26(6):442-466.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1978. Agroecological zones project. World soil resources. Africa. Geneva, Switzerland. Report num. 48(1):8-35.
- Friedl, M. A.; Sulla, M. D.; Tan, B.; Schneider, A.; Ramankutty, N.; Sibley, A. and Huang, X. 2010. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*. 114(1):168-182.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 5^{ta}. Edición. Serie Libros número 6. Instituto de Geografía-Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México, D. F. 50-57 pp.
- Hargreaves, G. H. and Allen, R. G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 129(1):53-63.
- Hijmans, R. J.; Cameron, S. E.; Parra, J. L.; Jones, P. G. and Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Inter. J. Climatol.* 25(15):1965-1978.

- Marami, M. M. R.; Hense, A.; Rahmani, E. and Ploeger, A. 2015. A survey of the relationship between climatic heat stress indices and fundamental milk components considering uncertainty. *Climate*. 3(4):876-900. doi:10.3390/cli3040876.
- Markovskaya, E. F.; Sysoyeva, M. I. and Bezdenezhnykh, V. A. 1996. Termoperiodicity of crop plants and strategies for climate control. *J. Agric. Sci.* 127(4):425-431.
- Medina, G. G.; Ruiz, C. J. A. y Martínez, P. R. A. 1998. Los climas de México: una estratificación ambiental basada en el componente climático. Guadalajara, Jalisco, México. INIFAP-CIRPAC. Guadalajara, Jalisco, México. 103 p.
- Medina, G. G. y Ruiz, C. J. A. 2004. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Zacatecas (Período 1961-2003). INIFAP-CIRNOC-C.E. Zacatecas. Calera de V.R., Zacatecas, México. Libro técnico núm. 3. 26-30 p.
- NASA. 2017. Recursos climatológicos. <http://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/cgiwrap/solar/agro.cgi?email=agroclim@larc.nasa.gov>. 1-21 pp.
- Nelson, R. 2016. ClimGen user manual. URL: http://modeling.bsyse.wsu.edu/CS_Suite/ClimGen/manual/parameters/parameterization.htm. 1-28 pp.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 201. Guía de prácticas climatológicas. OMM No. 100. Ginebra, Suiza. 2/1-2/22 pp.
- Rodell, M.; Houser, P. R.; Jambor, U.; Gottschalck, J.; Mitchell, K.; Meng, C. J.; Arsenault, K.; Cosgrove, B.; Radakovich, J.; Bosilovich, M.; Entin, J. K.; Walker, J. P.; Lohmann, D. and Toll, D. 2004. The global land data assimilation system, *bull. Amer. Meteor. Soc.* 85(3):381-394.
- Rui, H. and Beaudoin, H. 2017. Readme document for GLDAS Version 2 data products. NASA Goddard Space Flight Center. Code 610.2. Greenbelt, MD 20771, USA. 1-21 pp.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2017. Normales climatológicas por estación. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75.
- Thorntwaite, C. W. 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*. 38(1):55-94.
- Thorntwaite, C. W. and Mather, J. R. 1955. The water balance. *Publications in Climatology*. 8(1):14-33.
- UNEP (United Nations Environmental Program). 1992a. Status of desertification and implementation of the United Nations Plan of Action to combat desertification. Report of the Executive Director. UNEP. 1-88 pp.
- UNEP (United Nations Environmental Program). 1997. World Atlas of Desertification. Second Edition. Editorial commentary by Middleton N. and Thomas D. S. G. London: Edward Arnold. 1-182 pp.
- Yamori, W.; Hikosaka, K. and Way, D. A. 2014. Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynth. Res.* 119(1-2):101-117. doi: 10.1007/s11120-013-9874-6.
- Zhang X. and Yang, F. 2004. RCLimDex (1.0). User manual. Climate research branch environment Canada. Downsview, Ontario, Canada. 1-23 pp.