

**FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES Y AGROPECUARIAS**

**Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero
Agrónomo**

**Título: Determinación de la evapotranspiración en el
agroecosistema Mayarí mediante teledetección.**

Autor: Davicel Hernández Domínguez

Tutores: Ing. Roberto Alejandro García Reyes

Ms C. Juan Alejandro Villazón Gómez

Holguín 2021

RESUMEN

La evapotranspiración de un cultivo expresa la pérdida de agua en forma de vapor lo que influye de forma directa en el rendimiento y en el manejo del agua. Las técnicas de teledetección permiten la estimación de este parámetro del cultivo a través de imágenes de satélites. El objetivo de la investigación fue la determinación de la evapotranspiración del agroecosistema Mayarí a partir del uso de la teledetección. Se utilizó el software QGIS 3.10 "A Coruña" para la proyección de puntos aleatorios en una capa proyectada en el sistema WGS84 /UTM zona 18 N. Se utilizó para la obtención de las variables climáticas temperatura media mensual y radiación solar el WorldClim 2. En el software ArcGIS 3.5 se realizó el cálculo de la evapotranspiración por el método de Hargreaves. Los resultados del análisis descriptivo de la evapotranspiración mensual obtenida por el método Hargreaves en WorldClim 2, se observa que los valores medios más bajos se corresponden a los meses de enero. Existe una mayor dispersión de los datos expresada por el coeficiente de variación para el mes de diciembre (33,75 %) y menor para el mes de julio (19,14 %). Se encuentra que los valores que toma la evapotranspiración son en general asimétrico negativos a la izquierda de la curva mientras que la curtosis no se ajustan a una distribución normal. Los mapas temáticos al respecto, brindan información acerca de cómo varía de forma espacial la evapotranspiración en dicho agroecosistema y en todos los casos muestra la presencia de tres zonas homogéneas.

ABSTRACT

The evapotranspiration of a crop expresses the loss of water in the form of vapor, which directly influences the yield and water management. Remote sensing techniques allow the estimation of this crop parameter through satellite images. The objective of the research was to determine the evapotranspiration of the Mayarí agroecosystem from the use of remote sensing. The QGIS 3.10 "A Coruña" software was used for the projection of random points in a projected layer in the WGS84 / UTM zone 18 N system. WorldClim 2 was used to obtain the climatic variables, mean monthly temperature and solar radiation. The ArcGIS 3.5 software was used to calculate the evapotranspiration by the Hargreaves method. The results of the descriptive analysis of the monthly evapotranspiration obtained by the Hargreaves method in WorldClim 2, it is observed that the lowest mean values correspond to the months of January. There is a greater dispersion of the data expressed by the coefficient of variation for the month of December (33.75%) and less for the month of July (19.14%). It is found that the values taken by evapotranspiration are in general negative asymmetric to the left of the curve while the kurtosis does not conform to a normal distribution. The thematic maps in this regard provide information about how evapotranspiration varies spatially in said agroecosystem and in all cases shows the presence of three homogeneous zones.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
1. El clima.....	4
1.1. Causas del cambio de clima.....	4
1.2. Variabilidad climática: sus repercusiones en el medio ambiente y el desarrollo	5
1.3. Variables Climáticas.....	6
2. El espectro electromagnético solar.....	6
3. Percepción remota	8
3.1. Sistemas satelitales de adquisición mediante sensores remotos	9
3.2. Respuesta espectral de la vegetación.....	9
3.3. Ventajas y desventajas del uso de teledetección para la planificación de regadíos	12
4. Requerimientos hídricos de cultivo bajo riego	13
4.1. Evapotranspiración de cultivo.....	14
4.2. Factores que afectan la determinación de la evapotranspiración.....	17
5. Metodologías determinación de la evapotranspiración basadas en la temperatura. Ecuación de Hargreaves	18
MATERIALES Y MÉTODOS	22
Características del agroecosistema Mayarí	22
Herramientas utilizadas en el estudio.....	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
CONCLUSIONES.....	31
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos para afrontar la escasez de agua se han transformado en un desafío mundial en el cual nuestra nación y principalmente la provincia de Holguín deben tomar parte. Los grandes avances de los últimos años en la producción de alimentos han posibilitado atender las necesidades de un creciente número de personas. Este hecho es sin dudas auspicioso, pero no debe ignorarse que frecuentemente se logra a costa de los recursos hídricos y de los ecosistemas. Es vital revertir este saldo negativo para lograr que el proceso sea sustentable en tiempo y espacio (FAO, 2013).

Para lograr el desarrollo del sector agrícola se involucran temas sobre la sostenibilidad y gestión del recurso hídrico dentro de las políticas públicas. Diversos programas de modernización como la tecnificación del riego se han implementado en el municipio Mayarí de la provincia Holguín mediante la construcción del trasvase Este-Oeste para el suministro de agua a zonas agrícolas del territorio.

Este tipo de estrategias han generado retos técnicos que requieren un análisis preciso de los volúmenes de riego adecuados para satisfacer la producción agrícola, y al tiempo, no comprometer la disponibilidad de agua en zonas vulnerables. En consecuencia, el monitoreo, y la eficiencia en el manejo del recurso hídrico, pueden ayudar a mitigar una posible sobreexplotación, y obtener mayores rendimientos en los productos agrícolas.

Uno de los problemas que enfrenta la gestión del recurso hídrico en el sector agrícola se presenta en los distritos de riego, donde las acciones de asignación de volúmenes de agua comúnmente denominadas “tandeos” (Pedroza e Hinojosa, 2013), impactan en la disponibilidad del agua en las zonas agrícolas, cuando el personal a cargo regula los volúmenes a los usuarios con un método empírico, surgiendo con ello la necesidad de contar con una alternativa que permita asignar de manera precisa el volumen requerido por los cultivos.

Por otra parte, el método convencional para estimar los volúmenes de riego, parte de la información de estaciones climáticas, cuyo uso como fuente puntual de datos

genera un sesgo en la estimación de volúmenes requeridos en grandes extensiones de cultivo, dificultando su aplicación a gran escala en los distritos de riego.

Estimar la evapotranspiración de los cultivos bajo riego mediante imágenes de sensores remotos ha resultado en la aparición de diversos métodos, esto de acuerdo con el tipo de sensor y bandas del espectro electromagnético que registran.

En este sentido, metodologías particulares como los modelos de balance de energía han sido desarrollados para imágenes satelitales *LANDSAT*, tal como el caso de *SEBAL*, entre otros (Liu *et al.*, 2016).

Finalmente, al estimar los valores de evapotranspiración se favorece una gestión eficiente en el riego (Johnson y Trout, 2012). El análisis espacio-temporal de este parámetro, basado en sensores remotos, mejora la planeación que requiere el sector hídrico y agrícola, al ofrecer una alternativa para cuantificar la cantidad de agua a utilizar en los cultivos; y al sustentar la planeación de ciclos futuros con dicho análisis, se impacta favorablemente los rendimientos agrícolas al tiempo que se anticipa la sobreexplotación, y se monitorea la disponibilidad del recurso hídrico.

La ecuación de FAO 56 Penman-Monteith es la recomendada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación como método estándar para el cálculo de la ET_0 ya que incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y flujo de calor, produciendo globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos (Allen *et al.*, 1998). Es utilizada y recomendada en varios trabajos para establecer la programación del riego contrastándola con datos de humedad de suelo y estado hídrico de la planta (Burt, 2012). Esta ecuación requiere contar con información observada de varios parámetros meteorológicos que no siempre están disponibles, con la densidad de datos necesarios para satisfacer las demandas de los productores agrícolas.

Otras ecuaciones, como la propuesta por Hargreaves y sus modificaciones - ET_0HG (Hargreaves y Samani, 1985; Hargreaves y Allen, 2003), requieren básicamente datos de temperatura para su cálculo, los cuales están disponibles en estaciones meteorológicas.

Por lo antes expuesto se plantea como **problema científico** el siguiente:

¿Cómo determinar la evapotranspiración del agroecosistema Mayarí a partir del uso de la teledetección que garantice una mejor gestión del recurso agua en el territorio?

Ante esta pregunta científica se formula como **hipótesis** la siguiente:

“La teledetección permite determinar la evapotranspiración del agroecosistema Mayarí para una mejor gestión del recurso agua en el territorio”

Para dar cumplimiento a la pregunta científica, se define como **objetivo general**:

“Determinar la evapotranspiración del agroecosistema Mayarí a partir del uso de la teledetección”

Objetivos específicos:

- Determinar la evapotranspiración por el método de Hargreaves en base a la radiación solar a partir de imágenes de WorldClim 2 y datos de estación meteorológica.
- Determinar la variabilidad espacio temporal mensual de la evapotranspiración a partir de las imágenes obtenidas de WorldClim 2 del agroecosistema Mayarí.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. El clima

Se suele definir el clima, en sentido estricto, como el “promedio del estado del tiempo” o, más rigurosamente, como una descripción estadística en términos de valores medios y de variabilidad de las cantidades de interés durante un período que puede abarcar desde algunos meses hasta miles o millones de años (IPCC, 2001).

De acuerdo con Zúñiga y Crespo (2015), el clima de un lugar determinado puede definirse como una descripción estadística del estado atmosférico durante cierto lapso de tiempo.

El planeta se ha encontrado en una constante transformación, debido a diferentes agentes naturales que han generado modificaciones tales como: colosales fuerzas tectónicas y cambios atmosféricos drásticos. Todos estos fenómenos son manifestaciones naturales del entorno geográfico en el que vivimos (Román, 2006).

Sin embargo, la evolución del clima depende de los numerosos elementos como los fenómenos naturales, las actividades antropogénicas y en especial a los gases efecto invernadero (Useros, 2012). El comportamiento de estas variables es un indicador de las condiciones ambientales, a las cuales se han adaptados los seres vivos y entre ellos la humanidad y las plantas (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), 2016). No obstante, en las últimas décadas se ha tenido una influencia mayor en el clima y las temperaturas, provocando alteraciones y acelerando procesos que se demorarían largos periodos de años.

1.1. Causas del cambio de clima

De acuerdo a la percepción de la gente, respecto a las causas del cambio del clima, señalan que un 27% le acredita a la tala de bosques y desertificación, un 16% a la contaminación, los desechos y a la destrucción de la capa de ozono, un 15% al transporte (automotriz, aéreo, ferrocarril, marítimo), un 10% que es un fenómeno natural, un 9% a los procesos industriales y agropecuarios, un 5% por el

uso masivo de combustibles fósiles y un 2% considera que es a otras causas, como el cambio de uso de suelo, crecimiento poblacional, etc.

En el estudio realizado por Pinilla *et al.* (2012) señala que las principales causas de los cambios en el clima son por efectos de ciclos naturales y la contaminación, Sin embargo, reconocen a las acciones antrópicas como dinamizadoras del clima, pero que no hay una relación directa entre el cambio de clima local, con el cambio climático.

1.2. Variabilidad climática: sus repercusiones en el medio ambiente y el desarrollo

Los estudios climáticos se encuentran inmersos en el campo medio ambiental como uno de los factores de mayor relevancia en el ámbito físico-natural, y de grandes causalidades y repercusiones en el ámbito físico-espacial, socio-económico y político institucional. Dichas dimensiones atañen directamente también al desarrollo, por lo cual al referirse a la variabilidad climática y sus efectos sobre una región, se hace notoria su estrecha relación.

Mesa (2007) señala cómo la variabilidad espacial y temporal del clima influye en los ciclos hidrológicos de manera natural en todas las regiones del mundo, sin embargo la regulación natural de las cuencas, productoras de agua, se ve afectada por su manejo inadecuado, manifestándose esto en un régimen hidrológico más irregular, con eventos más críticos y mayores temporadas de sequía. Estos fenómenos afectan considerablemente el desarrollo de las regiones al haber déficit en el recurso agua, o por el contrario, generarse eventos de gran magnitud que ponen en situación de riesgo a una población.

Bacchi (1996) al hablar de la importancia de la instalación de una red de estaciones meteorológicas, considera que la variabilidad espacio-temporal de la lluvia constituye un elemento de interés económico tal, que justifica el empleo de recursos y esfuerzos cognitivos para alcanzar una descripción y pronóstico confiables del campo de precipitación, lo cual fortalece el conocimiento y los procesos de desarrollo sobre una región.

1.3. Variables Climáticas

1.3.1. Temperatura

Es el elemento más importante del clima, en la naturaleza todo aparece gobernado por lo térmico. Consecuentemente la temperatura es la causa de la circulación atmosférica y por tanto el verdadero motor del sistema climático. Al mismo tiempo una fuerza motriz, la temperatura es el elemento más sensible del clima. Fundamento básico del mundo vegetal a través de la energía fotosintética, puede afirmarse que constituye la fuente de toda la vida sobre la superficie del globo. Por ello la distribución de las formaciones vegetales del globo coincide con la de las temperaturas (Quereda, 2005).

1.3.2. Precipitación

Las precipitaciones son la fuente de agua, procedente de las nubes, que llega a la superficie terrestre, tanto en forma líquida como sólida. La cantidad de precipitación puede ser caracterizada según su distribución, diferencias climáticas y regímenes pluviométricos (Fernández, 1995). Según McNeill y Townley (1986), la precipitación es la liberación de agua de la atmósfera para llegar a la superficie de la tierra. El término "precipitación" abarca todas las formas de agua que libera la atmósfera, incluida la nieve, el granizo, y la lluvia. Es la mejor entrada de agua a la zona de captación de un río y, como tal, evaluación en cualquier estudio hidrológico.

2. El espectro electromagnético solar

A partir de los procesos y reacciones nucleares que ocurren en el sol, se generan radiaciones de energía electromagnética en un amplio espectro de frecuencias y longitudes de onda, al aproximarse a la Tierra esta interacciona con distintos fenómenos físicos; dentro de la atmósfera, la agrupación de los elementos presentes en medios y sistemas propios del planeta, al paso de la energía dan como resultado que solo una parte de la radiación alcance la superficie terrestre, la energía puede entonces: ser reflejada, transmitida o dispersada, mientras que otra parte es capturada debido a la interacción con el campo magnético terrestre.

La radiación electromagnética consiste de dos campos físicos; el campo eléctrico (E), que varía su magnitud en dirección perpendicular a su dirección de propagación, y en un campo magnético (H) perpendicular al campo eléctrico (Campbell, 2011).

Las propiedades físicas de la energía electromagnética se caracterizan por tener longitud de onda, frecuencia, amplitud y fase, su velocidad (c) es constante e igual a $299\,792\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ y se relaciona a la frecuencia (ν) a una la longitud de onda (λ).

Existe, además, una relación entre estas características de la energía radiante y la temperatura de un objeto; es decir, todo objeto cuya temperatura sea mayor que el cero absoluto se encontrará emitiendo energía. La cantidad de energía emitida a determinada longitud de onda dependerán de su temperatura; al aumentar esta propiedad, la cantidad total de energía emitida aumenta, y la longitud de onda de la máxima emisión tiende a acortarse (Campbell, 2011).

La forma en la que se relacionan entre el flujo de energía radiante y la temperatura, se establece en la Ley de Stefan-Boltzmann. Fue descubierta experimentalmente en 1879 por Josef Stefan, y en 1884 Ludwig Boltzmann la derivó teóricamente (Blevin y Brown, 1971), sentando con ello las bases del modelo que expresa la radiación de energía térmica para un cuerpo oscuro.

Posteriormente en los trabajos de Max Planck de 1884 a 1901, que estuvieron basados hasta ese momento en el aún teorema de la radiación de Kirchhoff 1859-1860, dieron origen a la Ley de radiación de Kirchhoff. En dicha ley, el autor establecía una relación entre la intensidad de radiación y la temperatura a cierta longitud de onda para un cuerpo oscuro basándose en la Ley del desplazamiento de Wien (1896). Esta última establece una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la longitud de onda de máxima energía de radiación para un cuerpo oscuro.

En 1901, Planck examinó la Ley de Wien apegándose al concepto de la entropía de un resonador vibrante en un medio diatérmico arbitrario, obteniendo la Ley de distribución de la energía de un cuerpo oscuro a una longitud de onda. Finalmente, la Ley de Planck, puede expresar la irradiancia de una fuente esférica, suponiendo

su radio (RS) igual a 696 392 Km, y una temperatura constante de 5778 K, es decir un símil solar; y cuya distribución sobre la superficie de un cuerpo esférico de radio 6 357 Km (rT), aproximadamente el radio terrestre.

3. Percepción remota

La percepción remota es una técnica ampliamente aceptada para obtener información sobre las propiedades físicas o químicas de ciertas superficies u objetos a distancia mediante la obtención de imágenes capturadas por sensores del espectro electromagnético montados sobre dispositivos móviles sean satélites, sobrevuelos de aviones, drones, etc.

Curran (1985), se refiere a la percepción remota como el uso de sensores de la radiación electromagnética para registrar imágenes del ambiente que puedan ser interpretadas para producir información útil. Por otra parte, conceptualiza un sistema de percepción remota a partir de cuatro componentes: una fuente, la interacción con la superficie terrestre, la interacción con la atmósfera y el sensor; una representación conceptual se muestra en la Figura 1.

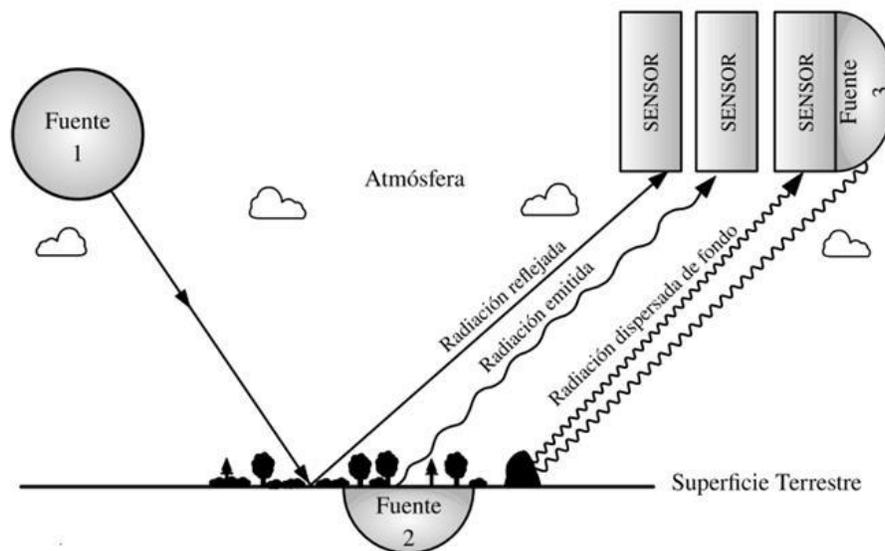


Figura 1. Representación conceptual de un sistema de percepción remota y sus componentes: energía, fuente y sensor, modificada de Curran (1985).

3.1. Sistemas satelitales de adquisición mediante sensores remotos

A lo largo de la historia, han existido gran número de sistemas de observación terrestre (OT). Los satélites, en este caso, orbitando con diferentes tipos de sensores, han ayudado a obtener imágenes del planeta desde la década de 1960.

La clasificación por importancia ambiental de estos sistemas divide en tres categorías (Curran, 1985): la primera, los controlados remotamente, como las series *Mercury*, *Gemini*, *Apollo*, *Shuttle*, entre otros; la segunda, los no controlados como *LANDSAT*, *MODIS*, *SPOT*, *ASTER*, *ERS*, *Quick Bird*, *IKONOS*, *Orb View*, *World view*, *Rapid Eye*, entre otros, utilizados mayormente en el monitoreo de usos de suelo, la agricultura y oceanografía; y la tercera, los meteorológicos como *GOES*, *NIMBUS*, *TIROS* entre otros, en la climatología y pronóstico del tiempo (Guo *et al.*, 2015).

3.2. Respuesta espectral de la vegetación

Diferentes factores ambientales pueden ser caracterizados mediante el análisis de la información de sensores remotos. Estos fenómenos de origen diverso y ocurrencia en la superficie terrestre, son objeto de análisis espacial y temporal. Como ejemplo, la Figura 2 muestra a estos por categorías generales y nivel geográfico (Lein, 2012), entendiendo que deben ser abordados mediante distintas técnicas de percepción remota.

La actividad agrícola está sujeta a regulaciones y a la planeación en políticas de carácter socio-demográfico como el uso de suelos. Además, es uno de los factores que modifican las condiciones físicas de los suelos constantemente, por lo que es monitoreada en búsqueda de cambios, y analizada a diferentes niveles, como: características fisiológicas de los cultivos, relación entre plantas y suelos, procesos fisicoquímicos, biogeoquímicos, e importancia económica, entre otros (Figura 2).

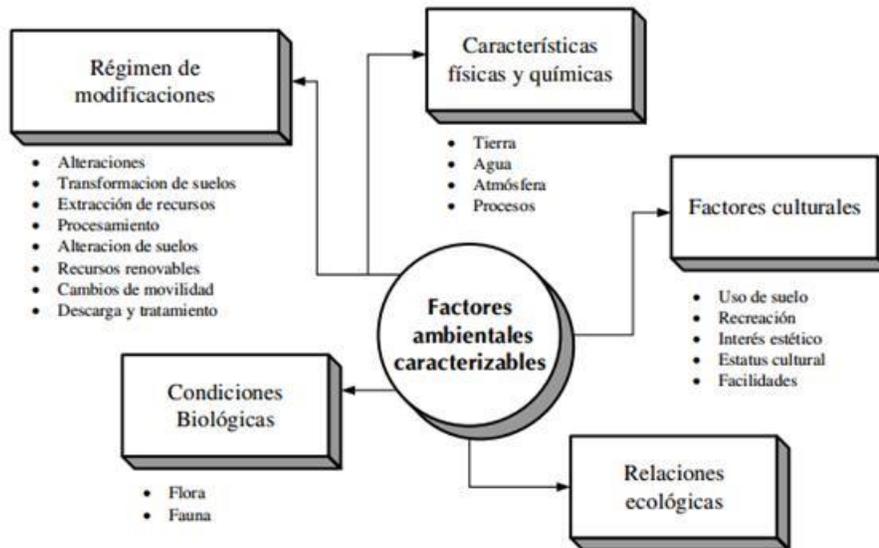


Figura 2. Factores ambientales caracterizables mediante sensores remotos, modificada de (Lein, 2012).

El aprovechamiento eficiente del agua en la agricultura, implica dotar de volúmenes precisos del recurso durante el crecimiento de los cultivos y satisfacer sus procesos fisiológicos; cuando es absorbida por las raíces de cada organismo, y conducida a las hojas, diversos procesos como la nutrición o la turgencia celular se llevan a cabo.

Como resultado, las propiedades reflexivas de la energía solar en la superficie vegetal se ven afectadas por el contenido de agua, por ende, el grado en el que la energía solar es absorbida en la vegetación estará en función de la cantidad total presente en la hoja y su espesor (Jensen, 2005).

Determinar cuantitativamente las propiedades reflectivas de un cultivo depende de la cobertura de dosel, número de plantas y características del suelo, entre otros parámetros. Así, la medición de la reflectancia en estas superficies mostrará entonces un efecto combinado de diversas características locales (Hou *et al.*, 2016).

Como se aprecia en Figura 3, el comportamiento espectral de distintas superficies como la vegetación verde o saludable, vegetación seca, el suelo desnudo y otras

superficies, son distintas y presentan variaciones en su reflectancia para distintas zonas del espectro.

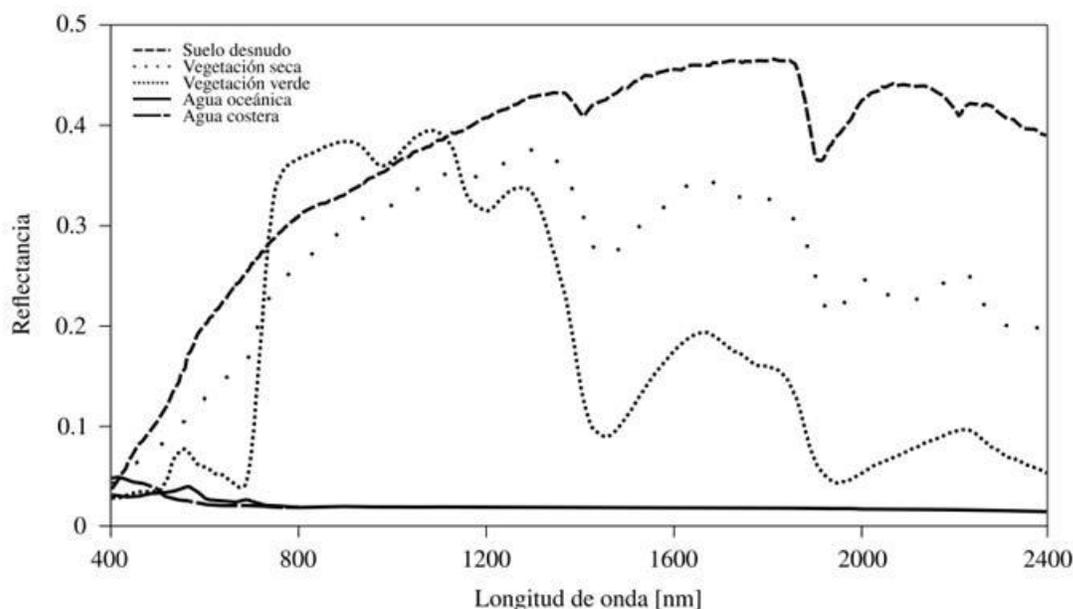


Figura 3. Reflectancia espectral de distintos materiales (modificada de Hou *et al.*, 2016).

El comportamiento espectral de la vegetación muestra un pico de intensidad en la banda verde; sin embargo, éste es mayor en el rango de los infrarrojos. Por ejemplo, al distinguir entre la vegetación verde, que se supondría de buena salud de otra seca, se observan diferencias entre las distintas bandas infrarrojas; la interpretación de este fenómeno funciona como indicador de la condición de una planta o en su caso, de cultivos.

Desde la década de los 60's se han modelado distintas variables biofísicas de la vegetación usando los datos radiométricos de sensores satelitales. Involucrando el uso de los llamados índices de vegetación, números adimensionales generados por la combinación algebraica de bandas espectrales específicas, se han establecido relaciones interpretativas que definen el estado de la vegetación. Esta condición estará definida para cada sitio geográfico caracterizado por el valor de un píxel dentro de una imagen adquirida, indicando con ello la abundancia, ausencia o actividad de la vegetación en el sitio.

3.3. Ventajas y desventajas del uso de teledetección para la planificación de regadíos

Dada la importancia de la estimación de la evapotranspiración para el manejo de los recursos hídricos y debido a la complejidad de la obtención mediante los métodos directos ya que requiere equipos costosos, se han desarrollado métodos empíricos para estimar la demanda de evapotranspiración. Para ello se requiere el conocimiento de la ETo y hacer un seguimiento de los estados fenológicos del cultivo de las que depende el Kc , que influye de manera directa sobre la ETc .

Por lo que se propone como uso alternativo la teledetección, con el fin de complementar los modelos basados en datos meteorológicos. Según Chuvieco, (1998) uno de los aspectos más destacados de la teledetección es su capacidad para seguir procesos dinámicos, lo que facilita la evolución fenológica de una determinada cubierta vegetal, y como se mencionó anteriormente dado que el Kc varía a lo largo del ciclo del crecimiento y depende del desarrollo de la cobertura vegetal; el uso de series temporales de imágenes satelitales posibilita conocer la evolución del Kc a lo largo del ciclo de crecimiento.

Además, a partir de las imágenes se tienen una resolución espacial más grande lo que posibilita determinar las variaciones de la cubierta de una zona a otra, permitiendo así calcular las necesidades del riego espacialmente distribuidas de acuerdo con las demandas de la cubierta y a un bajo coste. La desventaja que proviene del uso de la teledetección para la planificación de regadíos es que son estimaciones a partir de modelaciones estadísticas que buscan relacionar la variación del coeficiente del cultivo con respecto a las variaciones de la cobertura vegetal, lo que puede provocar errores de estimación sobre una variable.

Además, que al momento de determinar las necesidades de riego su análisis no toma a consideración las variaciones del contenido de agua que podría tener el suelo; y que es intrínsecamente difícil de conocer incluso con medidas in situ. Otra desventaja de manera general de uso o aplicación de la teledetección es que las bondades que brinda son muy poco conocidas por la mayoría de los agricultores o instituciones relacionadas con el sector agrícola.

4. Requerimientos hídricos de cultivo bajo riego

El requerimiento de riego se define como la profundidad (o cantidad) de agua necesaria para satisfacer la pérdida de agua por evapotranspiración; en otras palabras, es la cantidad de agua necesaria para que los diversos cultivos crezcan óptimamente (FAO, 2016). Debe apreciarse desde dos puntos de vista, el crecimiento de los cultivos y sostenibilidad del recurso.

El agua dulce del mundo constituye un recurso escaso, amenazado y en peligro. De acuerdo con los estudios sobre los balances hídricos del planeta solamente el 0,007% se encuentra realmente disponible a todos los usos humanos directamente (Toledo, 2002). A nivel mundial, las proporciones usadas (fracción de agua como recurso renovable extraída mediante infraestructura instalada por el hombre) son para el sector agropecuario, el municipal (doméstico) y el industrial.

La agricultura es, a su vez, responsable de más del 90 % del uso consuntivo del agua (FAO, 2013). La población mundial aumentó 4,4 veces en el último siglo mientras que la extracción de agua lo hizo 7,3 veces en el mismo periodo. Por lo tanto, la extracción de agua total aumentó un 66% por encima de la población mundial. Sin embargo, mientras la población mundial sigue creciendo exponencialmente, el aumento de la extracción de agua se ha frenado en las últimas décadas (FAO, 2016).

Esto se evidencia debido a que el mayor aumento en la extracción de agua tuvo lugar entre 1950 y 1960, período que corresponde con la implantación del modelo de desarrollo industrial, impulsado después de la segunda guerra mundial. El agua siempre ha sido el principal factor que limita la producción agrícola en gran parte del mundo, esencialmente donde la precipitación no es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos.

La agricultura de regadío representa el 20 % de la superficie total de la tierra cultivada, y contribuye con el 40 % de los alimentos producidos en todo el mundo (FAO, 2016). Con la competencia cada vez mayor por recursos hídricos no renovables en todo el mundo y la creciente demanda de productos agrícolas, nunca ha sido tan apremiante la necesidad de mejorar la eficiencia y productividad

del agua por parte de los cultivos -producción del cultivo por unidad de agua consumida (Perry *et al.*, 2009), a fin de garantizar la seguridad alimentaria en el futuro y enfrentar las incertidumbres asociadas con el cambio climático (FAO, 2012).

Una de las maneras de afrontar la escasez de agua es aumentar la eficiencia del uso de agua, optimizando el riego, produciendo más por cada m³ de agua extraída. Para lograr esto es necesario, entre otras cosas, hacer una buena programación del riego, que requiere de buenas decisiones orientadas a determinar las cantidades de agua y las fechas de aplicación de cada riego con la intención de minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo que pudieran causar efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos, permitiendo a su vez, ahorrar agua.

Para conservar agua, la comunidad agrícola debe utilizar algún tipo de programa de riego (Sammis *et al.*, 2012). La programación del riego se basa en un balance hídrico que toma en cuenta al suelo, la planta y las condiciones meteorológicas. Los cultivos requieren diferentes cantidades de agua según su estado de desarrollo; el suelo, que es el que almacena el agua, varía su capacidad de almacenaje principalmente debido a su textura; y las condiciones meteorológicas determinan la demanda de agua.

Las necesidades de agua de los cultivos están representadas por la evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar (*ETc*), que presupone buenas condiciones de manejo e ilimitada disponibilidad de agua. Cuando no se cuenta con mediciones de *ETc*, lo que se realiza en mayor medida es una estimación de ella a partir del producto de ET_0 por *Kc* ajustado a la etapa fenológica en la que se encuentra el mismo.

4.1. Evapotranspiración de cultivo

El concepto de evapotranspiración (*ET*) surge de la combinación de dos procesos: a) evaporación de agua desde el suelo, los cuerpos de agua y eventualmente el agua interceptada por o depositada sobre los vegetales; y b) transpiración de las

plantas. En superficies con cobertura vegetal ambos ocurren en forma simultánea y representan la transferencia de vapor de agua hacia la atmósfera.

La evaporación del agua es fundamentalmente el pasaje de fase líquida a gaseosa, impulsada por el agua líquida existente; la energía disponible para satisfacer el requisito de calor latente para el cambio de estado (aproximadamente $2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ para evaporar el agua a 15 °C); y el gradiente de la presión de vapor del agua entre la superficie evaporante y la atmósfera (Kool *et al.*, 2014).

La transpiración es el proceso de movimiento del agua desde el suelo, a través de las raíces, tallo y hojas de una planta hacia la atmósfera (Jonesa y Tardieub, 1998). Las plantas diferirán en la capacidad de transpiración dependiendo de su resistencia hidráulica, del potencial agua del sistema raíz-tallo-hojas-atmósfera y de la conductancia estomática.

Tanto evaporación y transpiración son moduladas por la demanda atmosférica, así como por el potencial agua del suelo y la conductividad hidráulica, pero a diferencia de la evaporación, las plantas regulan la transpiración al abrir y cerrar los estomas (Jonesa y Tardieub, 1998). A medida que las plantas cubren el suelo, el proceso de transpiración va adquiriendo cada vez más importancia sobre el de evaporación.

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados por los cuales se pierde agua en el suelo y en las plantas o cultivos debido a la transpiración (Allen *et al.*, 2006).

La forma canónica de calcular la evapotranspiración, utiliza la ecuación de balance hídrico aplicada a cultivos, consiste en evaluar para la ecuación de balance hídrico los flujos de agua entrantes y salientes de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (Allen *et al.*, 2006). Una representación esquemática de este fenómeno se muestra en la Figura 4.

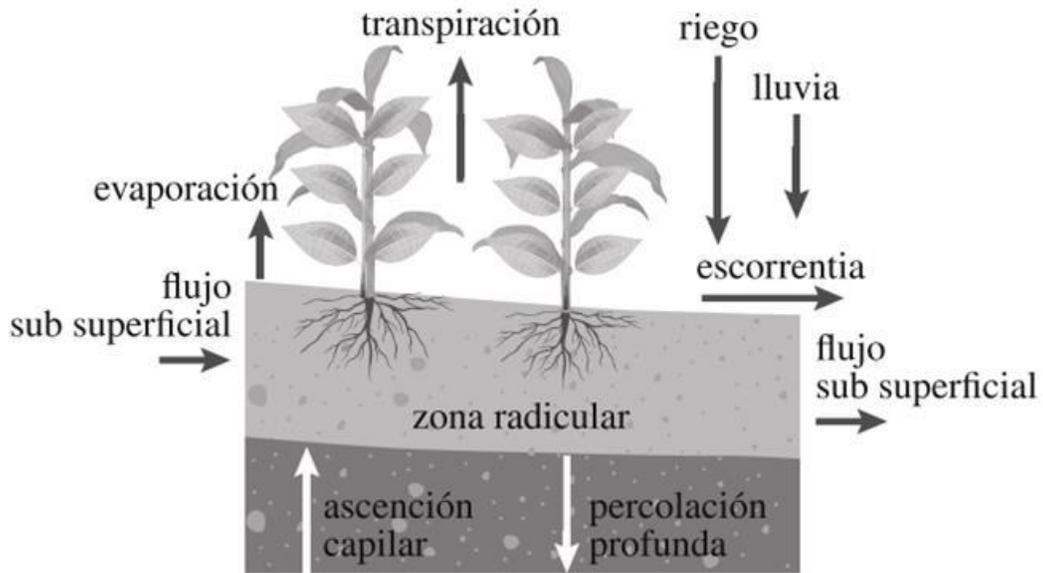


Figura 4. Fenómenos que intervienen en el balance hídrico, modificada de (Allen *et al.*, 2006).

Allen *et al.* (2006), proponen una forma de estimar la *ETC* durante los distintos períodos de desarrollo del cultivo; mediante la relación guardada por la evapotranspiración de una superficie de referencia bajo condiciones estándar el coeficiente de cultivo K_c . Dicha relación se expresa mediante la Figura 5, muestra su modelo conceptual simplificado.

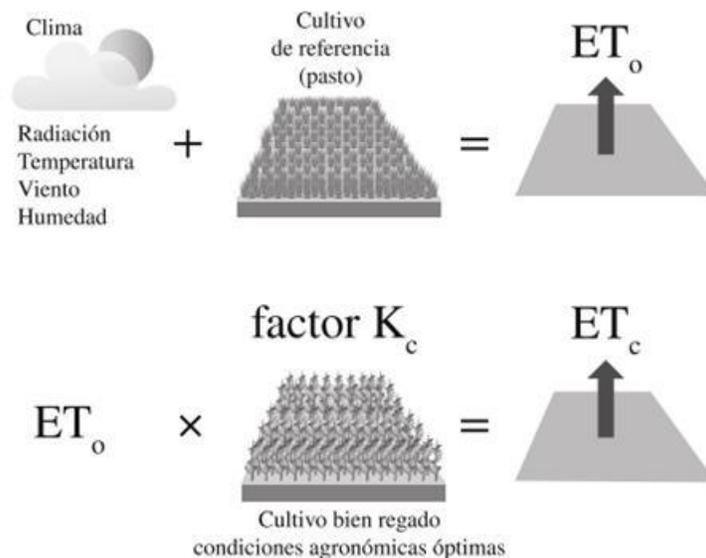


Figura 5. Modelo conceptual de la relación ET_c , ET_0 y K_c , modificada de (Allen et al., 2006).

Se han desarrollado modelos matemáticos para estimar la ET_0 , algunos de los cuales se muestran en la Tabla 1. Estos modelos son empleados según la disponibilidad de datos climáticos, utilizan variables como la radiación solar (R_S), radiación neta (R_n), el flujo de calor del suelo (G), la temperatura máxima ($T_{máx}$), mínima ($T_{mín}$), media (T_{med}) o diferencia (δT) la pendiente de la curva de presión de vapor (Δ), la constante psicrométrica (γ) así como diversos coeficientes experimentales (a, T_1).

Tabla 1. Métodos de estimación de la ET_0 .

Método	Modelo matemático	Autor
Hansen	$ET_0 = 0.408 \cdot 0.7 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_S$	Hansen (1984)
Hargreaves	$ET_0 = 0.0023 \cdot R_S \cdot (T_{med} + 17.8) \cdot \delta T^{0.5}$	Hargreaves y Samani (1985)
Jones-Ritchie	$ET_0 = 0.00387 \cdot (0.6 \cdot T_{max} + 0.4 \cdot T_{min} + 29) R_S \cdot a$	Jones y Ritchie (1990)
Priestley - Taylor	$ET_0 = 0.408 \cdot 0.7 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G)$	Priestley y Taylor (1972)
Turc	$ET_0 = (0.3107 \cdot R_S + 0.65) \left(\frac{T_1}{T_{med} + 15} \right)$	Turc (1962)

4.2. Factores que afectan la determinación de la evapotranspiración

- Variables climáticas

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. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar.

- Factores del cultivo

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radicales del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas.

- **Manejo y condiciones ambientales**

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la evapotranspiración son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo.

5. Metodologías determinación de la evapotranspiración basadas en la temperatura. Ecuación de Hargreaves

Son varias las razones que justifican el estudio y desarrollo de métodos de estimación de ET_0 basados en temperatura. En primer lugar, la temperatura y la radiación solar explican por lo menos el 80% de su variabilidad (Priestley y Taylor, 1972; Samani, 2000). En segundo lugar, varios estudios indican que el rango de temperatura está relacionado con la humedad relativa y el grado de nubosidad (Samani y Pessarakli, 1986; Di Stefano y Ferro, 1997).

En tercer lugar, la advección depende de la interacción entre la temperatura del aire, humedad relativa, presión de vapor y la velocidad del viento; y estas variables pueden estar relacionadas con el rango de temperatura (Vanderlinden *et al.*, 2004). Finalmente, la temperatura del aire es la variable con mayor disponibilidad entre las necesarias para el cálculo de ET_0 .

La FAO recomienda alternativamente el método de HG cuando no se cuenta con datos confiables y cercanos de radiación, además de no disponer de valores de humedad relativa o velocidad del viento (Allen *et al.*, 1998).

Hargreaves (1975) analizó ocho años de datos de evapotranspiración diaria de césped medidos con un lisímetro de precisión e información meteorológica en la localidad de Davis, California. Observó a partir de regresiones por períodos de cinco días, que el 94% de la varianza en mediciones de ET_0 puede ser explicada por la temperatura media del aire (T_{med}) y la radiación solar que llega a superficie (RS) en ese periodo. Como resultado, en 1975 publica la siguiente ecuación para estimar ET_0 basada sólo en esos dos parámetros (Hargreaves, 1975):

$$ET_0 = 0.0135 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} R_s (T_{med} + 17,8 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (1)$$

Donde el dato de RS debe ingresar a la ecuación en unidades equivalentes a evaporación de agua (mm. día^{-1}) y la T_{med} deberá estar expresada en $^\circ\text{C}$.

La fracción de la radiación extraterrestre que se transmite a través de la atmósfera (aun cuando hay nubes presentes) y alcanza la superficie de la tierra es la principal fuente de energía para la evapotranspiración. Hargreaves y Samani (1982) mostraron que esta puede ser estimada a partir del rango térmico (diferencia entre la temperatura del aire máxima y mínima diaria) y recomiendan la siguiente ecuación para estimarla:

$$\frac{R_s}{R_a} = Kt (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} \quad (2)$$

R_a es la radiación extraterrestre en el tope de la atmósfera en mm. día^{-1} . El coeficiente empírico Kt fue inicialmente fijado en $0,17^\circ\text{C}^{-0,5}$ para la ciudad de Salt Lake, Utah, Estados Unidos ($40^\circ45'00''$ N $111^\circ53'00''$ O) y otras regiones semiáridas. En base a las expresiones 1 y 2, Hargreaves y Samani (1985) desarrollaron una ecuación simplificada requiriendo únicamente datos de temperatura media, máxima y mínima diaria, día del año y latitud para calcular ET_0 :

$$ET_0 = 0.0023 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1.5} Ra (T_{med} + 17,78 \text{ } ^\circ\text{C})(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0.5} \text{ (3)}$$

El valor de $0,0023^\circ\text{C}^{-1.5}$ de la Ec. 3, denominado de aquí en adelante coeficiente de Hargreaves, deriva de multiplicar el coeficiente $0,0135^\circ\text{C}^{-1}$ de la Ec. 1 por el valor sugerido de $K_f (0,17^\circ\text{C}^{-0.5})$.

Hargreaves y Allen (2003) sugirieron que las estimaciones más precisas se obtendrían a partir de periodos de cinco días o superiores, debido a que las estimaciones diarias están sujetas a una mayor variabilidad, causada por el movimiento de frentes, la fluctuación de la velocidad del viento y la nubosidad. Igualmente, se han constatado aplicaciones de ET_0 HG a escala diaria con bajos errores (Di Stefano y Ferro, 1997) y, dado que numerosas aplicaciones agrícolas e hidrológicas requieren datos diarios de ET_0 , la metodología presenta un gran potencial de uso en regiones con déficit de información meteorológica.

La ecuación de Hargreaves (HG) ha recibido considerable atención debido a que ha producido resultados favorables en diversos climas utilizando sólo mediciones de temperatura (Allen *et al.*, 1998). Jensen *et al.* (1997) la recomiendan como una de las más simples y exactas entre las ecuaciones empíricas para estimar ET_0 . Itenfisu *et al.* (2003) utilizaron datos de 49 estaciones de Estados Unidos y encontraron que el cociente entre valores diarios de ET_0 HG/ ET_0 PM alcanza valores entre 1,43 a 0,79 con valores medios de 1,06 y desvío estándar de 0,13. La ecuación de HG tiende a sobreestimar ET_0 frente a ET_0 PM, pero cuando hay procesos de advección intensa de calor sensible sobre la superficie, esta ecuación tiende a producir subestimaciones de ET_0 que rondan el 25 % en la escala diaria (Berengena y Gavilán, 2005).

Maestre *et al.* (2013) propusieron una metodología de calibración del coeficiente de HG que puede extenderse a otras regiones y climas. A su vez, desarrollaron una versión calibrada a nivel regional de la ecuación de HG para el cálculo de series largas de ET_0 mensuales para el sudeste de España cuando no se dispone

de datos diarios completos de temperatura, humedad del aire, radiación y velocidad del viento.

Varios trabajos han encontrado relaciones del coeficiente de HG con variables de fácil disponibilidad que permiten, agregando dicha información, mejorar el ajuste y regionalizar la variabilidad espacial (Martí *et al.*, 2016).

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del agroecosistema Mayarí

El agroecosistema Mayarí ubicado en la provincia de Holguín, posee una superficie de 1304,2 km². El relieve fundamental es la altiplanicie de Nipe, donde se encuentra la meseta de Pinares de Mayarí, y en ella aparece la mayor altura del municipio, la Loma La Mensura con 995 m.

El territorio tiene varios lugares geográficos notables como son la bahía de Nipe, la mayor bahía de bolsa del país, con 21,7 km de largo, 14,2 de ancho y una profundidad máxima de 71,3 m en su canal de entrada. Entre los principales ríos se encuentran el Mayarí con 110 km de longitud, el Nipe, Guaro y Juan Vicente, entre otros. Esta zona presenta una red fluvial desarrollada, con un alto por ciento del potencial hidráulico de la provincia y abundante lluvia (ONEI, 2019). El clima del municipio de Mayarí es del tipo hiperárido y húmedo, presenta en los últimos 41 años valores medios de temperatura de 24,87 °C y de precipitación con 86,56 mm.

Según Corella *et al.* (2002), los Vertisoles de la provincia Holguín se caracterizan por ser sialíticos con relaciones moleculares SiO₂ / Al₂O₃ del orden de 4 y con predominio del Mg sobre el Ca, tanto en la masa de suelo como en la fracción arcillosa. Los suelos están saturados en bases y el pH tiende a ser generalmente neutro ó alcalino. Entre los cationes cambiables, en ocasiones, el magnesio iguala o supera al calcio, sobre todo en los horizontes inferiores de los suelos que toleraron con mayor intensidad el proceso de gleyzación.

Durante el proceso de formación, la materia orgánica se acumula (aunque en cantidades no muy altas), pero penetra por las grietas generalmente a bastante profundidad. Esta materia orgánica se une muy estrechamente con la arcilla (complejo arcillo-húmico), dando una tonalidad entre gris oscura y negra a todo el perfil en los casos más representativos de este fenómeno, aunque en ocasiones puede ser pardo oscura. La relación H/F es mayor que 2, y puede llegar hasta 4 en el horizonte con propiedades vérticas más desarrolladas, el porcentaje de

huminas es de 35-40% y la relación C/N es de 13-20 (Corella *et al.*, 2002) (Figura 6).

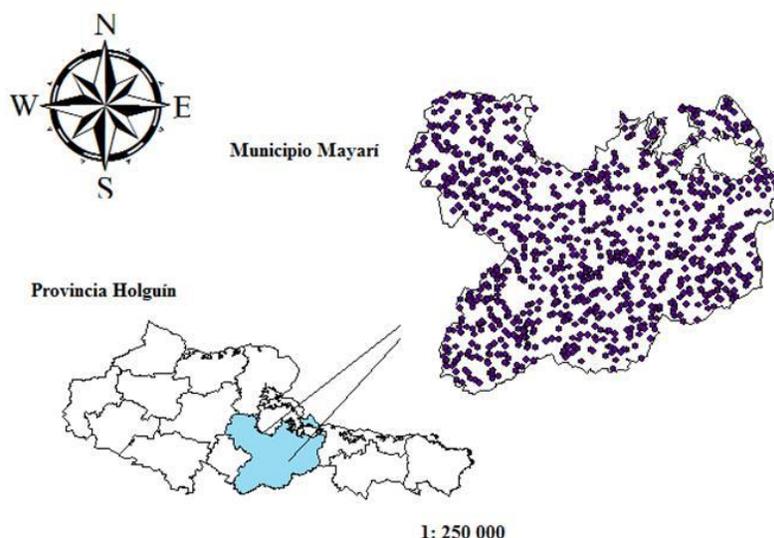


Figura 6. Ubicación geográfica y puntos de muestreo aleatorizado utilizados para el estudio de la evapotranspiración en el agroecosistema Mayarí, Holguín, Cuba.

Herramientas utilizadas en el estudio

Se utilizó el software QGIS 3.10 “A Coruña” para la proyección de puntos aleatorios en una capa proyectada en el sistema WGS84 /UTM zona 18 N.

Se utilizó para la obtención de las variables climáticas temperatura media mensual y radiación solar el WorldClim 2. Esta es una base datos de alta resolución espacial de datos meteorológicos y climáticos, a nivel global y la versión más actualizada es del 13 de marzo de 2020. Las bases de datos que brinda el programa pueden ser descargadas en formato “zip” el cual contiene 12 imágenes “GeoTiff”, una para cada mes del año.

Es un sitio que reúne datos climáticos a nivel mundial con diferentes resoluciones espaciales, de 30 segundos (1 km²), a 10 minutos (340 km²) aproximadamente en la línea del Ecuador. Estos datos se encuentran en el sistema de coordenadas

WGS 1984 EPSG: 4326 y pueden ser utilizados para crear mapas y modelado espacial con sistemas de información Geográfica (SIG) (Ficka y Hijmans, 2017).

En el software ArcGIS 3.5 se realizó el cálculo de la evapotranspiración por el método de Hargreaves (1975) el cual se explica en las siguientes expresiones:

$$ET_0 = 0.004 * Tm (^{\circ}F) * Rs \quad (4)$$

Dónde: ET0 es la evapotranspiración potencial mensual (mm. mes⁻¹), Tm es la temperatura media mensual expresada en grados Farengay (°F) y Rs la radiación solar media mensual (cal. cm⁻². día⁻¹).

Se procedió a transformar los valores de temperatura de °F a °C mediante la siguiente expresión:

$$^{\circ}F = \frac{9}{5} * ^{\circ}C + 32 \quad (5)$$

Al realizar las conversiones necesarias para el cálculo de la evapotranspiración mensual por el método de Hargreaves en el Raster Calculator del ArcGIS se utilizó el siguiente lenguaje estructurado:

$$Evt1=0.004*(1.8*t01"+32)*(0.02388*rad01")$$

$$Evt2=0.004*(1.8*t02"+32)*(0.02388*rad02")$$

$$Evt3=0.004*(1.8*t03"+32)*(0.02388*rad03")$$

$$Evt4=0.004*(1.8*t04"+32)*(0.02388*rad04")$$

$$Evt5=0.004*(1.8*t05"+32)*(0.02388*rad05")$$

$$Evt6=0.004*(1.8*t06"+32)*(0.02388*rad06")$$

$$Evt7=0.004*(1.8*t07"+32)*(0.02388*rad07")$$

$$Evt8=0.004*(1.8*t08"+32)*(0.02388*rad08")$$

$$Evt9=0.004*(1.8*t09"+32)*(0.02388*rad09")$$

$$Evt10=0.004*(1.8*t10"+32)*(0.02388*rad10")$$

$$Evt11=0.004*(1.8*t11"+32)*(0.02388*rad11")$$

$$Evt12=0.004*(1.8*t12"+32)*(0.02388*rad12")$$

Dónde “*t01* hasta *t12*” corresponden a los raster de temperatura media recortados de la capa del agroecosistema Mayarí y “*rad 01* a *rad12*”, son los raster mensuales de cada variable climática utilizada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se muestran los resultados del análisis descriptivo de la evapotranspiración mensual obtenida por el método Hargreaves en WorldClim 2, donde se observa que los valores medios más bajos se corresponden a los meses de enero (99,72 mm) y diciembre (96,64).

Existe una mayor dispersión de los datos expresada por el coeficiente de variación para el mes de diciembre (33,75 %) y menor para el mes de julio (19,14 %). Se encuentra que los valores que toma la evapotranspiración son en general asimétrico negativos a la izquierda de la curva mientras que la curtosis no se ajustan a una distribución normal.

Tabla 1. Estadística descriptiva de la evapotranspiración mensual obtenida por el método Hargreaves en WorldClim 2.

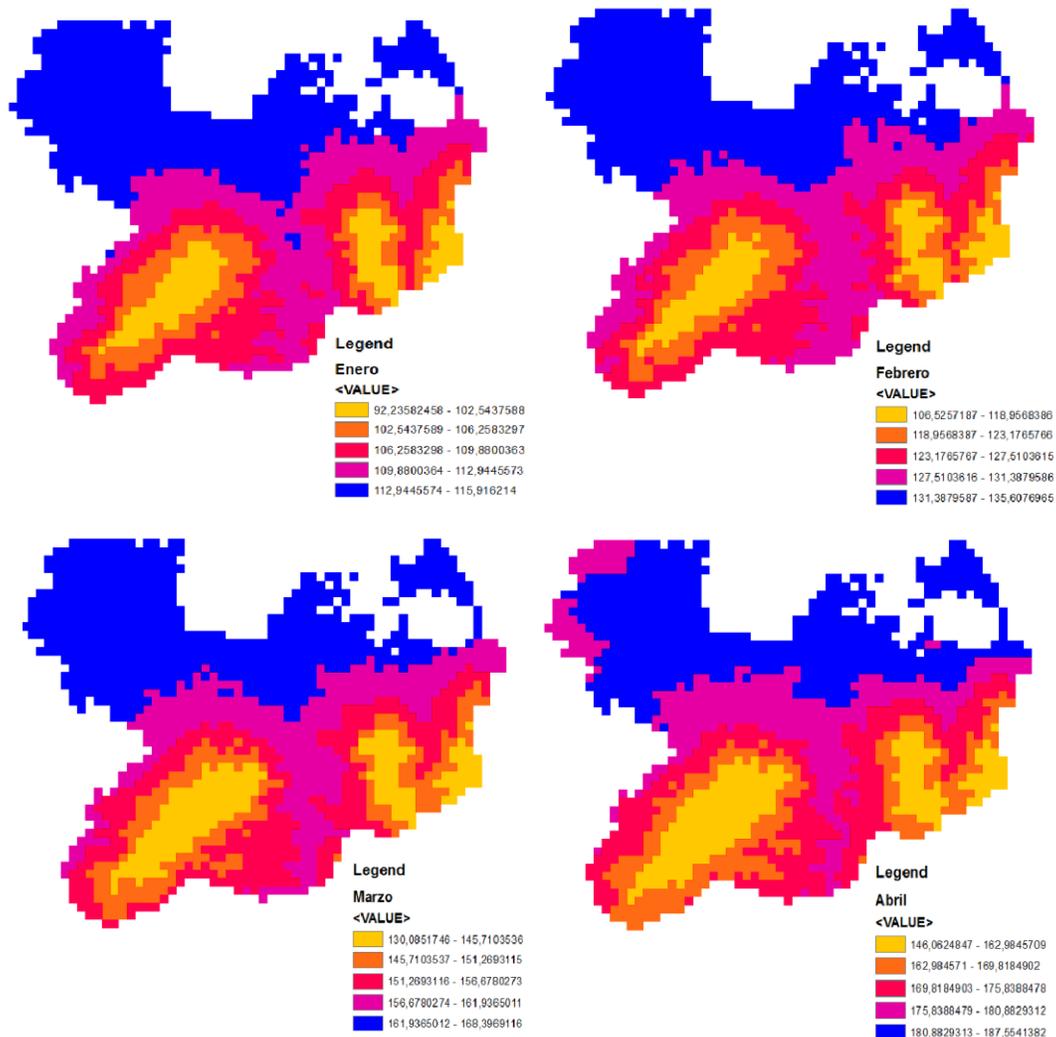
Meses del año	Estadísticos descriptivos					
	Media	D.E.	E.E.	C.V	Asimetría	Curtosis
Enero	99,72	323,62	10,36	32,54	-31,23	0,9751
Febrero	117,56	324,20	10,38	27,77	-31,23	0,9753
Marzo	146,42	325,17	10,41	22,09	-31,22	0,9742
Abril	164,26	325,76	10,43	19,32	-31,21	0,9767
Mayo	157,06	325,52	10,42	20,25	-31,21	0,9786
Junio	160,26	325,61	10,42	20,17	-31,22	0,9797
Julio	170,52	325,94	10,43	19,14	-31,21	0,9749
Agosto	159,67	325,58	10,42	20,91	-31,22	0,9750
Septiembre	142,90	325,04	10,40	22,46	-31,22	0,9752
Octubre	124,96	324,45	10,39	25,65	-31,22	0,9729
Noviembre	109,35	323,94	10,37	29,23	-31,23	0,9751
Diciembre	96,64	323,52	10,36	33,75	-31,23	0,9756

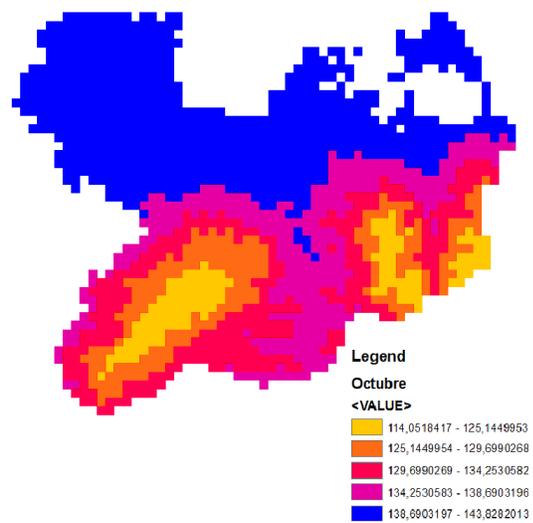
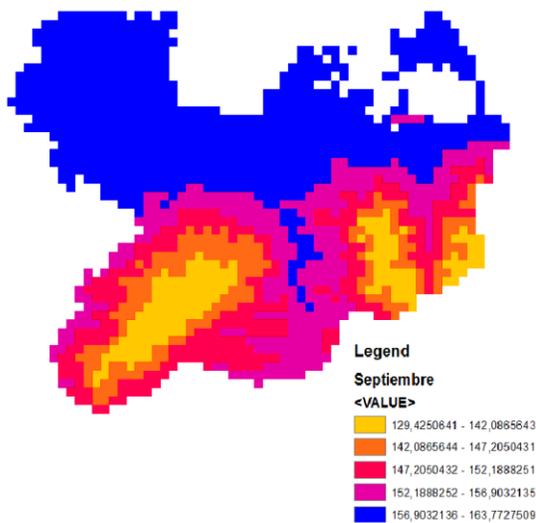
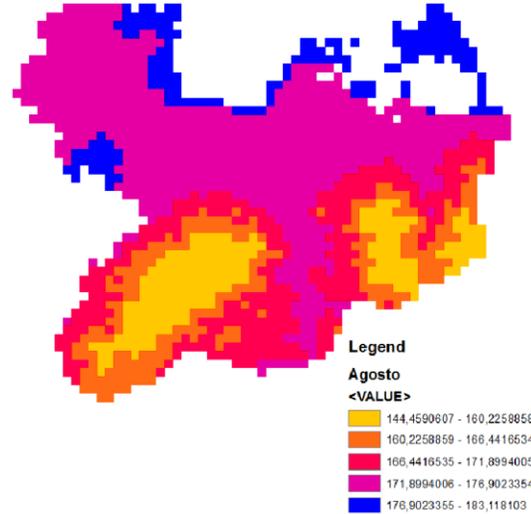
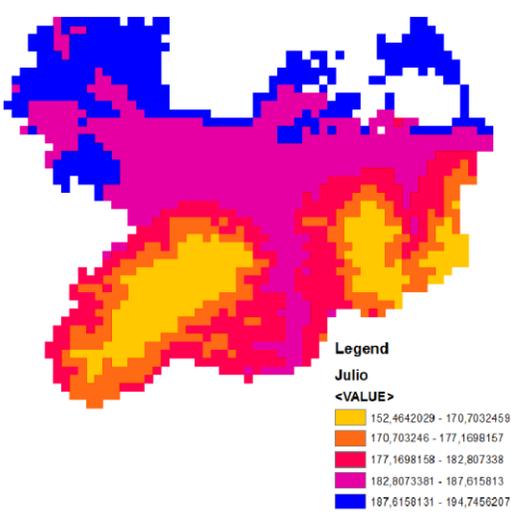
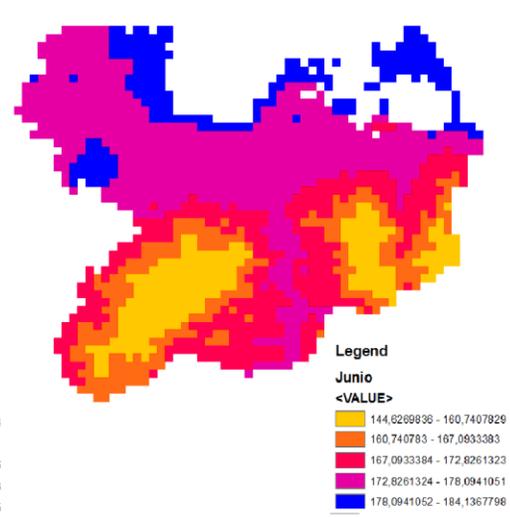
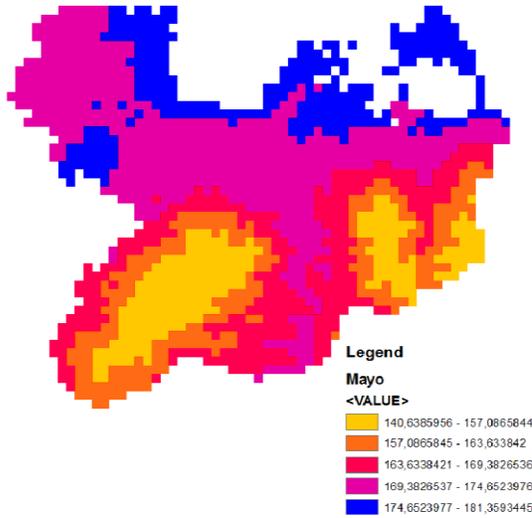
La figura 7 muestra la evapotranspiración mensual determinada en WorldClim 2 del agroecosistema Mayarí a partir del método Hargreaves. Los mapas temáticos al respecto, brindan información acerca de cómo varía de forma espacial la

evapotranspiración en dicho agroecosistema y en todos los casos muestra la presencia de tres zonas homogéneas.

El cambio climático en las últimas décadas ha tenido un impacto generalizado en los sistemas naturales y humanos, observable en todos los continentes. Los modelos ecológicos y ambientales que utilizan datos climáticos a menudo se basan en datos cuadrículados, como WorldClim (Poggio *et al.*, 2018).

También refiere que para diseñar y evaluar un enfoque computacionalmente eficiente para producir nuevas estimaciones de alta resolución (100 m) de las variables climáticas actuales y futuras para ser utilizadas a escala nacional y regional, se deben de utilizar resolución espacial de WorldClim (1 km).





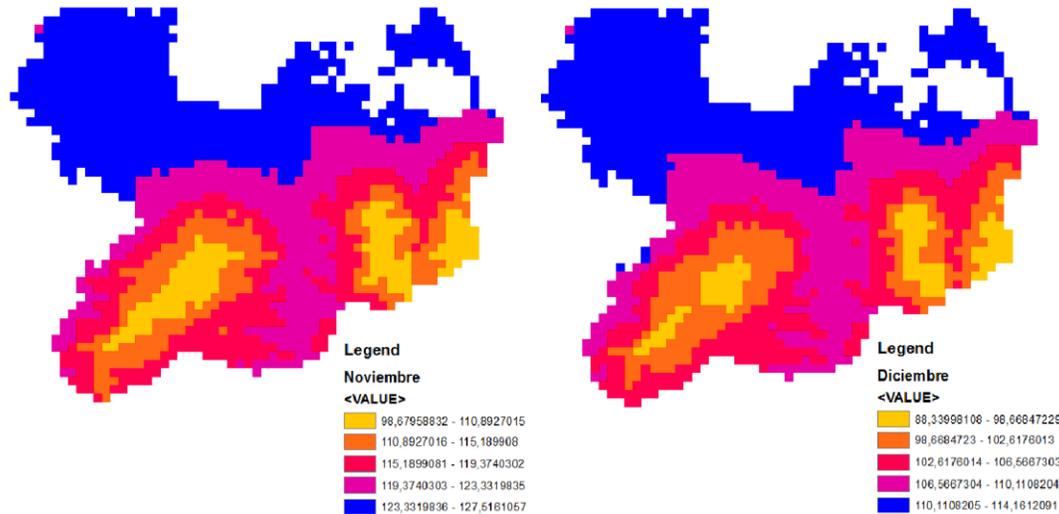


Figura 7. Evapotranspiración del agroecosistema Mayarí obtenida por el método de Hargreaves en WorldClim 2.

Los mapas obtenidos por el WorldClim 2 refieren la intensificación del cambio climático y las actividades humanas, la tendencia al calentamiento y la sequía ha traído graves desafíos a las áreas de pastoreo en las regiones áridas y semiáridas. En consecuencia, es imperativo explorar las características no estacionarias de la sequía en tales regiones a partir de la determinación de la evapotranspiración (Wang *et al.*, 2019).

Právǎlie *et al.* (2019) determinó a partir de WorldClim 2 los cambios en la precipitación (P), la evapotranspiración (ET) e, implícitamente, en el balance hídrico climático (CWB), los efectos inminentes del calentamiento climático. Sin embargo, los cambios en la CWB, como respuesta a los cambios en P y ET, aún no se han analizado lo suficientemente a fondo en muchas partes del mundo, incluida Rumania.

Para analizar climáticamente un área es necesario tener información de estaciones meteorológicas, distribuidas de manera equidistante y con una serie de tiempo superior o igual a 30 años. La escasez de estos datos genera inconvenientes al momento de caracterizar el clima de una región. Por tal motivo, se han desarrollado métodos indirectos de obtención de información, que son herramientas útiles para el estudio de una variable climática. Un factor a

considerar en los estudios climáticos de una región, es la variación espacio-temporal de los elementos climáticos en los trópicos, varían en cortas distancias, de acuerdo con la topografía y con otras condiciones. Los modelos climáticos actuales son no espaciales pues se basan en el concepto de que un valor medido representa un área homogénea alrededor del punto evaluado (Ferrelli *et al.*, 2016).

A través de la validación de herramientas como imágenes satelitales, datos aeronavales, modelos numéricos, entre otros, se ha logrado obtener datos meteorológicos de largas series de tiempo para el estudio del impacto de la aridez, las intensas sequías y las altas temperaturas en la agricultura (Zhang *et al.*, 2020; Tsiros *et al.*, 2020; Ferner y Schmidtlein, 2018).

Para comprender el origen de los procesos de sequía en Cuba, hay que partir del hecho de que el clima, en las últimas décadas, ha experimentado notables alteraciones, como consecuencia de un elevado nivel de respuesta de la circulación atmosférica regional a los principales cambios del sistema climático ocurridos a escala global G, de acuerdo con las cuales, generan impactos muy desfavorables en los ámbitos económico, social y el medio ambiente (Ponvert, 2016).

La zonificación agroclimática de un territorio, los factores climáticos, sobre todo la lluvia, la evapotranspiración y la temperatura, tienen un papel vital en la determinación de zonas de idoneidad en condiciones de riego, especialmente para recomendar el suministro de agua en cultivos de regadío, sin la atención o la necesidad de una gran cantidad de precipitación en el período de crecimiento (Vema *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

La evapotranspiración mensual obtenida por el método Hargreaves en WorldClim 2, muestra valores medios más bajos en los meses de enero (99,72 mm) y diciembre (96,64), con una mayor dispersión de los datos expresada por el coeficiente de variación para el mes de diciembre (33,75 %) y menor para el mes de julio (19,14 %).

Los valores que toma la evapotranspiración son en general asimétrico negativos a la izquierda de la curva mientras que la curtosis no se ajustan a una distribución normal.

Los mapas temáticos brindan información acerca de cómo varía de forma espacial la evapotranspiración en dicho agroecosistema y en todos los casos muestra la presencia de tres zonas homogéneas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje.
- Allen, R. G., Pereira, R. S., Raes, D., y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Roma: FAO. ISBN 92-5-104219-5.
- Berengena, J., y Gavilán , P. (2005). Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131 (2), 147–163. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:2(147)
- Blevin, W. R., y Brown, W. J. (1971). A Precise Measurement of the Stefan-Boltzmann Constant. *Metrologia*, 7(1), 15-29.
- Burt, C. M., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., Solomon, K. H., Bliesner, R. D., Hardy, L. A., y Eisenhauer, D. E. (1997). Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6), 423-442. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:6(423)
- Campbell. (2011). Introduction to Remote Sensing. The Guildford Press. DOI: 10.1002/mds.23834.
- Chuvienco, E. (1998). *El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios*. Retrieved from http://telenet.uva.es/promotores/revista/revista_10/AET10_4.pdf
- Corella, T., Andérez, M., Taboada, M. M y Taboada, M. T.(2002). Principales aspectos edafológicos de la provincia de Holguín (Cuba). Uso y manejo de los suelos. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña* 27:103-115.
- Curran, P. J. (1985). Principles of Remote Sensing (1st ed.). Hong Kong: Longman Group Limited.
- Di Stefano, C., y Ferro, V. (1997). Estimation of evapotranspiration by Hargreaves formula and remotely sensed data in semi-arid Mediterranean areas.

Journal of Agricultural Engineering Research, 68(3), 189-199.
doi:10.1006/jaer.1997.0166

FAO 2016. (2018). *AQUASTAT*. Recuperado el 12 de 1 de 2018, de http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/indexesp.stm.

FAO. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Roma: FAO 2013. E-ISBN 978-92-5-308564-4.

FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la Agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma: FAO 2013. E-ISBN 978-92-5-307633-8.

FAO. (2016). *Crop Water Needs*. Recuperado el 1 de enero de 2016, a partir de <http://www.fao.org/docrep/s2022e/s2022e07.htm>.

Ferner Jessica, Schmidlein Sebastian, Guuroh Reginald, Lopatin Javier, Linstädter Anja. Disentangling effects of climate and land-use change on West African drylands forage supply. *Global Environmental Change*. 2018; 53: 24-38. Doi <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.007>.

Ferrelli F, Bustos M.L, Piccolo M.C, Huamantínco M.A, Perillo G.M. Downscaling de variables climáticas a partir del re análisis NCEP/NCAR en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Papeles de Geografía*. 2016; 62.

Ficka Stephen y Hijmans Robert J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land áreas. *International Journal of Climatology*. 2017. Doi: 10.1002/joc.5086.

Guo, H. D., Zhang, L., y Zhu, L. W. (2015). Earth observation big data for climate change research. *Advances in Climate Change Research*, 6(2), 108-117. DOI: 10.1016/j.accre.2015.09.007.

Hansen, S. (1984). Estimation of Potential and Actual Evapotranspiration. *Hydrology Research*, 15(4-5), 205–212. DOI: 10.2166/nh.1984.017.

- Hargreaves, G. H. (1975). Moisture availability and crop production. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 18(5), 980-9984. doi:10.13031/2013.36722
- Hargreaves, G. H., y Allen, R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53-63. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53)
- Hargreaves, G. H., y Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230.
- Hargreaves, G. H., y Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. doi:10.13031/2013.26773
- Hargreaves, G. H., y Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. DOI: 10.13031/2013.26773.
- Hou, W., Wang, J., Xu, X., Reid, J. S., y Han, D. (2016). An algorithm for hyperspectral remote sensing of aerosols: 1. Development of theoretical framework. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 178, 400–415. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.01.019.
- Itenfisu, D., Elliott, R. L., Allen, R. G., y Walter, I. A. (2003). Comparison of reference evapotranspiration calculation as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129 (6), 440–448. doi:10.1061/(ASCE)0733- 9437(2003)129:6(440)
- Jensen, D. T., Hargreaves, G. H., Temesgen, B., y Allen, R. G. (1997). Computation of ETo under nonideal conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(5), 394-400. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:5(394)
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory Digital Image Processing A Remote Sensing Perspective* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ.

- Johnson, L. F., y Trout, T. J. (2012). Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing*, 4(2), 439-455. DOI: doi:10.3390/rs4020439.
- Jones, J., y Ritchie, J. (1990). *Crop Growth Methods: Management of Farm Irrigation Systems*. ASAE Monograph No. 9. USA: ASAE.
- Jonesa, H. G., y Tardieub, F. (1998). Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae*, 74(1), 21-46. doi:10.1016/S0304-4238(98)00081-8
- Kool, D., Agama, N., Lazarovitcha, N., Heitmanc, J. L., Sauer, T. J., y Ben-Gal, A. (2014). A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 56-70. doi:10.1016/j.agrformet.2013.09.003
- Laura Poggio, Enrico Simonetti, Alessandro Gimona. Enhancing the WorldClim data set for national and regional applications. *Science of the Total Environment* 625 (2018) 1628–1643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.258>
- Lein, J. K. (2012). *Environmental Sensing. Development* (Vol. 134). New York, NY: Springer New York. DOI: 10.1007/978-1-4614-0143-8.
- Liu, S., Su, H., Zhang, R., Tian, J., Chen, S., y Wang, W. (2016). Regional estimation of remotely sensed evapotranspiration using the surface energy balance-advection (SEB-A) method. *Remote Sensing*, 8(8). DOI: 10.3390/rs8080644.
- Maestre-Valero, J. F., Martínez, V., y González-Real, M. M. (2013). Regionalization of the Hargreaves coefficient to estimate long-term reference evapotranspiration series in SE Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(4), 1137-1152. doi:10.5424/sjar/2013114-3869
- Martí, P., Zarzo, M., Royuela, Á., y Turégano, J. V. (2016). *Comparación de modelos mensuales y anuales para estimar el coeficiente de Hargreaves en la Comunidad Valenciana. XXXIV Congreso Nacional de Riegos*

Escuela Universitaria de Inge. Sevilla, España.
doi:10.21151/CNRriegos.2016.A13

Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI). 2019. Anuario Estadístico de Mayarí 2018. Edición 2019. 1-127 p.

Pedroza-González, E., y Hinojosa-Cuéllar, G. A. (2013). Manejo y distribución del agua en distritos de riego: breve introducción didáctica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Primera Ed). Jiutepec, Morelos: IMTA.

Perry, C., Steduto, P., Allen, R. G., y Burt, C. M. (2009). Increasing productivity in irrigated agriculture: agronomic constraints and hydrological realities. *Agricultural Water Management*, 96(11), 1517-1524. doi:10.1016/j.agwat.2009.05.005

Planck, M. (1901). On the law of the energy distribution in the normal spectrum. *Ann. Phys*, 4, 1-11. DOI: 10.1002/andp.19013090310.

Ponvert-Delisle, Dámaso R. Algunas consideraciones sobre el comportamiento de la sequía agrícola en la agricultura de Cuba y el uso de imágenes por satélites en su evaluación. *Cultivos Tropicales*. 2016; 37(3): 22-41. Doi: 10.13140/RG.2.1.4591.3843.

Priestley, C. H. B., y Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. DOI: 10.1175/1520-493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2.

Priestley, C. H., y Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters monitoring. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92.

Remus Prăvălie, Adrian Piticarc, Bogdan Ro șcad, Lucian Sfîcăe, Georgeta Bandoca, Adrian Tiscovschia, Cristian Patriche . Spatio-temporal changes of the climatic water balance in Romania as a response to precipitation and reference evapotranspiration trends during 1961-2013. *Catena* 172: 295-312. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.028>.

- Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265-267. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265)
- Samani, Z., y Pessarakli, M. (1986). Estimating potential crop evapotranspiration with minimum data in Arizona. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 29(2), 522- 524. doi:10.13031/2013.30184
- Sammis, T., Sharma, P., Shukla, M. K., Wang, J., y Miller, D. (2012). A water-balance dripirrigation scheduling model. *Agricultural water management*, 103, 30-37. doi:10.1016/j.agwat.2012.06.012
- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica [en línea]*, ISSN 1405-2849. obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906402>. ISSN 1405-2849.
- Tsiros Ioannis, Nastos Panagiotis, Proutsos Nikolaos, Tsaousidis Alexandros. Variability of the aridity index and related drought parameters in Greece using climatological data over the last century (1900 –1997). *Atmospheric Research*. 2020; 240: 104914. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104914>.
- Turc, L. (1962). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. *Ann. Agron*, 12, 13-49.
- Vanderlinden, K., Giráldez, J. V., y Van Meirvenne, M. (2004). Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(1), 184-191. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:3(184)
- Vema V, Sudheer P, Chaubey I. Fuzzy inferences system for site suitability evaluation of wáter harvesting structures in rain fedregions. *Journal Agricultural Water Manage*. 2019; 218: 82-93. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.028>.

- Wien, W. (1896). Ueber die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers. *Annalen der Physik*, 294(8), 662–669. DOI: 10.1002/andp.18962940803.
- Yongfang Wang, Guixiang Liu, Enliang Guo. Spatial distribution and temporal variation of drought in Inner Mongolia during 1901-2014 using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Science of the Total Environment* 654 (2019) 850-862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.425>
- Zhang Yufang, Qu Huihui, Yang Xiaoguang, Wang Mingtian, Qin Ningsheng, Zou Yujia. Cropping system optimization for drought prevention and disaster reduction with a risk assessment model in Sichuan Province. *Global Ecology and Conservation*. 2020; 23: e01095. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01095>.