



Universidad de Matanzas



Facultad de Ciencias Agropecuarias

**Ajuste de los requerimientos hídricos del pomelo
(*Citrus paradisi* Macf.), en un suelo Ferralítico Rojo de
Jagüey Grande, Matanzas.**

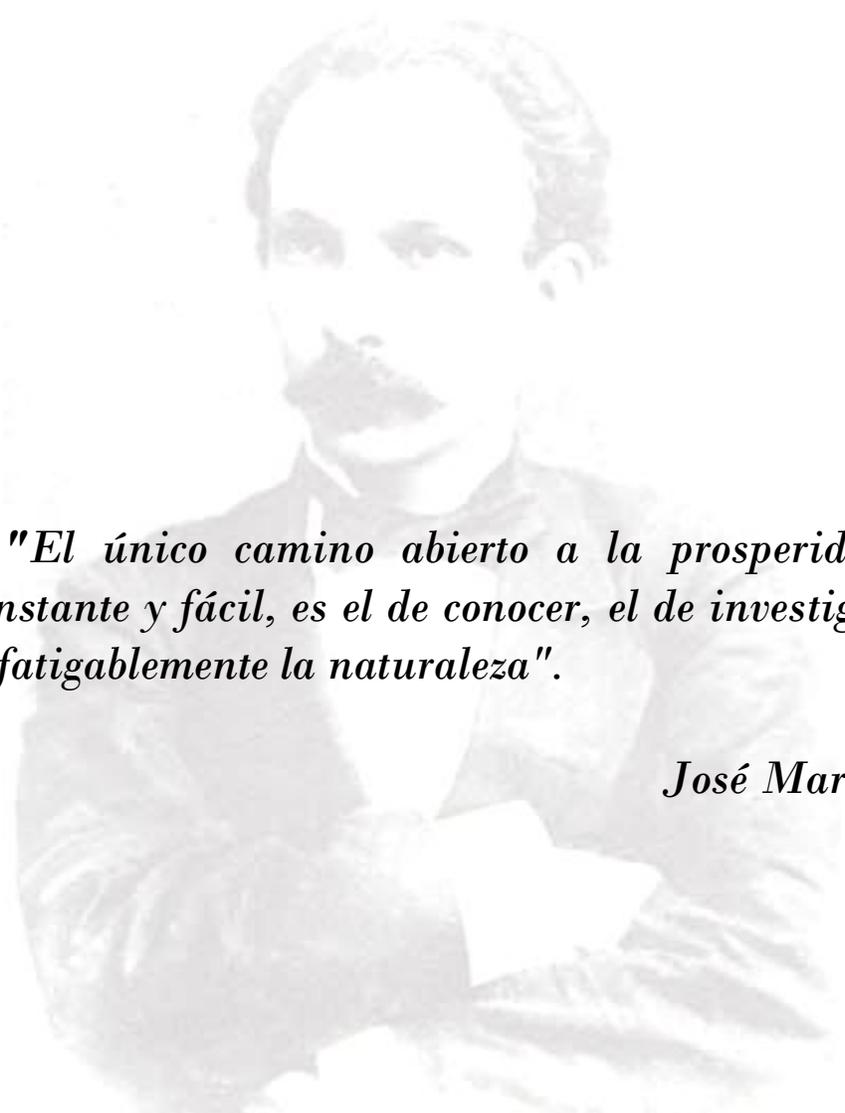
**Tesis presentada en opción al título de Especialista en Fruticultura
Tropical**

Autor: Ing. Alejandro Eugenio Calzadilla González.

Tutor: M. Sc. Yunier Sosa Sánchez.

Matanzas, 2022

PENSAMIENTO



... "El único camino abierto a la prosperidad constante y fácil, es el de conocer, el de investigar infatigablemente la naturaleza".

José Martí

DEDICATORIA

Quisiera dedicarle esta tesis a mi Familia. En primer lugar, a mis hijos, por ser mi mayor y única fortuna; a mis padres, que han estado a mi lado toda la vida compartiendo los buenos y malos momentos y me han guiado por el sendero de la vida; a mi esposa, fuente de amor, dedicación, apoyo y confianza; a mis hermanos por el regalo de su existencia.

AGRADECIMIENTOS

- Quiero agradecerle a todos aquellos que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo y en general al desarrollo de la Especialidad en Fruticultura Tropical.
- A mi tutor el M. Sc. Yunier Sosa Sánchez, por su apoyo incondicional, sin el cual no hubiera sido posible la realización de esta investigación. Por guiarme y siempre tener la mejor disposición le estaré eternamente agradecido.
- A mis profesores, quienes me han brindado todo el apoyo y entregado las herramientas necesarias para enriquecer mis conocimientos. En especial al Dr. C. Ramón Liriano, por su dedicación y entrega.
- A mis padres y mis hermanos por su apoyo para llevar a cabo estos estudios.
- A todos mis compañeros de trabajo los cuales aprecio mucho y que de una forma u otra han colaborado con estos estudios.
- A mis compañeros de aula de la especialidad quienes me hicieron recordar los gratos días de la Universidad y vivir una nueva experiencia de amistad en colectivo.
- A la “Revolución”, por darme la oportunidad de estudiar y superarme.

RESUMEN

Se presentan los resultados sobre las necesidades hídricas del pomelo en un suelo Ferralítico Rojo típico de Jagüey Grande, provincia de Matanzas, cuyo objetivo fue ajustar los requerimientos hídricos utilizados para el riego del pomelo en la Empresa Agroindustrial "Victoria de Girón" de Jagüey Grande. Se utilizó como herramienta el programa computacional CROPWAT, en el cual se hicieron corridas desde el año 2000 hasta el 2019. Los datos climáticos utilizados se tomaron de la estación meteorológica de Jagüey Grande y de la base de datos del Centro Meteorológico Provincial. Los resultados de la caracterización climática mostraron que los valores de evapotranspiración de referencia (ET_o) más bajos en el período, correspondieron a los meses de diciembre y enero con 2,84 y 2,88 mm día⁻¹ respectivamente. Los valores más elevados de ET_o se encontraron en los meses de abril (4,88) y mayo (4,91 mm día⁻¹). En cuanto a las precipitaciones se observó, que el promedio de aportes naturales en el período lluvioso, mayo-octubre, superó la pérdida por demanda climática. En este período precipitan 1 352 mm, lo que representa el 85% del total anual, superando en 467 mm a la demanda climática por concepto de evapotranspiración (815 mm). Los estudios del cultivo mostraron un escaso desarrollo del sistema radical activo, con una media de 0,42 m de profundidad y una altura promedio de las plantas de 3,5 m. Los requerimientos hídricos del cultivo oscilaron entre un mínimo de 966,0mm en el año 2012 y un máximo de 1 090,0 mm en el 2019 con una media anual de 1 017,0 mm, y una probabilidad de ocurrencia del 25% correspondiente a 1 033,0 mm.

INDICE	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. El cultivo de los cítricos	3
2.1.1. En el mundo y en Cuba. Importancia	3
2.1.2. Clima	4
2.1.3 Suelos	5
2.1.4. El uso del agua en el cultivo de los cítricos	6
2.2. Necesidades de agua de los cultivos	7
2.2.1. Evapotranspiración de referencia y del cultivo.	7
2.2.2. Coeficientes del Cultivo	9
2.2.2.1. Coeficiente único del cultivo (Kc).	9
2.2.2.2. Coeficiente dual del cultivo (Kcb).	10
2.2.3. Necesidades netas de riego	12
2.2.3.1. Precipitación efectiva	12
2.3. El cambio climático y el agua.	13
2.3.1. Manifestaciones de la variabilidad y el cambio climático en el sector agropecuario	13
2.3.2. Cambios futuros respecto a la disponibilidad y demanda de agua por efecto del cambio climático	15
2.4. El uso de herramientas computacionales aplicadas al riego.	15
2.4.1. CROPWAT	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Condiciones generales, y descripción de la zona de estudio de los requerimientos hídricos del pomelo.	18
3.2. Diseño Experimental.	19
3.3. Evaluación de las variables del clima en Jagüey Grande en el período 2000-2019 para el ajuste de los requerimientos hídricos del pomelo	20
3.3.1. Programa CROPWAT	21
3.3.1.1. Módulo Clima/ET _o	22
3.3.1.2. Módulo de precipitaciones	22
3.3.1.3. Módulo de cultivo	23
3.3.1.4. Módulo de suelo	23
3.4. Evaluación de los parámetros de crecimiento del cultivo del pomelo que influyen en sus requerimientos hídricos en Jagüey Grande	24

3.4.1. Determinación del crecimiento vertical del sistema radical activo del pomelo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”.	24
3.4.2. Determinación de la altura de las plantas de pomelo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”.	25
3.5. Determinación de los requerimientos hídricos del cultivo en Jagüey Grande en el período 2000-2019.	25
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1. Evaluación de las variables del clima en Jagüey Grande en el período 2000-2019 para el ajuste de los requerimientos hídricos del pomelo.	26
4.1.1. Caracterización de la evapotranspiración de referencia (ET _o) en Jagüey Grande en el período 2000-2019.	26
4.1.2. Relación entre la evapotranspiración de referencia (ET _o) y las temperaturas en Jagüey Grande en el período 2000-2019.	28
4.1.3 Relación entre la evapotranspiración de referencia (ET _o) y las precipitaciones en Jagüey Grande en el período 2000-2019.	30
4.1.4. Caracterización de la precipitación efectiva promedio en Jagüey Grande en el período 2000-2019.	31
4.1.5. Relación entre la evapotranspiración del cultivo (ET _c) y la precipitación efectiva en Jagüey Grande en el período 2000-2019.	32
4.2. Determinación del crecimiento vertical del sistema radical activo del pomelo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”.	33
4.3. Determinación de la altura de las plantas de pomelo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”.	35
4.4. Determinación de los requerimientos hídricos del cultivo del pomelo en Jagüey Grande en el período 2000-2019.	37
5. CONCLUSIONES	41
6. RECOMENDACIONES	42
7. BIBIOGRAFÍA	43

1. INTRODUCCIÓN

Los cítricos constituyen uno de los frutales más comercializados a nivel mundial. El consumo de sus frutos y derivados se ha incrementado en los últimos años debido a su elevado contenido de vitamina C, elemento nutricional importante para la formación de anticuerpos que contribuye a mitigar la situación epidemiológica que acontece a nivel global, generada por la COVID-19 (Agro Fresh, 2021).

En Cuba, una de las empresas más importantes dedicada al cultivo de los cítricos es la “Victoria de Girón” de Jagüey Grande en la provincia de Matanzas. Es una de las empresas más desarrolladas en cuanto a su cadena agro-industrial, logrando tener desde sus viveros hasta su combinado industrial para la producción de jugos y frigorífico propio (Anaya *et al.*, 2016).

Dicha entidad productiva cuenta con unas 4 500 ha plantadas de naranjas, limas, limones, mandarinas, y toronjas o pomelos, siendo esta última especie la de mayor importancia económica por contar con más de 2 000 ha establecidas.

La productividad de los cítricos está estrechamente ligada a la disponibilidad de agua a lo largo de su ciclo vegetativo. El riego, es una de las labores agrotécnicas de mayor importancia para obtener cosechas rentables y una mejora en la calidad de los frutos (Garzón, 2012).

El régimen de riego de proyecto implantado para el pomelo en el territorio data de finales de la década del 80 del pasado siglo, época en la cual las condiciones climáticas y agrotécnicas diferían de las actuales y es por ello que surge la necesidad de realizar una actualización de los parámetros que rigen las necesidades hídricas del pomelo a las condiciones climáticas actuales y futuras.

Se requiere además, hacer énfasis en lo que esto implica para la conservación del medio ambiente teniendo en cuenta la variabilidad y el cambio climático y estar a tono con las predicciones de reducción de las precipitaciones anuales en relación con el aumento de la evapotranspiración de referencia en Cuba, según Duarte *et al.* (2017, 2018 y 2020).

Para dar respuesta a ésta situación se plantea el siguiente **problema científico**: ¿Cómo contribuir al ajuste de los requerimientos hídricos que se utilizan en la actualidad, para el riego del pomelo (*Citrus paradisi* Macf) en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” de Jagüey Grande para mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego?

A partir de este problema se formuló la siguiente **hipótesis**: Si se ajustan los requerimientos hídricos utilizados en la actualidad para el riego del pomelo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” de Jagüey Grande se obtendrá mayor eficiencia en el uso del agua de riego.

Objetivos

Objetivo general

Ajustar los requerimientos hídricos utilizados para el riego del pomelo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” de Jagüey Grande.

Objetivos específicos

- Evaluar las variables del clima que influyen en los requerimientos hídricos del pomelo en Jagüey Grande en el período 2000-2019.
- Evaluar los parámetros de crecimiento del cultivo del pomelo que influyen en sus requerimientos hídricos en Jagüey Grande.
- Calcular los requerimientos hídricos del cultivo y determinar su probabilidad de ocurrencia en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. El cultivo de los cítricos.

2.1.1. En el mundo y en Cuba. Importancia.

El cultivo de los cítricos se ha distribuido ampliamente por regiones tropicales y subtropicales del mundo, representando una vía importante para diversificar la economía de diferentes naciones, con la obtención de ganancias que respaldan el continuo crecimiento de la producción y la exportación, a partir de la comercialización de frutos frescos y subproductos. Brasil, Estados Unidos, China, Unión Europea, México, Argentina, Chile, Australia, Sudáfrica, Israel y Turquía son los principales productores, reportando en el período 2020-2021 una producción de más de 112 millones de toneladas entre naranjas, mandarinas, limones y pomelos (Procolombia, 2021).

En Cuba, a partir de la década de los sesenta, la citricultura tuvo un crecimiento vertiginoso. La producción representó 662 000 t en una superficie de alrededor de 70 000ha, existiendo un incremento sustancial de la producción y del área plantada (Cueto, 2009).

En 1990 el área plantada sobrepasó las 140 mil hectáreas y la producción obtenida fue de algo más de un millón de toneladas de frutas con un rendimiento promedio cercano a las 7,0 t.ha⁻¹. En 1991 desapareció el mercado Socialista y como consecuencia del Período Especial, en la campaña 1993-94 la producción se redujo hasta aproximadamente la mitad de la obtenida en 1990 (Cueto, 2009).

En el 2011, estos cultivos cubren una extensión de 45 800 ha, con un rendimiento promedio de 5,35 t.ha⁻¹ y una producción anual de más de 245 000 toneladas de frutas. Estos bajos rendimientos en la producción cítrica se deben, fundamentalmente, al efecto negativo que ejercen los factores climáticos y la alta incidencia de plagas en estos cultivos (FAOSTAT, 2011).

La sostenibilidad y eficiencia de la agroindustria de este cultivo a nivel mundial está amenazada por la rápida expansión de enfermedades de alto impacto económico. En las últimas tres décadas la situación fitosanitaria se ha visto comprometida por la rápida diseminación de algunas enfermedades tales como cancrrosis, tristeza, leprosis; la introducción en países del área del Caribe de enfermedades y vectores como

Huanglongbing (HLB) y su vector *Diaphorina citri* Kuw.; el agravamiento de los efectos de enfermedades como black spot y otras enfermedades producidas por hongos y por viroides, así como la presencia de nuevas enfermedades como clorosis variegada y muerte súbita (Roistacher, 2003), que son tanto o más dañinas que la tristeza en algunos casos y de otras ya conocidas.

2.1.2. Clima.

El proceso de maduración de la fruta respecto a la producción de azúcares, disminución de acidez y el desarrollo del color, alcanzan su mayor eficiencia cuando las variaciones de temperatura diurna y nocturna son amplias. La mayor producción y mejor calidad de la fruta se obtiene en zonas donde las temperaturas promedio, oscilan entre 16°C para la temperatura mínima y 30°C para la máxima, con pequeñas variaciones para cada especie y variedad. La temperatura también afecta la duración del período comprendido entre la floración y la cosecha de la fruta madura; es más largo en zonas con temperaturas frescas (Betancourt *et al.*, 2006; Aranguren, 2009).

En términos generales, se estima que la cantidad de agua necesaria para un huerto de cítricos oscila entre 9 000 y 12 000 m³ por hectárea por año, lo que equivale a una precipitación anual de 900 a 1 200 mm, sin embargo, las precipitaciones mayores no son problemáticas siempre y cuando haya un buen drenaje del suelo. Una precipitación más baja o una estación seca definida pequeña o prolongada afectan este cultivo por lo que el riego es fundamental (Davies y Albrigo, 1994; Agustí, 2003).

Se considera que la humedad relativa influye sobre la calidad de la fruta. Los cítricos en regiones donde la humedad relativa es alta, tienden a tener piel más delgada y suave, contienen mayor cantidad de jugo y son de mejor calidad; aunque, en casos extremos, presenta como desventaja el desarrollo de enfermedades fungosas y de algunas plagas (Casamayor, 2018). El rango adecuado de humedad relativa puede considerarse entre 40% y 70% (Agustí, 1998).

Antes de establecer una plantación la velocidad del viento predominante en la zona debe tenerse muy en cuenta, ya que los vientos fuertes provocan deshidratación, roturas de ramas, caída de flores, hojas y frutos, lo que puede evitarse mediante el establecimiento de barreras rompevientos, que pueden ser naturales o artificiales. De ser naturales deberán establecerse previo a la plantación, con árboles de crecimiento

vertical, de rápido desarrollo, follaje denso y que no alberguen plagas y enfermedades comunes a los cítricos (MINAG, 2011).

Las altitudes aptas para el cultivo de naranjas para jugo, oscila entre los 500 y 1 200 msnm, mientras que las zonas bajo los 500 m, son muy adecuadas para ciertas especies de cítricos como las toronjas, limones, limas ácidas y algunas mandarinas (Lima *et al.*, 1998).

2.1.3 Suelos.

En los suelos en general, los cítricos tienen un amplio rango de adaptación, teniendo en cuenta que las propiedades físicas del suelo son tan importantes como las químicas. En suelos muy arcillosos se dificulta la penetración de las raíces, lo cual impide el desarrollo radicular, generando árboles de bajo porte, fruta pequeña de corteza gruesa y áspera con poco contenido de jugo, pero con mayor contenido de sólidos solubles, lo que provoca una maduración lenta. Los suelos pesados con lenta infiltración del agua no deben dedicarse a este cultivo ya que generalmente están asociados con pudriciones de las raíces causadas por el actinomiceto *Phytophthora sp* (L), y el hongo *Diplodia natalensis* (Polen-evans) (Morales, 2016; Gómez, 2017; Figueredo, 2018).

En suelos limo arenosos, el árbol desarrolla un sistema radicular extenso, copa grande y frutos de corteza delgada, suave, con alto contenido de sólidos solubles, condiciones que ocasionan una maduración rápida. La textura ideal de los suelos para el cultivo de los cítricos está comprendida entre liviana y media (Agustí, 2003).

Otro aspecto importante del suelo para el cultivo de cítricos es la profundidad efectiva, siendo esta la mayor profundidad a que penetran las raíces de los árboles, sin que encuentren obstáculos físicos que impidan su normal crecimiento y desarrollo. Estos obstáculos pueden ser la presencia de rocas o materiales poco meteorizados, que por su dureza impiden físicamente la penetración de la raíz, capas de suelo compactas y un nivel freático a escasa profundidad. Se recomienda que la profundidad de los suelos dedicados al cultivo de los cítricos no sea inferior a 1 m aunque es conveniente que sea de 1,5 m. El pH más conveniente para cítricos está entre 5,5 y 6,5 (Davies y Albrigo, 1994; Giles, 2017; Puente *et al.*, 2017).

2.1.4. El uso del agua en el cultivo de los cítricos.

Los cítricos necesitan considerables volúmenes de agua para satisfacer sus requerimientos hídricos. La humedad en el entorno debe ser la suficiente como para garantizar una buena cosecha del fruto y para que los árboles no sufran de estrés hídrico.

Cuando el agua aportada por la lluvia es inferior a la evapotranspiración potencial del cultivo es necesario un suministro adicional por medio del riego para obtener cosechas rentables y una mejora en la calidad de los frutos (Garzón, 2012); aunque hay que tener en cuenta, que el estado hídrico de los cítricos no depende exclusivamente del contenido de agua en el suelo, sino también de las condiciones ambientales, y del estado fenológico del cultivo (De la Rosa *et al.*, 2015).

Se estima que la cantidad de agua necesaria para suplir los requerimientos hídricos de los cítricos puede variar entre los 900 y 1 563 mm bien distribuidos durante todo el año (Koo, 1963; De la Fuente, 2007; Orduz y Fischer, 2007).

En Honduras se utilizan normas netas de 889 mm a 1 219 mm al año (COFRUTCO, 2017), mientras que en la región de Murcia, España, se aplican de 700 a 1 200 mm al año (SIAM, 2018).

Los cítricos son altamente sensibles al estrés hídrico ya que la falta de agua durante el desarrollo del fruto disminuye los rendimientos, y la calidad del fruto. El déficit hídrico en los cítricos constituye un factor limitante del crecimiento del fruto y en general de la producción (Pérez-Pérez *et al.*, 2009). El efecto del déficit de humedad dependerá de la intensidad de la sequía, de la duración de la misma y de la época en que ocurre dentro del ciclo del cultivo (Ballester *et al.*, 2011).

En la mayoría de los cultivares de cítricos el período de máxima sensibilidad a la falta de agua es el de floración y cuajado, seguido del que comprende la fase inicial de crecimiento de los frutos, donde aumenta la caída de frutos y provoca la disminución de la tasa de crecimiento, determinando el tamaño final del mismo (Pérez-Pérez *et al.*, 2010).

El manejo de la humedad del suelo hacia niveles que provoquen un ligero estrés hídrico en las plantas induce en los árboles una precocidad en la maduración de los frutos. Un déficit hídrico moderado durante la acumulación de jugo y maduración puede ser

conveniente para realizar cambios internos en la calidad de la fruta, principalmente aumentando el contenido de sólidos solubles y ácidos (Pérez-Pérez *et al.*, 2014).

Dell' Amico *et al.* (2012) reportaron, en mandarina " Fortune ", que el efecto del estrés hídrico aplicado al final de la fase II del crecimiento del fruto prácticamente no limitó el tamaño, pues se obtuvo mayor diámetro ecuatorial y área de la sección transversal de los frutos con respecto al tratamiento control.

2.2. Necesidades de agua de los cultivos.

El conocimiento de las necesidades de agua de los cultivos es imprescindible para la definición de los regímenes de riego que garanticen sus rendimientos (Figura 1). Para una agricultura como la de Cuba, con un clima típicamente tropical, cuyo suministro principal de agua (las precipitaciones) se encuentra sometido a grandes variaciones donde la siembra de los cultivos de ciclo corto o temporales en la mayoría de los casos coincide con la temporada seca. El riego constituye una actividad agrícola vital para la supervivencia de los cultivos, la estabilización de la producción y la obtención de altos rendimientos (Chaterlán, 2012; Zhang *et al.* 2018).

Para obtener adecuados requerimientos de agua en los cultivos es necesario conocer dos definiciones fundamentales, pero distintas, de necesidades hídricas: evapotranspiración y necesidades netas de riego de los cultivos.

2.2.1. Evapotranspiración de referencia y del cultivo.

En una determinada parcela cultivada, el agua pasa a la atmósfera mediante: a) la evaporación de agua que se encuentra en la superficie del suelo y b) la transpiración, que es la evaporación de agua desde los tejidos vegetales a través de las estomas. Debido a la dificultad de cuantificarlos por separado, ambos procesos se suelen estimar conjuntamente y de ahí el término de evapotranspiración (Cob, 2004).

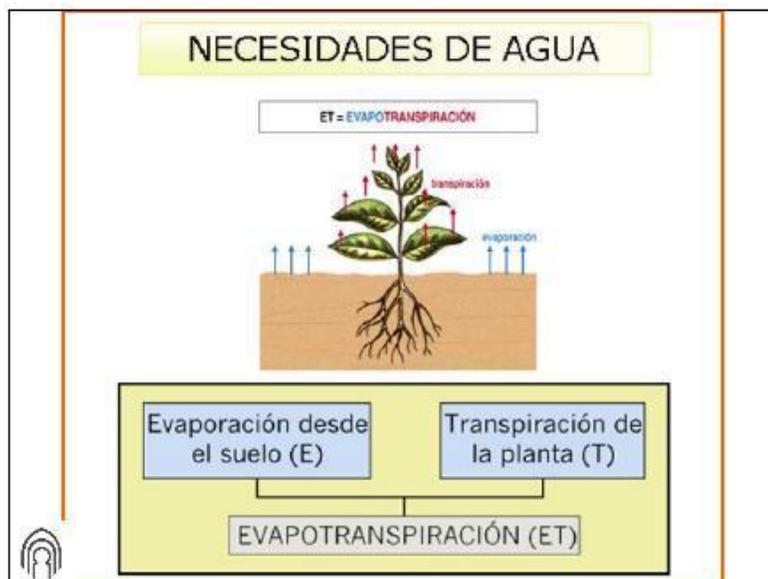


Figura 1. Necesidades de agua de los cultivos.

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal (FAO, 2006).

El cálculo de la evapotranspiración es fundamental para la estimación de la demanda de riego de un cultivo. El concepto de la ET incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración de referencia (ET_o), parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera; la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), referido al proceso de evapotranspiración cuando existen las condiciones óptimas en las parcelas que garantizan la máxima producción; y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), que refleja la condición en que no existe un manejo adecuado y se presentan además limitaciones

ambientales que afectan el desarrollo del cultivo y por consiguiente sus rendimientos (Chaterlán, 2012).

2.2.2. Coeficientes del Cultivo.

2.2.2.1. Coeficiente único del cultivo (K_c).

En el enfoque del coeficiente único del cultivo, los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo son combinados en un coeficiente K_c único. Este coeficiente integra las diferencias en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie del pasto de referencia. Como la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente como resultado de la lluvia o el riego, el coeficiente único del cultivo es solamente una expresión de los efectos promedios en el tiempo (múltiples días), de la evapotranspiración del cultivo (FAO, 2006).

Durante el periodo de crecimiento del cultivo, la variación del coeficiente del cultivo K_c expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Esta variación del coeficiente K_c a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo. Para describir y construir la curva del coeficiente del cultivo se necesitan solamente tres valores de K_c : los correspondientes a la etapa inicial ($K_{c\text{ ini}}$), la etapa de mediados de temporada ($K_{c\text{ med}}$) y la etapa final ($K_{c\text{ fin}}$) como se aprecia en la figura 2 (FAO, 2006).

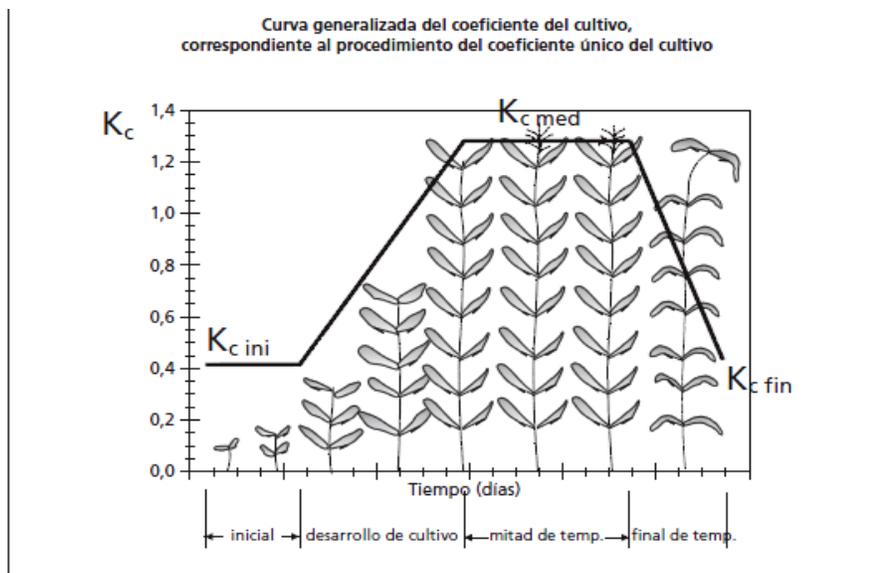


Figura 2. Curva generalizada del coeficiente de cultivo (FAO, 2006).

Según FAO (2006) el coeficiente de cultivo K_c , depende de las características anatomorfológicas y fisiológicas de la especie y expresa la variación de su capacidad para extraer agua del suelo durante el ciclo vegetativo. La especie vegetal y el tamaño de la planta representada por su volumen foliar y radical, gobierna el coeficiente K_c .

Para el cálculo del mismo, la FAO recomienda dividir el ciclo del cultivo en cuatro fases fenológicas: a) inicial, desde la siembra o trasplante hasta que éste cubre aproximadamente un 10% de la superficie del suelo; b) desarrollo, desde el fin de la fase inicial hasta que el cultivo cubre aproximadamente un 70-80% del suelo, es decir, hasta que se alcance una cobertura efectiva del suelo; c) mediados, desde el fin de la fase de desarrollo hasta que el cultivo muestra los primeros síntomas de senescencia y d) final, desde el final de la fase de mediados hasta que se alcanza la madurez fisiológica del cultivo o, en cultivos hortícolas, hasta la fecha de cosecha (Cob, 2004).

El coeficiente único K_c incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo. Para la planificación normal del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico, los coeficientes promedios del cultivo son apropiados y más convenientes que los valores de K_c calculados con base diaria usando coeficientes separados de cultivo y suelo (FAO, 2006).

2.2.2.2. Coeficiente dual del cultivo (K_{cb}).

El procedimiento de cálculo del coeficiente dual del cultivo K_{cb} es más profundo y requiere de más cálculos que el procedimiento para el cálculo del coeficiente único del cultivo (K_c). Es aplicado para datos diarios y particularmente adecuado para el cálculo mediante el uso de computadoras apoyado en la ecuación formulada por Allen *et al.* (1998).

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

Dónde: K_c es el coeficiente cultural (adimensional); K_{cb} es el coeficiente basal del cultivo y K_e coeficiente de evaporación de agua en el suelo.

El coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) se define por estos autores como la relación entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia (ET_c/ET_o)

cuando la superficie del suelo se encuentra seca, pero el contenido de agua en el suelo en la zona radical es adecuado para mantener la plena transpiración del cultivo.

Para este enfoque, el procedimiento de cálculo de la evapotranspiración del cultivo, ET_c , comprende varias etapas: lo primero es la identificación de la duración de las fases de desarrollo del cultivo y selección de los valores de K_{cb} correspondientes; posteriormente se deben ajustar los valores de los coeficientes K_{cb} seleccionados, de acuerdo a las condiciones climáticas de cada etapa del cultivo y a partir de estos construir la curva del coeficiente basal del cultivo. Por otra parte se deben determinar los valores diarios de K_e para la evaporación desde la superficie del suelo y por último calcular la ET_c a partir de la ecuación siguiente (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_c = (K_{cb} + K_e)ET_o$$

La curva del K_{cb} , representada en la figura 3 es trazada de manera análoga a la del coeficiente único, a partir de 3 valores: K_{cbini} , K_{cbmed} , y K_{cbfin} que corresponden a los períodos inicial, medio y final del cultivo respectivamente.

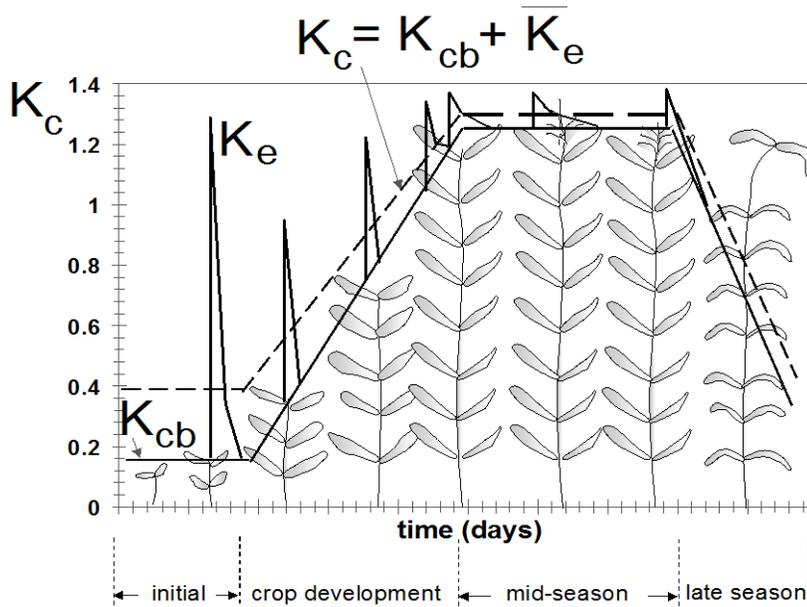


Figura 3. Curvas del coeficiente basal del cultivo K_{cb} , coeficiente de evaporación del suelo K_e y el correspondiente coeficiente cultural dual $K_c = K_{cb} + K_e$ (tomado de Allen *et al.*, 1998)

2.2.3. Necesidades netas de riego.

Como se ha indicado anteriormente, la evapotranspiración de un cultivo constituye el volumen de agua que ese cultivo necesita para su desarrollo óptimo. Parte de ese volumen debe ser suministrado por el riego y se conoce como necesidades netas de riego (NR_n) (Cob, 2004).

Uno de los principales problemas del regante es conocer la cantidad de agua que tiene que aplicar a un campo para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos; en otras palabras, es preciso determinar el agua de riego necesaria (Brouwer, 1987).

Según Cob (2004) las NR_n se calculan como la diferencia entre la evapotranspiración de cultivo (Etc) y los aportes naturales de agua (Apn):

$$NR_n = Etc - Apn$$

Donde todos los términos de esta ecuación se expresan en mm por unidad de tiempo (día, semana, mes, etc.).

2.2.3.1. Precipitación efectiva.

De los aportes naturales el más significativo es la precipitación. Se denomina precipitación efectiva a la proporción de agua procedente de la precipitación que se almacena en el suelo y contribuye a satisfacer las necesidades hídricas brutas de los cultivos (Cob, 2004).

Existen distintos métodos para la estimación de la precipitación efectiva que comprende desde períodos semanales hasta decenales e incluso mensuales. Un ejemplo de método para el cálculo de la precipitación es el USDASCS (P).

$$Pe = Pt (125 - 0.2 Pt / 125) \text{ para } Pt < 250 \text{ mm}$$

$$Pe = 125 + 0.1 Pt \text{ para } Pt > 250 \text{ mm}$$

Dónde:

Pe: Precipitación efectiva (mm)

Pt: Precipitación (diaria, mensual o anual) (mm)

Para Brouwer (1987) son muchos los factores que determinan la cantidad de precipitación efectiva (Tabla 1). Hay algunos de ellos sobre los que el agricultor no puede influir (el clima y la textura del suelo) y otros sobre los que sí puede hacerlo (la estructura del suelo).

Tabla 1. Factores que influyen en la precipitación efectiva mediante la infiltración, la escorrentía superficial y la evapotranspiración (FAO, 1974).

Factor	Características pertinentes
Lluvia	Cantidad, intensidad, frecuencia, distribución en la zona y en el tiempo.
Otros parámetros meteorológicos	Temperatura, radiación, humedad relativa, velocidad del viento.
Terreno	Topografía, pendiente, tipo de uso.
Suelo	Profundidad, textura, estructura, densidad aparente del suelo, contenido de sal y de materia orgánica.
Agua del suelo	Altura piezométrica, material en suspensión, turbiedad debida a arcilla o a coloides, viscosidad, temperatura, naturaleza de las sales disueltas (Na ⁺ , NO ₃).
Agua subterránea	Profundidad desde la superficie, calidad.
Administración	Tipo de labranza, grado de nivelación, tipo de disposición, (dique, terrazas, camellones), uso de acondicionadores del suelo.
Cauce	Tamaño, inclinación, forma, aspereza y efecto del remanso.
Cultivos	Naturaleza de los cultivos, profundidad del sistema de raíces, grado de la cubierta terrestre, fase del crecimiento, rotación de cultivos.

2.3. El cambio climático y el agua.

2.3.1. Manifestaciones de la variabilidad y el cambio climático en el sector agropecuario.

El sector agrícola se verá afectado por uno de los principales desafíos a los que se enfrenta el hombre del siglo XXI: el fenómeno, de lenta evolución, cambio climático. La agricultura se desenvolverá en un ambiente afectado por el aumento de la frecuencia e intensidad de las sequías, la aridización del clima, la disminución de la evapotranspiración real de los ecosistemas y un pronunciado déficit hídrico (Hijmans *et al.*, 2005; Cruz, 2014; Iñiguez *et al.*, 2015; Rivero *et al.*, 2015; Ezatollah y Marzieh, 2018; Malek *et al.*, 2018).

Muchos científicos han señalado que como consecuencia de las alteraciones climatológicas ocurrirán las siguientes afectaciones el incremento de la temperatura media, el cambio en la cantidad y distribución de la lluvia, el incremento de la concentración de dióxido de carbono atmosférico, niveles de polución tales como el ozono troposférico y la ocurrencia de eventos extremos, como tsunamis y huracanes (Cruz, 2014; Gutiérrez *et al.*, 2014).

En nuestro país existe un importante grupo de programas nacionales sectoriales que contribuyen a la adaptación al cambio climático. Los más importantes son: Programa Forestal Nacional, Programa de Uso Racional y Ahorro del Agua, Programa de Mejoramiento y Conservación de los Suelos, Programa de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (basado en el Manejo Sostenible de Tierras), Programa de Lucha contra Vectores Trasmisores de Enfermedades, que incluye las especies exóticas invasoras, entre otros (Rivero *et al.*, 2015).

Además, y con el mismo propósito, se están desarrollando un conjunto de proyectos en la esfera medioambiental, con financiamiento internacional, entre ellos: Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local BASAL (COSUDE, PNUD, Unión Europea); Ecosistema Sabana Camagüey (FMAM, PNUD); Manejo Sostenible de Tierras (FMAM, PNUD, FAO, PNUMA); Prevención, Gestión y Control de Especies Exóticas (FMAM, PNUD); Conservación de Ecosistemas Montañosos Amenazados (FMAM, PNUD) (Rivero *et al.*, 2015).

La degradación de los suelos, con una evidente expresión en la pérdida de rendimientos agrícolas, constituye uno de los principales problemas ambientales que enfrenta hoy el país. Los procesos erosivos afectan a 2,5 MM ha de suelos, el alto grado de acidez alcanza alrededor de 3,4 MM ha, la elevada salinidad y sodicidad se manifiesta en alrededor de un millón de ha, la compactación incide sobre 2,5 MM, los problemas de drenaje alcanzan 2,7 MM ha. La más reciente evaluación de las tierras del país para 29 cultivos de interés, reportó que el 65% de los suelos están por debajo del 50% de su rendimiento potencial. Los estudios agroquímicos realizados en los últimos años en áreas de cultivo de importancia económica han evidenciado que la mayoría de los suelos cubanos poseen bajo contenido de nutrientes, alta tendencia a la acidez y una drástica reducción de la materia orgánica (Rivero *et al.*, 2015).

Según Planos (2014) la esfera agropecuaria en Cuba tuvo afectaciones notables, sobre todo en las zonas orientales del país. Por ejemplo, en la provincia de Granma, entre 2003 y 2004, el Ministerio de la Agricultura perdió cerca de 82 millones de pesos debido a la sequía. En el año 2004, las pérdidas fueron de más de 32 000 cabezas de ganado, que incluyeron aproximadamente 10 000 cabezas de ganado bovino, para un déficit de 5 millones de litros de leche. En este mismo año se dejaron de producir más de 6 millones de alevines y se secaron más de 80 estanques acuícolas. En general, se perdieron más de 21 millones de peso en la agricultura y el azúcar. En Santiago de Cuba se afectaron aproximadamente 3 000 ha de siembra. Estos ejemplos, entre otros, son suficientes para demostrar la situación por la que atraviesa la ganadería y la agricultura cubana.

2.3.2. Cambios futuros respecto a la disponibilidad y demanda de agua por efecto del cambio climático.

Los principales factores climáticos que determinan la disponibilidad de agua son la precipitación, la temperatura y la demanda evaporativa (determinada por la radiación neta en la superficie del terreno, la humedad atmosférica, la velocidad del viento y la temperatura).

El cambio climático afecta a la rapidez de recarga de las aguas subterráneas (es decir, a los recursos freáticos renovables) y al espesor de las masas freáticas. Sin embargo, no es mucho lo que se sabe sobre la recarga y los niveles actuales, tanto para los países desarrollados como en desarrollo; además, ha habido muy pocas investigaciones sobre el impacto futuro del cambio climático sobre las aguas subterráneas, o sobre las interacciones entre el agua subterránea y el agua superficial (Valdés, 2017).

Una mayor variabilidad de la precipitación podría reducir la recarga freática en áreas húmedas, dado que una mayor asiduidad de la precipitación intensa podría rebasar con mayor frecuencia la capacidad de infiltración del suelo (Verdecia, 2016).

2.4. El uso de herramientas computacionales aplicadas al riego.

La programación de riego es una metodología que permite determinar el nivel óptimo de agua a aplicar en cada período fenológico del cultivo, de acuerdo a las interacciones específicas de suelo, planta y clima; las cuales actualmente son integradas a través de

modelos biomatemáticos que se desarrollan mediante el uso de herramientas computacionales. Los programas de computación disponibles cada vez son más utilizados, van aumentando sus prestaciones y potencialidad para el análisis de datos, a la vez que son más amigables para el usuario (Ruiz *et al.*, 2019).

Por los beneficios que aportan estas herramientas computacionales, especialistas de la Universidad Agraria de La Habana, del Instituto de Investigaciones en Ingeniería Agrícola y el de Investigaciones de la Caña de Azúcar, elaboraron los primeros trabajos para utilizar en nuestras condiciones geográficas cinco de los modelos agrohidrológicos de alcance internacional (Hernández *et al.*, 2009).

Por primera vez en el país, se ofrecen los parámetros que describen las propiedades hidráulicas para los principales grupos de suelos cubanos. Esta investigación le confiere validez al modelo Swcrop para ser utilizado en el cultivo de la papa en condiciones tropicales (Hernández *et al.*, 2009).

También se obtiene una versión del modelo Swap para la caña de azúcar. Este predice los daños que puedan originarse por cambios climáticos, características del suelo y fecha apropiada para la siembra (Hernández *et al.*, 2009).

López *et al.* (2001) realizaron trabajos con los modelos de simulación (STIC y MACRO) con el objetivo de resumir y discutir sus características y posibilidades para la predicción del comportamiento de los cultivos agrícolas ante diferentes manejos de agua, fertilización y ambientes climáticos. Chaterlán (2007), desarrolló una investigación para calibrar y validar el modelo ISAREG, con el fin de obtener los coeficientes de cultivo (Kc) y la fracción de agotamiento (p) adecuada para el cultivo de la cebolla.

2.4.1. CROPWAT

CROPWAT 8.0, para Windows es un programa de computación que puede ser usado para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos con base en datos climáticos, fenológicos y edafológicos. Además, permite la elaboración de calendarios de riego para diferentes condiciones de manejo y el cálculo del esquema de provisión de agua para distintos patrones de cultivos. Está basado en las metodologías descritas en los boletines 56, 33 y 24 de la serie Riego y Drenaje de la FAO, y ha sido utilizado en banano por Cigales y Pérez (2011). En otros cultivos por Verdecia (2016), Valdés (2017) y Duarte *et al.* (2017).

Este modelo además estima la reducción del rendimiento por estrés hídrico y se expresa como un porcentaje de la producción máxima alcanzable en la zona en condiciones óptimas. Todas las versiones operan bajo el concepto de evapotranspiración de referencia calculada mediante el método de Penman-Monteith FAO y la versión ocho ofrece la posibilidad de ingresar el valor de evapotranspiración por los métodos recomendados en Allen *et al.* (2006).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Condiciones generales, y descripción de la zona de estudio de los requerimientos hídricos del pomelo.

La investigación se realizó en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” en Jagüey Grande, provincia de Matanzas. Los datos de la base experimental de suelo se adquirieron de la dirección de producción de dicha entidad y los del cultivo a partir de investigaciones de campo realizadas en el área de estudio en el último trimestre de 2019 y de la base de datos del historial científico de la Unidad Científico Tecnológica de Base de Jagüey Grande.

Los datos climáticos utilizados, correspondientes al período 2000-2019, se adquirieron de la estación meteorológica de Jagüey Grande, la cual tiene como coordenadas geográficas 22.32^o de latitud Norte y 81.08^o de longitud Oeste, a una altura de 11 metros sobre el nivel medio del mar y se encuentra ubicada en el perímetro de la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”. Además, se utilizó información de la base de datos del Centro Meteorológico Provincial de Matanzas.

El clima de ésta región se caracteriza por una temperatura media anual de 23^oC, con mínimas de 15,5^oC y máximas de 33,3^oC. La precipitación media anual es de 1 607 mm y una humedad relativa media anual de 67%.

Los suelos predominantes son Ferralítico Rojo típico, según la clasificación genética de los suelos de Cuba y catalogados como Ferralsol Rhodic y Nitisol Rhodic en correlación con el “World Reference Base” (Hernández *et al.*, 2004), con presencia de un relieve llano y con textura arcillosa con arcilla del tipo 1:1 con un buen drenaje en general, además, una porosidad elevada, la capacidad de campo sobre la base del suelo seco fluctúa entre 28 y 36%, mientras que la densidad aparente está entre 1,32 y 1,34 g.cm⁻³. La velocidad de infiltración oscila desde media a alta, registrándose como máxima tasa de infiltración básica de la lluvia 70 mm día⁻¹ (Iglesias, 2006). En general se puede decir que son suelos de buena estructura.

Las evaluaciones del crecimiento del sistema radical y de la altura de las plantas se realizaron en áreas de la Unidad Empresarial Base (UEB) No 1, de la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”, en una plantación de pomelo ‘Marsh’, injertada sobre patrón *Citrus Volkameriana*, de 10 años de edad, plantada a una distancia de 7x3m,

con un sistema de riego localizado por goteo y ubicada en el lote T-5, cuadrante 2, banda D (figura 4).



Figura 4. Vista aérea del área de estudio.

Como condiciones para la selección del área se tuvieron en cuenta las más representativas en la empresa para el cultivo del pomelo. Entre ellas se destacan la combinación cultivar patrón, el tipo de suelo, la distancia de plantación y la técnica de riego empleada. Además, la edad de la plantación se eligió teniendo en cuenta aquella donde el cultivo alcanza su máximo potencial productivo en Cuba según MINAG (2018).

3.2. Diseño Experimental.

En el desarrollo de esta investigación se evaluaron dos variables que se utilizaron como datos en el módulo de entrada cultivo del programa CROPWAT. Estas variables fueron la profundidad del sistema radical activo y la altura promedio del cultivo del pomelo. Su estudio fue importante ya que la información que se tenía al respecto respondía al uso de técnicas de riego por aspersión, a marcos de plantación más espaciados y a otras combinaciones de cultivar patrón.

Se empleó un diseño experimental completamente aleatorio con un total de cinco plantas de pomelo 'Marsh', en el área representativa (1 ha) del cultivo en la Empresa Agroindustrial "Victoria de Girón" de Jagüey Grande.

Para evaluar la altura se seleccionaron 15 plantas en diagonal cruzada en la misma plantación, según el Instructivo técnico para el cultivo y beneficio de los cítricos, (MINAG, 1990).

3.3. Evaluación de las variables del clima en Jagüey Grande en el período 2000-2019 para el ajuste de los requerimientos hídricos del pomelo.

Para ajustar los requerimientos hídricos del pomelo en Jagüey Grande es preciso estudiar la evolución de los elementos del clima que influyen en la determinación de la evapotranspiración de referencia (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar), así como la incidencia de las precipitaciones efectivas en el período evaluado. Para ello se utilizó el programa CROPWAT versión 8.0.

Para la determinación de la evapotranspiración de referencia el programa utilizó el método de Penman-Monteith, recomendado por la FAO. La ecuación es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)}$$

donde:

ET _o	evapotranspiración de referencia (mm día ⁻¹)
R _n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
R _s	radiación extraterrestre (mm día ⁻¹)
G	flujo del calor de suelo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u ₂	velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
e _s	presión de vapor de saturación (kPa)
e _a	presión real de vapor (kPa)
e _s - e _a	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹)
γ	constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)

En el caso de las precipitaciones efectivas el método empleado fue el *USDA Soil Conservation Service*, para los valores mensuales de precipitación. La fórmula empleada por el programa aparece a continuación, utilizada por ser uno de los métodos más precisos en sus cálculos, según Elizastigue (2018) y Oña (2019) ya que los métodos de Savo y del Servicio de Conservación de Suelos de EE. UU son los que

mejor describen la variación de la lluvia aprovechable al ser comparados con el método del balance hídrico del suelo.

$Pe = Pt (125 - 0.2 Pt / 125)$ para $Pt < 250$ mm

$Pe = 125 + 0.1 Pt$ para $Pt > 250$ mm

Dónde:

Pe: Precipitación efectiva (mm)

Pt: Precipitación (diaria, mensual o anual) (mm)

3.3.1. Programa CROPWAT.

El programa CROPWAT es usado para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y de sus requerimientos de riego en base a datos climáticos y de cultivo y suelo, según se necesiten, ya sean existentes en series históricas o medidas en la actualidad.

Para el cálculo de los Requerimientos de Agua del Cultivo (RAC), CROPWAT requiere de datos de evapotranspiración (ET_o). El programa permite al usuario ingresar valores de evapotranspiración de referencia (ET_o), o ingresar datos individuales de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, para calcular la ET_o aplicando la ecuación de Penman-Monteith.

También son necesarios los datos de precipitación total del área de estudio, para calcular la precipitación efectiva.

Como datos de entrada para el cálculo de los RAC y de la programación de riego el programa necesita datos de cultivos (cultivos no inundados o arroz), y también datos de suelo si el usuario también desea determinar la programación de riego para igual condición.

En la ventana principal de CROPWAT (figura 5) la barra de módulos está ubicada a la izquierda. Los íconos de la barra de módulos proporcionan acceso directo a los módulos disponibles del programa. La primera vez que se seleccione el botón para Clima/ET_o, Precipitación, Cultivo, Suelo o Patrón de cultivo se abrirá una ventana de entrada de datos para el módulo respectivo.

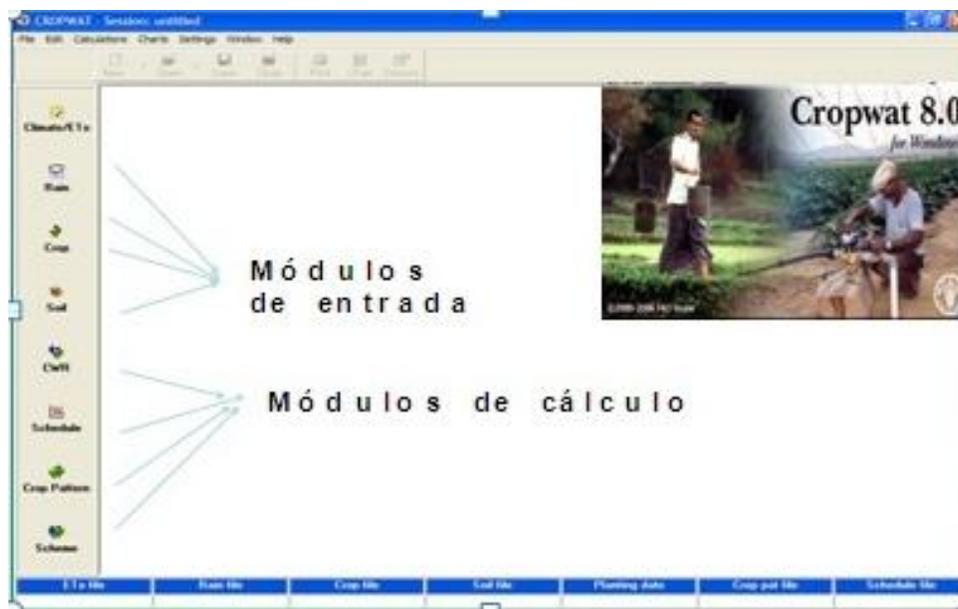


Figura 5. Plantilla de la ventana principal del programa CROPWAT (Allen *et al.*, 2006).

3.3.1.1. Módulo Clima/ETo

Este módulo se puede seleccionar haciendo clic sobre el ícono Clima/Eto como ícono en la Barra de Módulo situada a la izquierda de la ventana principal de CROPWAT. Los tipos de datos disponibles en este módulo son:

- ETo Mensual calculada por el método Penman-Monteith
- ETo Decenal calculada por el método Penman-Monteith
- ETo Diaria calculada por el método Penman-Monteith
- Eto media mensual (utilizada)
- Eto media decenal
- Eto media diaria

3.3.1.2. Módulo de precipitaciones.

Este módulo se puede seleccionar haciendo clic en el icono de Precipitación en la Barra de Módulos situada a la izquierda de la Ventana Principal de CROPWAT. La ventana de datos se abrirá por defecto para ese tipo de datos; es posible cambiar rápidamente a otro tipo de datos utilizando el menú desplegable del icono Nuevo en la barra de Herramientas. Los tipos de datos disponibles en este módulo son:

- Mensual (utilizado)
- Decenal

- Diarios

3.3.1.3. Módulo de cultivo.

Este módulo se puede seleccionar haciendo clic en el ícono de cultivos en la Barra de Módulos situada a la izquierda de la ventana principal de CROPWAT. La ventana de datos se abrirá con el tipo de datos por defecto; es posible cambiar a otro tipo de datos utilizando el menú desplegable. Los tipos de datos disponibles en este módulo son:

- Cultivos diferentes al arroz (utilizado)
- Arroz

El módulo de cultivos es esencialmente para la introducción de datos, requiriéndose datos de cultivo para las diferentes etapas de desarrollo.

El ciclo del cultivo considerado fue de 365 días (60 días etapa inicial, 120 días etapa de desarrollo, 90 días etapa intermedia y 95 días etapa final). La altura promedio del cultivo fue de 3,50 m y la máxima profundidad del sistema radical activo de 0,46 m. Se utilizó un coeficiente de cultivo (K_c) en la etapa inicial de 0,70, en la etapa intermedia de 0,74 y en la etapa final de 0,59, según lo recomendado por el Instructivo técnico para el cultivo y beneficio de los cítricos (MINAG, 1990).

3.3.1.4. Módulo de suelo.

Este módulo es seleccionado haciendo clic en el ícono de Suelo en la Barra de Módulos situados a la izquierda de la ventana principal de CROPWAT.

El módulo de suelo es esencialmente de datos de entrada, que requiere los siguientes parámetros:

- Humedad total disponible del suelo: $211,2 \text{ mm m}^{-1}$, calculada según propiedades del suelo Ferralítico Rojo.
- Índice de infiltración de lluvia máximo: 70 mm h^{-1} , según datos del suelo.
- Máxima profundidad de raíces: 0,45 m.
- Agotamiento inicial de humedad del suelo: 0%, al momento del riego.
- Humedad inicial disponible del suelo: $211,2 \text{ mm m}^{-1}$.

3.4. Evaluación de los parámetros de crecimiento del cultivo del pomelo que influyen en sus requerimientos hídricos en Jagüey Grande.

En esta investigación se evaluaron dos parámetros del crecimiento que se utilizaron como datos en el módulo de entrada cultivo del programa CROPWAT. Estos parámetros fueron la profundidad del sistema radical activo y la altura promedio del cultivo del pomelo. Su estudio fue importante ya que la información que se tenía al respecto respondía al empleo de labores agrotécnicas que propiciaban patrones de crecimiento diferentes de los actuales que repercuten en las exigencias hídricas del cultivo. Entre ellas es preciso destacar; el uso de otros métodos de riego como aspersión y superficial, marcos de plantación más espaciados y otras combinaciones cultivar patrón.

3.4.1. Determinación del crecimiento vertical del sistema radical activo del pomelo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”.

Se hicieron calicatas (figura 6) a ambos lados de cada planta, de 3 m de largo, tomando el tronco de la planta como centro, 1.5 m de ancho y 1,0 m de profundidad y se acondicionó el área previamente a las mediciones.



Figura 6. Muestra de calicatas realizadas en el área de estudio.

Para la evaluación del crecimiento en profundidad de las raíces se utilizó, como guía, la metodología propuesta por Kolesnikov (1972) para el estudio de esta variable. Se realizaron mediciones en el plano vertical, en el sentido de la hilera y de la calle, con el fin de determinar la profundidad de las raíces cuyo diámetro no sobrepasara los 3 mm, las cuales corresponden al sistema radical activo o de absorción de los cítricos, según Adato y Levinson (1991). Las mismas se realizaron mediante la utilización de una cinta métrica, una regla de madera, de fabricación artesanal y un pie de rey.

3.4.2. Determinación de la altura de las plantas de pomelo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”.

Se realizaron las mediciones correspondientes tomando el suelo como base. Se empleó una escalera para subir hasta el punto más alto de la copa y dos reglas de madera de fabricación artesanal, una graduada y ubicada de manera vertical y la otra sin escala y situada desde la parte superior de la copa hasta la regla graduada con la utilización de un nivel de burbuja para descartar errores en las mediciones.

Los datos de las mediciones se sometieron a análisis de varianza para determinar la media y los estadígrafos de dispersión de esta variable mediante el programa Statgraphics, versión 5.1.

3.5. Determinación de los requerimientos hídricos del cultivo en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

Se calcularon los requerimientos hídricos del cultivo del pomelo con la utilización del programa CROPWAT, para el período 2000-2019, en Jagüey Grande. Se utilizó la ecuación de Pearson III (NC 48-75,1984) para determinar la probabilidad de ocurrencia de los mismos y se compararon con los del período 1980-1999 como línea base, calculados a partir de los valores de ETo según Solano *et al.* (2003) para este territorio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de las variables del clima en Jagüey Grande en el período 2000-2019 para el ajuste de los requerimientos hídricos del pomelo.

Para la evaluación de las variables del clima en Jagüey Grande se realizó la caracterización climática de la región teniendo en cuenta los criterios de Zamora y Chaterlán (2001), quienes plantearon que es necesario determinar las características esenciales de la evapotranspiración de referencia en Cuba, así como su relación con la evolución de las precipitaciones en cada región de estudio. Esto puede ser comparable en diferentes lugares e independiente del tipo de suelo o características de la agricultura, para aplicarlos a los estudios ambientales, y a las prácticas del riego y el drenaje.

4.1.1. Caracterización de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

Una vez realizado el cálculo de la ET_o mediante el programa CROPWAT y procesados los resultados en el programa Excel se analizaron los resultados obtenidos. Como se puede apreciar en la figura 7, los valores promedio de ET_o más bajos en el período evaluado 2,84 y 2,88 mm día⁻¹ corresponden a los meses de diciembre y enero respectivamente. Los valores de ET_o más altos se mostraron en los meses de abril 4,88 mm día⁻¹ y mayo 4,91 mm día⁻¹. El período de mayor demanda evaporativa de la atmósfera fue el comprendido entre los meses de abril y agosto con valores entre 4,58 y 4,91 mm día⁻¹.

Según Solano (2003) el periodo de ocurrencia de los valores medios diarios más altos de evapotranspiración de referencia, de la serie 1975-1999, en Jagüey Grande, transcurre de abril a agosto, con valores de 4,6 mm día⁻¹ en mayo, julio y agosto y un valor máximo en abril de 4,7 mm día⁻¹.

Resultados similares obtuvo Machado (2016) para la zona central del país, quien encontró valores máximos de ET_o en los meses de mayo y julio (4,7mm día⁻¹), igual período de máxima demanda entre abril y agosto (4,5-4,7mm día⁻¹), y los meses con valores más bajos diciembre y enero respectivamente 2,6 y 2,8 mm día⁻¹.

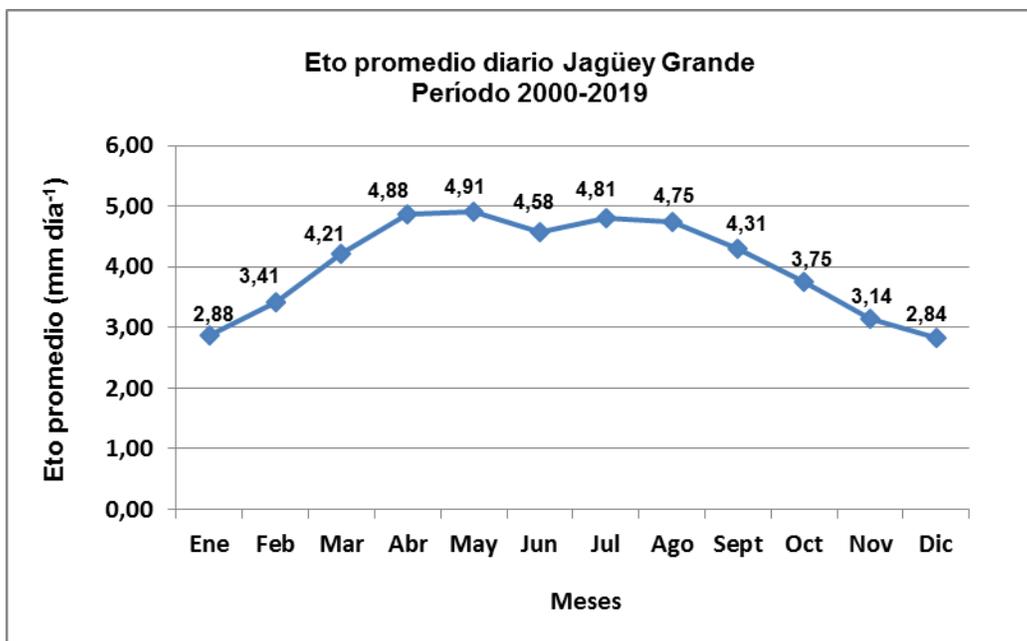


Figura 7. Evolución de la evapotranspiración de referencia (ETo) promedio de Jagüey Grande para el período 2000-2019.

Se aprecia que a partir del mes de abril se elevan los valores de ETo ya que es un mes de tránsito entre el período poco lluvioso y lluvioso en Cuba. Las lluvias frecuentes que comienzan a mediados y finales del mismo, garantizan la humedad del suelo. Además, a partir de este mes se registran los mayores valores de temperatura media del aire, factores que se combinan para propiciar condiciones favorables para los procesos de evaporación y transpiración de las plantas.

Los meses comprendidos entre noviembre y enero muestran los valores más bajos de ETo, estos coinciden con el inicio y mitad del periodo poco lluvioso del año (noviembre-febrero), siendo diciembre el mes de menor valor de precipitación. En este mes la posición del sol alcanza la máxima declinación al sur, lo que determina la ocurrencia de magnitudes más bajas de la radiación solar incidente y por tanto, una disminución de la tasa diaria de evapotranspiración de referencia (Solano *et al.*, 2003).

En la tabla 2 se puede apreciar que los valores promedio diarios más bajos de ETo para los meses de diciembre y enero se presentaron en los años 2000, 2001, 2003, 2008, 2010 y 2011 lo que representa el 31% de la serie analizada y los valores más elevados de ETo en los años 2000, 2002 y el período del 2008 al 2019, excepto 2012 y 2018, representados por el 60%. Se observa un incremento de la ETo, en los últimos años

analizados (2008-2019) para los meses de máxima demanda (abril y mayo) probablemente asociado a la variabilidad y cambio climático.

Resultados similares encontró Duarte *et al.* (2017, 2018 y 2020) al estudiar el comportamiento de esta variable climática, a futuro, para predecir las normas de riego de diferentes cultivos agrícolas.

Tabla 2. Resumen de la evapotranspiración de referencia promedio (mm día⁻¹) de Jagüey Grande para el período 2000-2019.

Mes	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Ene	3.04	2.67	3.04	2.63	2.85	2.83	2.91	3.06	2.79	2.92	2.61	2.84	2.84	3.06	2.94	2.92	2.72	2.85	2.75	3.30
Feb	3.21	3.49	3.41	3.37	3.40	3.33	3.30	3.42	3.55	3.28	3.04	3.82	3.46	3.55	3.62	3.30	3.30	3.52	3.77	4.13
Mar	4.17	4.18	4.37	4.08	4.10	4.25	4.22	4.17	4.31	3.96	3.84	4.25	4.33	4.08	4.31	4.49	4.41	4.29	4.34	5.09
Abr	4.75	4.87	5.04	4.88	4.81	4.72	4.93	4.84	4.85	4.76	4.65	5.16	4.28	4.99	5.00	5.15	5.07	5.01	4.81	5.55
May	5.26	4.19	5.20	4.90	4.87	4.87	4.81	4.59	5.22	4.93	5.15	5.17	4.66	4.79	4.93	4.87	4.96	4.96	4.40	5.57
Jun	4.95	4.71	4.70	4.62	4.83	4.11	4.57	4.29	4.73	4.38	5.50	4.29	4.27	4.48	4.58	4.48	4.48	4.53	4.36	5.17
Jul	5.15	4.60	5.10	4.82	4.82	4.77	4.82	5.03	4.92	5.02	4.55	4.64	4.61	4.59	4.89	4.83	4.73	4.65	4.65	5.13
Ago	4.82	4.77	5.19	4.85	4.81	4.60	4.82	4.66	4.79	4.83	4.54	4.55	4.47	4.62	4.84	4.97	4.64	4.75	4.50	4.87
Sept	4.42	4.35	4.21	4.54	4.51	4.30	4.55	4.31	4.50	4.48	4.22	4.36	4.04	4.07	4.35	4.19	4.11	3.99	4.15	4.76
Oct	3.87	3.93	3.89	4.12	4.00	3.58	3.74	3.94	3.66	3.71	3.63	3.46	3.56	3.66	3.83	3.77	3.64	3.55	3.60	4.19
Nov	3.30	3.15	3.37	3.28	3.26	3.18	3.14	3.02	2.84	3.27	3.13	3.01	2.91	3.20	3.19	3.20	3.03	2.98	3.05	4.05
Dic	2.61	2.96	3.12	2.80	2.80	2.84	2.93	2.87	2.68	3.01	2.48	2.68	2.82	2.98	2.85	2.99	3.00	2.61	2.82	3.73

4.1.2. Relación entre la evapotranspiración de referencia (ET_o) y las temperaturas en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

Como se expuso anteriormente la ET_o depende de la radiación solar, la temperatura máxima y mínima del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. Al estudiar su relación con estas variables climáticas se observó que la temperatura máxima tuvo una marcada influencia en su comportamiento. En la figura 8, se puede apreciar que el período de valores más elevados de ET_o, comprendido entre los meses de abril y agosto (138,0-147,5 mm mes⁻¹), se correspondió con el de mayores valores de temperaturas medias máximas (30,9°C-33,3°C).

De igual manera el valor más bajo de ET_o (86,4 mm mes⁻¹) correspondiente a los meses de diciembre y enero, coincidió con las temperaturas máximas más bajas (27,8 y 28,7°C).

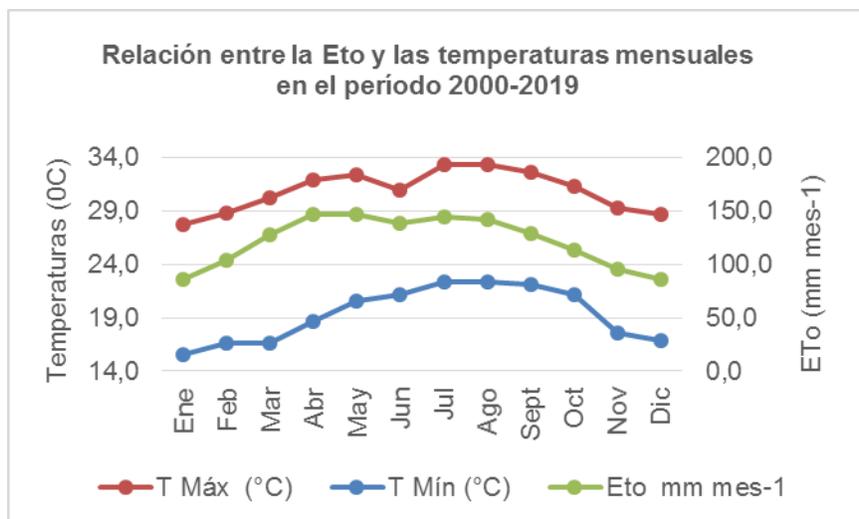


Figura 8. Relación entre la evapotranspiración de referencia (ETo) y las temperaturas en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

La relación entre la evapotranspiración de referencia y la temperatura máxima promedio como una de las variables que mayor influencia tuvo en su cálculo según la serie estudiada, se ajustó a una ecuación de regresión lineal $ETo = 0,0716T + 22,168$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,79$ (Figura 9), lo cual es indicativo del ajuste entre ambas variables.

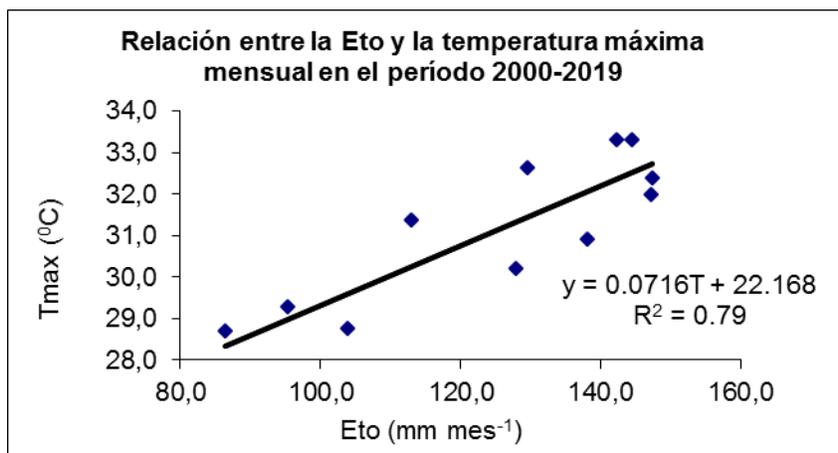


Figura 9. Relación entre la evapotranspiración de referencia (ETo) y las temperaturas máximas en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

4.1.3 Relación entre la evapotranspiración de referencia (ET_o) y las precipitaciones en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

Al analizar la relación entre la ET_o y las precipitaciones (Figura 10) se observa, que el promedio de aportes naturales en los meses de mayo a octubre supera la pérdida por demanda climática. En este período se precipitan, 1 352 mm, lo que representa el 85% del total anual, mientras que por concepto de evapotranspiración la demanda es de 815 mm.

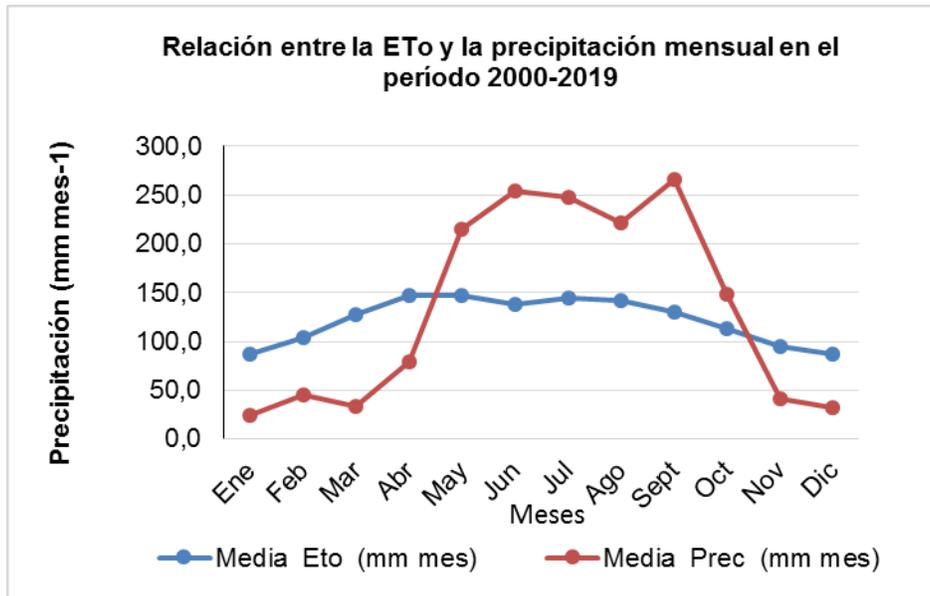


Figura 10. Relación entre la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones mensuales en el período 2000-2019.

En éste estudio se analizó que existe coincidencia para el 85% en los meses evaluados anteriormente en la serie 2000-2019, por lo que no se recomienda establecer el riego en estos meses a las plantaciones de pomelo en la región. Acosta y Paretas (2011), plantearon, que las precipitaciones en Cuba pese a su variabilidad espacio-temporal, presentan una distribución estacional de 75-80% en los meses de mayo-octubre y solo de 20-25% desde noviembre hasta abril.

También el promedio anual de precipitaciones es superior al de ET_o, presentándose valores de 1 607 y 1 462 mm respectivamente. El valor más bajo de ET_o, reflejado en

los meses de diciembre y enero ($86,4 \text{ mm mes}^{-1}$), coincide con los registros más discretos de precipitaciones 24,2 mm en enero y 31,9 mm en diciembre.

4.1.4. Caracterización de la precipitación efectiva promedio en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

El contenido de humedad en el suelo está en estrecha vinculación con el volumen de precipitaciones totales ocurridas en el periodo que se analiza. En la figura 11, se presenta la altura de la lámina de lluvia acumulada promedio en la región de Jagüey Grande para el período de estudio, con sus correspondientes valores de precipitación efectiva.

Como se puede apreciar, la precipitación total presenta sus valores máximos en junio y septiembre, 253,9 y 266,1mm respectivamente y los mínimos en enero con 24,2 mm y diciembre 31,9 mm en toda la serie climática estudiada. Existe correspondencia entre los valores de precipitación total y los aprovechados, calculados a partir del método empleado, ya que a estos máximos corresponden 138,8 y 141,1 mm de lluvia efectiva y a los mínimos les pertenecen registros de 24,4 y 30,0 mm.

Precisamente en los meses que pertenecen al período lluvioso (mayo-octubre) se alcanzan las mayores diferencias entre los valores totales y los efectivos de precipitación, donde el suelo no puede retener toda el agua que precipita y esta se pierde por infiltración o esorrentía con la posibilidad de que exista la tendencia a la disminución de la efectividad de la lluvia. En los meses iniciales y finales del año las diferencias son pequeñas evidenciando un máximo aprovechamiento de la lluvia.

Machado *et al.* (2016) obtuvo resultados similares para la región central del país con registros máximos de precipitación efectiva en junio y septiembre de 137,9 y 140,4 mm y registros mínimos en enero y febrero de 29,6 y 31,0 mm.

En Cuba, la lluvia es la variable meteorológica de interés agrícola de mayor variabilidad cuando se analizan largas series cronológicas. A partir de los años setenta, del pasado siglo, el cambio climático ha contribuido a la aparición de años con características extremas para la mayoría de los factores del clima. En este sentido, se destacan años muy secos y también otros muy lluviosos que dificultan el cultivo de especies vegetales (Machado *et al.*, 2016).

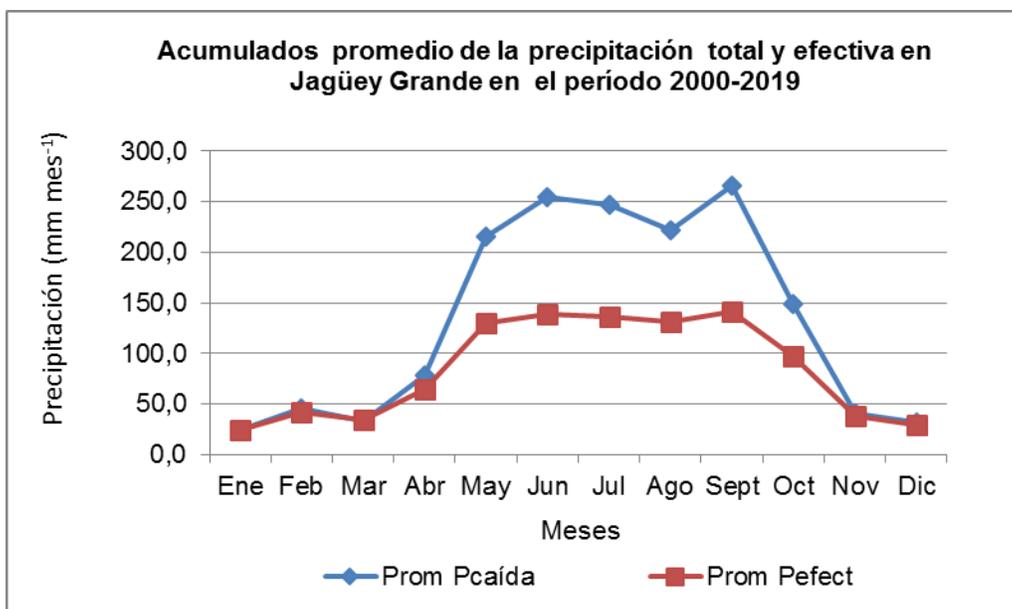


Figura 11. Acumulados promedios mensuales de la precipitación total y efectiva en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

4.1.5. Relación entre la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la precipitación efectiva en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

Después de haber analizado el comportamiento la evapotranspiración de referencia (ETo) y las precipitaciones en Jagüey Grande se procedió a comparar la relación entre la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la precipitación efectiva, calculadas por el programa CROPWAT.

En la figura 12, se puede apreciar que el promedio de aportes naturales que se almacena en el suelo, en el período lluvioso (mayo-octubre), es superior a la demanda del cultivo, coincidiendo con la recomendación de la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” de no regar en éste período. El agua aprovechada por las plantas alcanza un valor de 775,0 mm, superando en 241,0 mm a los requerimientos del cultivo (534,0 mm). Del mismo modo, el promedio anual de la demanda del cultivo (938,0 mm) es inferior a la precipitación efectiva (1 009,0 mm). Sin embargo, en el período seco (noviembre-abril), la evapotranspiración del cultivo (404 mm) supera en 170 mm a la lluvia aprovechable (234 mm) lo que indica la necesidad de un suministro adicional de agua mediante el riego.

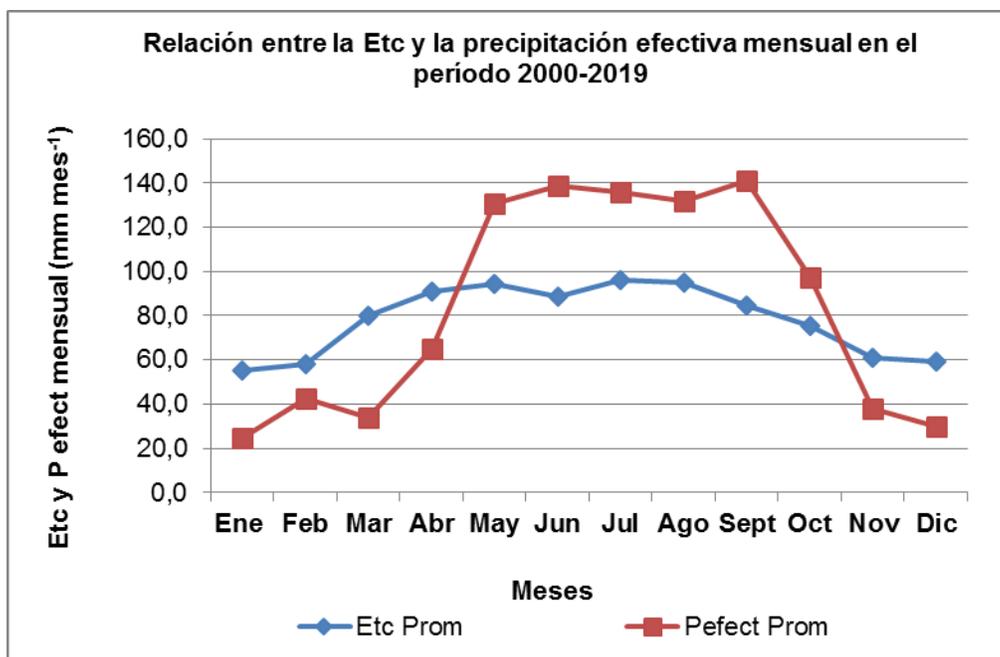


Figura 12. Relación entre la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva mensual en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

4.2. Determinación del crecimiento vertical del sistema radical activo del pomelo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”.

En esta investigación se estudió el crecimiento vertical del sistema radical activo del pomelo (*Citrus paradisi* Macf.), como información necesaria para el ajuste de las necesidades hídricas de dicho cultivar en las condiciones de Jagüey Grande.

Los resultados muestran un escaso desarrollo del sistema radical activo, apreciándose pocas raíces con diámetro inferior o igual a 3 mm (figura 13) lo que pudiera estar asociado a la incidencia de la enfermedad conocida como HLB o Huanglongbing de los cítricos, la que provoca bloqueos del floema y restringe el desarrollo del sistema radical de las plantas (Achor *et al.*, 2017).

Es válido señalar que en la citricultura en Jagüey Grande, y en Cuba en sentido general, las plantaciones cuando alcanzan la edad productiva presentan síntomas visuales asociados a la incidencia de esta enfermedad de alto impacto, tales como los descritos por Bové (2017) y Graham *et al.* (2017). Todas las especies de cultivares y patrones cítricos son susceptibles a esta enfermedad (Roose, 2017; Cueto *et al.*, 2017).

Por estos motivos, el estudio se limitó a medir la profundidad máxima que alcanzaban las raíces menores de 3 mm de diámetro, para garantizar el humedecimiento de toda la capa de raíces activas del cultivo.



Figura 13. Crecimiento del sistema radical del pomelo 'Marsh' injertado sobre patrón *Volkameriana* al décimo año de la plantación.

En la figura 14, se observan las longitudes máximas encontradas en las evaluaciones realizadas. Como se puede apreciar las mismas se encuentran en un rango entre 0,38 y 0,46 m de profundidad con una media de 0,42 m, una desviación estándar de 0,04 y un coeficiente de variación de 8,42%, lo que es indicativo de poca variabilidad en los resultados. Por esta razón se decidió utilizar el valor máximo (0,46 m) para calcular los requerimientos hídricos del pomelo, mediante el programa cropwat.

Bosh *et al.* (1998) en una investigación realizada en pomelo Ruby Red de 14 años de edad, injertado sobre naranjo Agrio (*Citrus aurantium* L.) y con una distancia de siembra de 10x5m, en la empresa de cítricos Ceiba, en un suelo Ferralítico Rojo típico y regada por aspersión, encontraron la presencia de abundantes raíces activas en todo el perfil del suelo, hasta los 75 cm de profundidad.

Toledo y Cárdenas (1980) en un estudio llevado a cabo en naranja 'Valencia' (*Citrus sinensis* L. Osbeck), injertado sobre naranjo 'Agrio' en un suelo Ferralítico Rojo de Jagüey Grande, con una distancia de plantación de 8x4m y regada por aspersión,

determinaron que más del 90% de las raíces activas se encontraban hasta 0,60 m de profundidad.

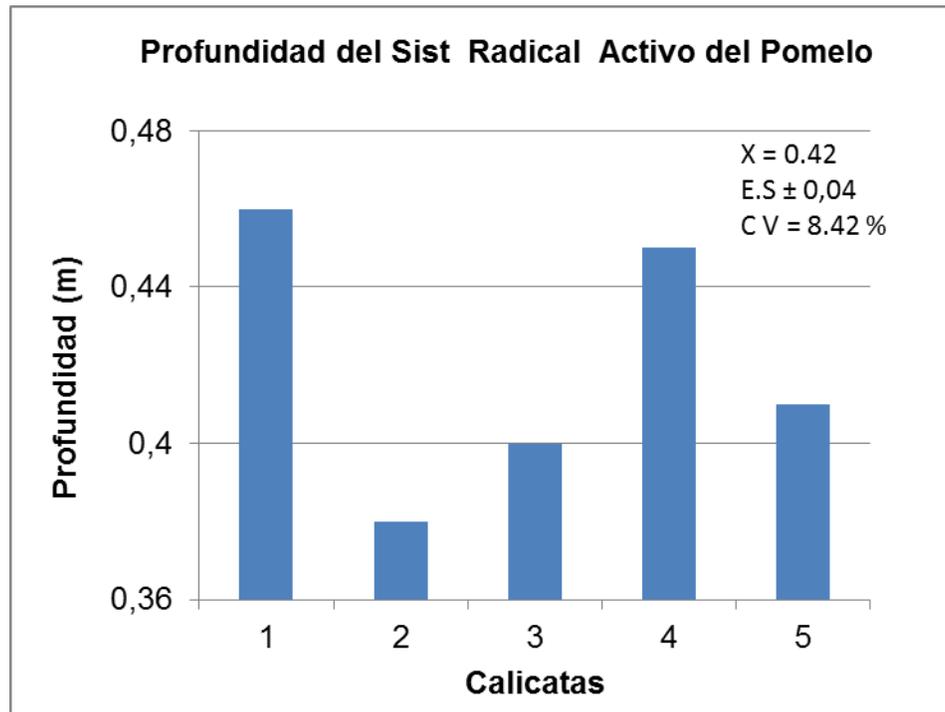


Figura 14. Profundidad del sistema radical activo del pomelo 'Marsh' injertado sobre patrón *Volkameriana* a los 10 años de edad.

El desarrollo del sistema radical de los cítricos depende en gran medida de diversos factores como el tipo de suelo, la distancia de plantación, la combinación cultivar patrón empleada, la técnica de riego, entre otras labores agrotécnicas realizadas al cultivo.

La emergencia de enfermedades de alto impacto acontecida en las últimas décadas ha propiciado el uso de marcos de siembra menos espaciados y la utilización de patrones tolerantes a dichas enfermedades que en sentido general proporcionan menos vigor al sistema radical de las plantas cítricas. Además, el empleo de técnicas de riego localizado por goteo como medida para garantizar el uso eficiente del agua y la energía, también limita el crecimiento de las raíces de los cítricos.

4.3. Determinación de la altura de las plantas de pomelo en la Empresa Agroindustrial "Victoria de Girón".

La altura de las plantas es un dato de entrada del módulo cultivo del programa CROPWAT que aunque es un dato opcional, para Cuba es indispensable tenerlo en

cuenta. En este estudio se determinó la altura promedio de las plantas de pomelo 'Marsh' para ajustar las necesidades hídricas de dicho cultivar en las condiciones de Jagüey Grande.

Como se observa en la figura 15, la altura de las plantas osciló entre 3,25 y 3,64 m, con una media aritmética de 3,5 m. Se encontró poca variabilidad en las evaluaciones realizadas con un coeficiente de variación de 2,29% y una desviación estándar de 0,08.

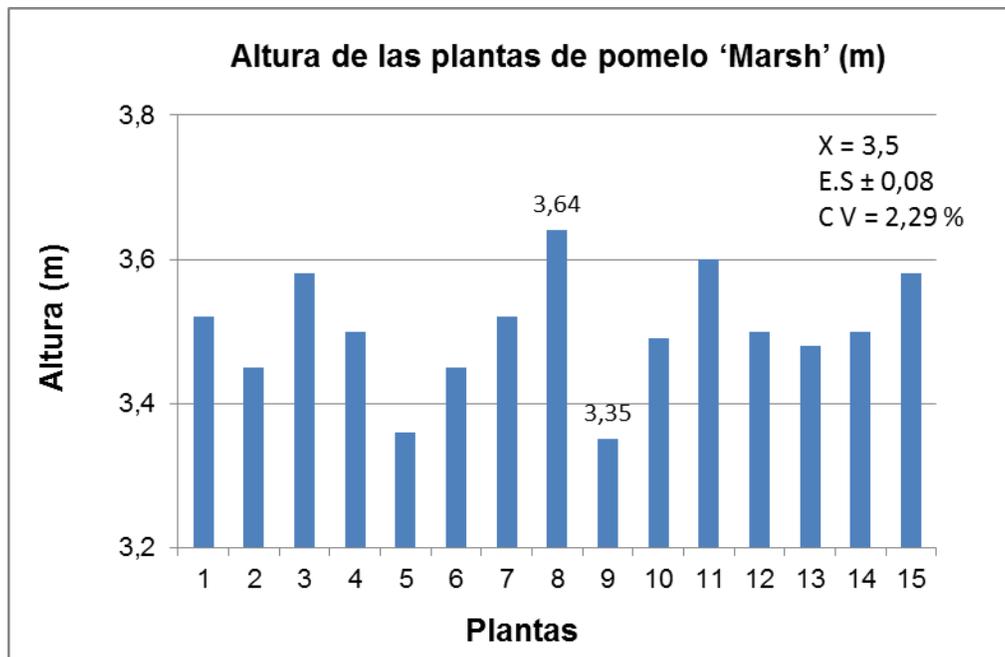


Figura 15. Altura de las plantas del pomelo 'Marsh' injertado sobre patrón *Volkameriana* los ocho años de edad.

La altura promedio no coincide con determinada por Rodríguez (1988), cuyo valor fue de 4,2 m para esta variedad en un suelo Ferralítico Rojo de Jagüey Grande, con una distancia de plantación de 8x5m y regada por aspersión.

Bello (1991) encontró, una altura promedio de 4,6 m para el mismo cultivar en una plantación establecida en la misma área de estudio, (T-5, UEB No 1), de nueve años de edad, sobre patrón *Cleopatra*, plantada a una distancia de 10x5m y regada por aspersión, que aunque coincide con una plantación anterior en la misma área, no concuerdan con los resultados encontrados.

Aranguren *et al.* (2017) determinaron en plantaciones de pomelo de nueve años, sobre patrón *Cleopatra*, regada por goteo y con una distancia de siembra de 8x2,5m los

siguientes valores de altura para distintos cultivares: 'Marsh Jibarito' 2,6 m, Ruby Red 3,4 m y Star Ruby 3,0 m. Estos valores son similares a los encontrados en ésta investigación.

Como se puede observar este parámetro del crecimiento de las plantas varía en dependencia de los marcos de siembra, la técnica de riego, el patrón y el cultivar empleados, entre otros factores de manejo de la plantación. Por esta razón, se utilizaron en esta investigación la combinación de éstos parámetros más representativos para el cultivo del pomelo en la empresa.

4.4. Determinación de los requerimientos hídricos del cultivo del pomelo en Jagüey Grande en el período 2000-2019.

Como se expresó en otro momento, el régimen de riego establecido para el cultivo del pomelo en la Empresa Agroindustrial "Victoria de Girón" data de finales de la década del 80 del pasado siglo. Esto indica que los requerimientos hídricos o evapotranspiración del cultivo utilizados para el cálculo de las necesidades de riego respondían a las exigencias climáticas y del cultivo de esa época. En esta investigación se demuestra la diferencia que existe en relación con la actualidad.

En la figura 16, se observa el comportamiento de los requerimientos hídricos anuales estimados del cultivo para el período 2000-2019, obtenidos con el empleo de la herramienta CROPWAT, los mismos oscilan entre un mínimo de 966,0 mm en el año 2012 y un máximo de 1 090,0 mm en el 2019 con una media anual de 1 017,0 mm.

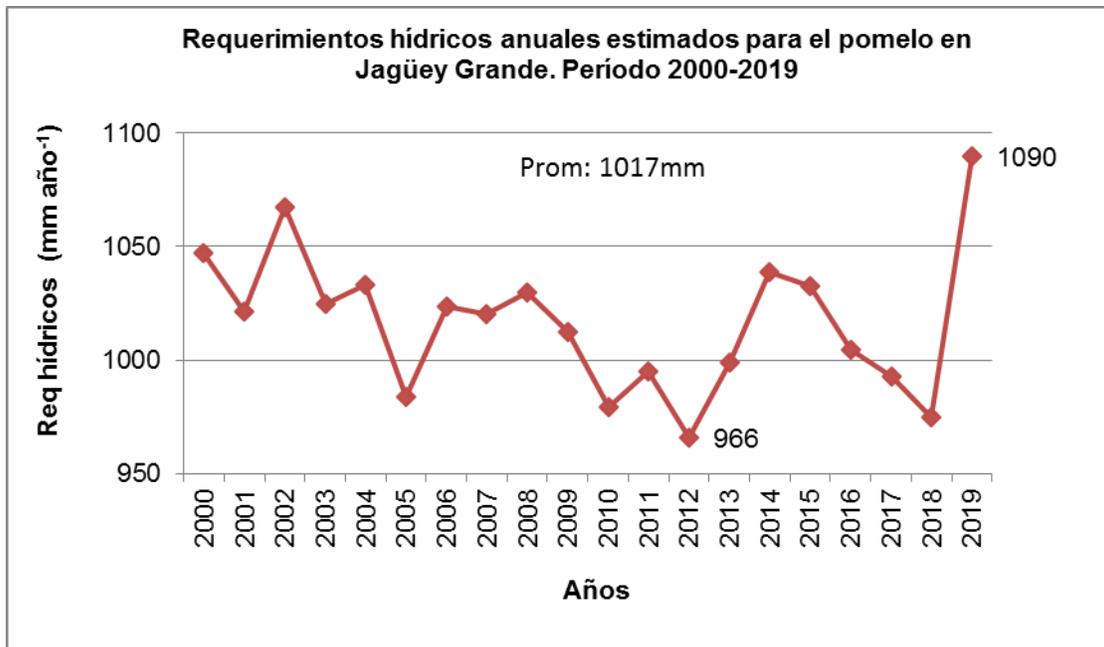


Figura 16. Requerimientos hídricos anuales estimados para el cultivo del pomelo en Jagüey Grande en el período 2000-2019 según CROPWAT.

Resultados similares encontraron Orduz y Fischer (2007), quienes obtuvieron, en árboles adultos de mandarina ‘Arrayana’ de seis años de edad, en el piedemonte del Meta en Colombia, bajo condiciones climáticas tropicales, requerimientos hídricos anuales de 1 046,0 mm. En esta investigación se tomaron coeficientes de cultivo (Kc) de 0,75 para los meses húmedos y 0,80 para los meses secos.

De la Fuente (2007), obtuvo requerimientos de volúmenes de agua de riego para huertas de cítricos en producción, de 1 063,0 mm al año, en la región centro de Nuevo León, México, con condiciones de clima tropical y una altura de 15 msnm. Los Kc utilizados en este estudio oscilaron entre 0,65 y 0,75.

Los resultados de estas investigaciones muestran cantidades anuales de agua semejantes a los 1 000,0 mm, reportados por Koo (1963), para la toronja en condiciones de la Florida Estados Unidos.

Al comparar los requerimientos hídricos estimados para este período con igual número de años precedentes (1980-1999), según la evapotranspiración de referencia reportada por Solano, 2003 para esta región, se pudo constatar que en los últimos 20 años (2000-2019) la demanda del cultivo fue superior debido al incremento de la evapotranspiración

de referencia en el territorio ya que los coeficientes del cultivo utilizados en ambos casos fueron los mismos.

Los requerimientos hídricos del período 1980-1999 oscilaron entre un mínimo de 887,0 mm y un máximo de 1029,0 mm con una media anual de 984,0 mm (Figura 17), la que es inferior en 33,0 mm a la del período 2000-2019. Los valores mínimos y máximos de demanda del cultivo en el primer período también estuvieron por debajo de los encontrados en la última etapa, con una diferencia de 79 y 61 mm respectivamente.

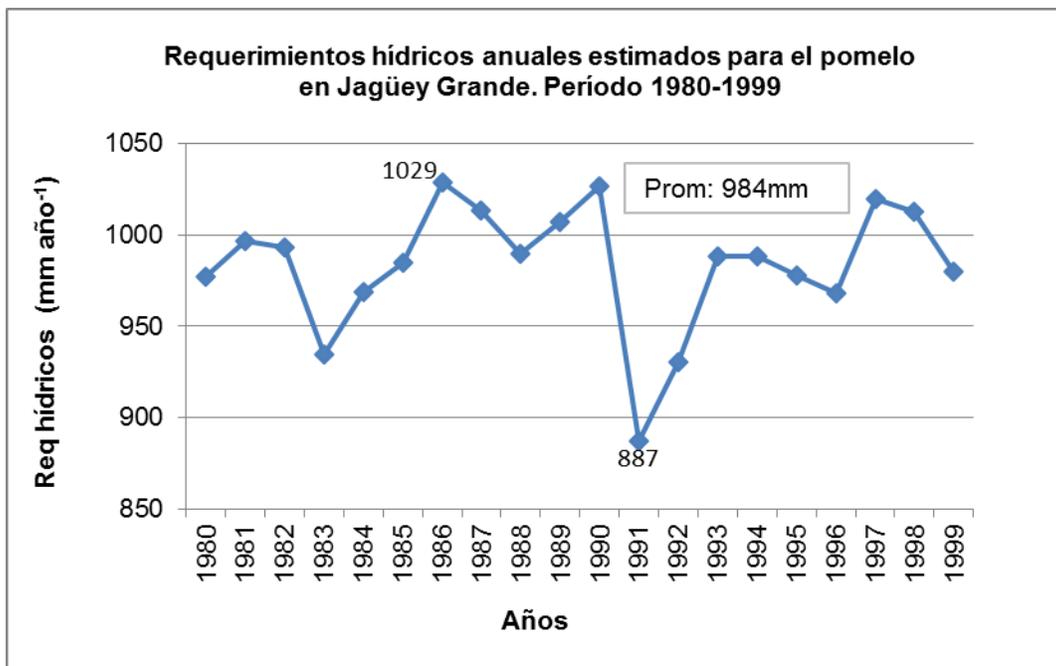


Figura 17. Requerimientos hídricos anuales estimados para el cultivo del pomelo en Jagüey Grande en el período 1980-1999.

Este análisis coincide con lo planteado por varios autores quienes aseguran que el clima, como consecuencia del cambio climático global, está sufriendo modificaciones que apuntan hacia el incremento de las temperaturas y disminución de las precipitaciones lo que conlleva al aumento de la evapotranspiración de referencia y por consiguiente a un incremento de la demanda hídrica de los cultivos (Álvarez *et al.*, 2015; Verdecia, 2016; Valdés, 2017; Duarte *et al.*, 2017, 2018, 2020).

En la figura 18 se puede apreciar que aun cuando los requerimientos hídricos promedios de la serie evaluada desde el año 2000 hasta 2019 son de 1 017,0 mm anuales, se recomienda utilizar para la programación de riego del pomelo en Jagüey

Grande 1 033,0 mm, los que se corresponden con el 25% de probabilidad de ocurrencia.



Figura 18. Probabilidad acumulada de ocurrencia de los requerimientos hídricos del pomelo en la serie 2000-2019.

Esto explica que el cultivo del pomelo se podrá planificar el riego utilizando estos requerimientos en cuatro, de cada cinco años climáticos, sin provocar afectaciones. La evaluación de probabilidad se ajustó a una ecuación lineal ($RH = -0,8702P+1058,7$) y con coeficiente de determinación de $R^2 = 0,96$.

5. CONCLUSIONES

1. Los valores promedio de ETo más bajos en Jagüey Grande corresponden a los meses de diciembre y enero con 2,84 y 2,88 mm día⁻¹ respectivamente, mientras que los más altos se mostraron en los meses de abril (4,88 mm día⁻¹) y mayo (4,91 mm día⁻¹).
2. En el período lluvioso las precipitaciones alcanzan un valor de 1 352 mm, lo que representa el 85% del total anual (1 607 mm), superando en 467 mm a la demanda climática por concepto de evapotranspiración (815 mm)
3. En el pomelo 'Marsh' prevalece un escaso desarrollo del sistema radical activo con una profundidad media de 0,42 m y la altura promedio de las plantas es de 3,5 m.
4. Los requerimientos hídricos del cultivo en el período de estudio oscilaron entre un mínimo de 966,0 mm y un máximo de 1 090,0 mm con una media anual de 1017,0 mm y una probabilidad de ocurrencia del 25% correspondiente a 1 033 mm.

6. RECOMENDACIONES

1. Emplear los requerimientos hídricos obtenidos como resultado de esta investigación en la determinación y validación de las nuevas normas netas a utilizar en la programación de riego del cultivo del pomelo para las condiciones de Jagüey Grande.
2. Utilizar los resultados de ésta tesis como material de estudio docente y del personal de investigación dedicado a la adaptación al cambio climático en el sector agropecuario.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Achor, D. S.; Etxeberria, E.; Wang, N.; Folimonova, S. Y.; Chung, K. R. y Albrigo, L. G. 2017. Sequence of anatomical symptom observations in citrus affected with huanglongbing disease”. *Journal Plant Pathol.* 9: 56-64.
2. Acosta, R y Paretas, J. J. 2011. *Incendios Forestales*. La Habana: Editorial Científico-Técnica.
3. Adato, Y y Levinson, B. 1991. Influence of Reduced Rates of Water and Fertilizer Application Using Intermittent Drip Irrigation on the Water Requirements. Root Development and Responses of Avocado Trees (cv. Fuerte). *Journal of Horticultural Science* 66(4): 449-463.
4. Agro Fresh. 2021. Cítricos 2020: Un gran año gracias a la pandemia [en línea]. Disponible en: <http://www.portalfruticola.com>. [Consulta: octubre, 19, 2021].
5. Agustí, M. 1998. Factores pre cosecha que afectan a la calidad de los frutos cítricos. Factores medio ambientales. *Todo Citrus*. Abril/Junio: 22-34.
6. Agustí, M. 2003. *Citricultura*. 2^{da} Edición, Mundi-Prensa. Madrid, España. 422 p.
7. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy.
8. 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*, Ed. FAO Riego y Drenaje, Roma. Italia.
9. Anaya, B.; Deere, C. A.; Fernández, E.; García, A.; González, G.; Muiño, B. L.; Nova, A y Royce, F.S. 2016. *Conviviendo con el HLB: la diversificación de la industria cítrica en Cuba*. Working Paper No 4, July 2016. Cuba-US Agricultural Research Working Paper Series. Center for Latin American Studies and Institute for Food & Agricultural Sciences, University of Florida. 27 p.
10. Aranguren, M. 2009. *Pronósticos de madurez y otras especificaciones de calidad para el ordenamiento de la cosecha en los cítricos de Jagüey Grande*. Ciudad Habana. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. Ministerio de la Agricultura.

11. Aranguren, M. 2017. Evaluación de los Pomelos Pigmentados en Jagüey Grande en plantaciones afectadas con Huanglongbing. Informe de Servicio a Empresa. Disponible en: Dirección de Desarrollo de la Empresa Agroindustrial "Victoria de Girón". 15 p.
12. Ballester, C.; Castel, J. R. y Intrigliolo, D. S. 2011. Response of `Clementina de Nules` citrus trees to summer deficit irrigation. Yield components and fruit composition". *Agricultural Water Management*. 98: 1027-1032.
13. Bello, L. 1990. Comportamiento agrícola de variedades de cítricos en Jagüey Grande. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. Ministerio de la Agricultura.
14. Betancourt, M.; García, M. E.; Castro, T.; Pérez, Y.; Mesejo, C.; Martínez, A.; Noriega, C.; Oliva, H. y Agustí, M. 2006. Influencia de la temperatura y la humedad del suelo sobre la época de recolección del pomelo (*Citrus paradisi* Macf.) cultivado en condiciones de clima tropical húmedo. *Levante Agrícola*. 3^{er} trimestre.
15. Bosch, D.; Paneque, J.; Castellanos, N.; Peña, O.; Fuentes, E. y Salazar, A. 1998. Estudio del sistema radicular de los cítricos para la implantación del sistema de riego en plantaciones de la empresa de cítricos "Ceiba". Informe Técnico. Disponible en: Biblioteca Unidad Científico Tecnológica de Base Jagüey Grande.
16. Bové, J. M. 2017. 'Huanglongbing or yellow shoot, a disease of Gondwanan origin: Will it destroy citrus worldwide? *Phytoparasitica*. 42(5): 579-583.
17. Brouwer, C.; Goffeau, A. y Heibloem, M. 1987. Manejo del agua de riego. Manual de campo No1. Introducción al riego. Roma.
18. Casamayor, R. 2018. Aspectos epidemiológicos y de manejo de la mancha negra de los cítricos en Jagüey Grande. Tesis en opción al Título de Especialista en Fruticultura Tropical. Universidad de Matanzas.
19. Chaterlán, Y. 2007. Coeficientes de cultivo de la cebolla y su determinación con el modelo ISAREG. Taller Internacional: Modernización de Riegos y Uso de Tecnologías de Información. La Paz, Bolivia.
20. Chaterlán, Y. 2012. Precisión en la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos de ajo y cebolla en las condiciones edafoclimáticas del sur de Artemisa. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, La Habana, Cuba.

21. Cigales, M. y Pérez, O. 2011. Variabilidad de suelos y requerimiento hídrico del cultivo de banano en una localidad del Pacífico de México. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 15(3): 21-31.
22. Cob, A. 2004. Necesidades hídricas en cultivos hortícolas, *Horticultura*. (2): 34-40.
23. Cofructo. 2017. Requerimientos hídricos del cultivo de los cítricos [en línea] Disponible en: <http://www.frutas/proveda.com>. [Consulta: abril, 20 2020].
24. Cruz, A. M. 2014. Agricultura cubana y cambio climático: ¿Coexistencia Imposible? , *Cubahora*, (1): 23-32.
25. Cueto, J. R. 2009. Hacia una nueva citricultura en Cuba. Jornada de la Citricultura. Conferencia. Empresa de Cítricos Ceiba.
26. Cueto, J. R.; Sosa, G.; Rodríguez, K. y Riaño, R. 2017. Propuesta de estructura de especies y cultivares para el ciclo 2015-2020 en la citricultura cubana. *Citrifrut*. 32(2): 56-63.
27. Davies, F. F. y Albrigo, L. G. 1994. *Citrus*. CAB International, Walling Ford, Oxon, UK. 254 p.
28. De La Fuente, H. 2007. Manejo del agua y fertirrigación en cítricos. En: Rocha y Padrón. *El cultivo de los cítricos en el estado de Nuevo León*. México, Nuevo León. p. 119-155.
29. De La Rosa, J. M.; Gómez, J. y Pérez, A. 2015. Implementing deficit irrigation scheduling through plant water stress indicators in early nectarine trees. *Agricultural Water Management*. 152: 207-216.
30. Dell'Amico, J. M.; Domingo, R.; Pérez, A.; García, M.; Peñalver, M.; Villanueva, F. y Puerto, P. 2012. Efecto del estrés hídrico en el desarrollo final del fruto de mandarina 'Fortune'. *Cultivos Tropicales*. 33(3): 63-68.
31. Duarte, C. E.; Herrera, P. J. y Zamora, E. 2017. Predicción de las normas netas de riego a futuro en el pronóstico de Riego. *Ingeniería Agrícola*. 7(3): 3-10.
32. Duarte, C. E.; Valdés, P. J.; Herrera, P.J. y Zamora, E. 2018. Predicción de las normas netas de riego del frijol común en la zona occidental de Cuba. *Ingeniería Agrícola*. 8(2): 41-47.

33. Duarte, C. E.; Utria, B. E.; Herrera, P. J. y Zamora, E. 2020. Modelación de las normas netas de riego de la papa según variabilidad climática. *Ingeniería Agrícola*. 10(1): 8-12.
34. Elizastigue, Y. 2018. Evaluación de la lluvia efectiva con diferentes métodos empíricos. Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico. Universidad Tecnológica de La Habana.
35. Ezatollah, K. y Marzieh, K. 2018 Climate change and agriculture: Impacts and adaptative responses in Iran, *Journal of integrative agriculture*.
36. FAO. 1974. Precipitación efectiva en la agricultura de regadío. Roma, Italia. 75 p.
37. FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Ed. FAO Riego y Drenaje, FAO, No. 56. Roma, Italia. 322 p.
38. FAOSTAT. 2011 Datos provisionales de producción [en línea] Disponible en: faostat.fao.org/faostat. [Consulta: septiembre, 16 2020].
39. Figueredo, C. 2018. Susceptibilidad de tres accesiones de mandarinas a diferentes enfermedades fungosas. Tesis en opción al título de Especialista en Fruticultura Tropical. Universidad de Matanzas.
40. Garzón, D. L. 2012 Evaluación de la influencia del déficit hídrico en el crecimiento y desarrollo de la naranja "Valencia" (*Citrus sinensis* L. Osb.) en el pie de monte llanero de Colombia. Tesis en opción al título de Master. Universidad Nacional de Colombia.
41. Giles, F. 2017. Lo que sabemos ahora sobre nutrición de cítricos [en línea]. Disponible en: <http://www.growingproduce.com> [Consulta: abril, 15 2020].
42. Gómez, A. 2017. Conferencia sobre enfermedades fungosas en los cítricos. Curso Maestría en Fruticultura Tropical. IIFT. La Habana, Cuba. 23 p.
43. Graham, J. H.; Johnson, E. G.; Gottwald, T. R. y Irey, M. S. 2017. Presymptomatic fibrous root decline in citrus trees caused by Huanglongbing and potential interaction with *Phytophthora* sp'. *Plant disease*. 97: 1195-1199.
44. Gutiérrez, J. M.; San-Martín, D.; Herrera, S.; Fernández, J. y Pons, M. R. 2014. Escenarios Regionales de Cambio Climático en Cantabria, Santander [en línea]. Disponible en: <http://www.meteo.unican.es/es/project>. [Consulta: octubre, 18 2020]

45. Hernández, A.; Ascanio, M.; Cabrera, A.; Morales, M. y Medina, N. 2004. Correlación de la nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba con World Reference Base. Conferencia en Postgrado de Clasificación de suelo. 14 p.
46. Hernández, N.; Soto, F. y Caballero, A. 2009. Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. Cultivos Tropicales. 30(1): 37-43.
47. Iglesias, E. 2006. Informe técnico. Datos para tesis de grado en riego y drenaje. Disponible en: Dirección de Producción de la Empresa Agroindustrial "Victoria de Girón". 5 p.
48. Iñiguez, M.; Ojeda, W. y Díaz, C. 2015. La infraestructura hidroagrícola ante escenarios del cambio climático. Tecnología y Ciencias del Agua. 6(5): 89-101.
49. Kolesnikov, V. 1972. Metodología para el estudio del sistema radicular de las plantas frutales y de las bayas en el laboratorio y campo. Centro de Información Científico Técnica. Universidad de Matanzas. p. 9 - 40.
50. Koo, R. C. J. 1963. Effects of frequency of irrigation on yield of orange and grapefruit. Proc. Florida State Hort. Soc. 76: 1-5.
51. Lima, H.; Cornide, M. T.; Alvarez, M. y Frómata, E. 1998. Clasificación edafoclimática de las localidades cítricas en Cuba. Agrotecnia de Cuba. 20(2): 63-74.
52. López, T.; Dueñas, G.; Sierra, J.; Ozier, H.; González, F.; Giralt, E.; Chaterlán, Y. y Cid, G. 2001. Simulación del manejo del riego y la fertilización nitrogenada del maíz sobre suelo Ferralítico del sur de La Habana". Ciencias Técnicas Agropecuarias. 10(3): 59-66.
53. Machado, Y. 2016. Caracterización de la evapotranspiración de referencia estimada y predicha para su inserción en la programación de riego. Santa Clara. Tesis en opción al título de Master en Agricultura Sostenible. Universidad Central de Las Villas.
54. Malek, K.; Adam, J. C.; Stöckle, C. O. y Peters, R. T. 2018. Climate change reduces water availability for agriculture by decreasing non-evaporative irrigation losses. Journal of Hydrology. 561: 444-460.
55. MINAG. 1990. Instructivo técnico para el cultivo y beneficio de los cítricos, Tomo I. La Habana, Cuba. 251 p.
56. MINAG. 2011. Instructivo técnico para el cultivo de los cítricos. La Habana, Cuba. 42 p.

57. MINAG. 2018. Programa de Desarrollo de la citricultura Cubana. La Habana, Cuba. 58 p.
58. MINAG. 2018. Balance nacional de áreas bajo Riego. La Habana, Cuba. 45 p.
59. Morales, A. 2016. Alternativas para el control de la Pudrición del Pie de los Cítricos en Jagüey Grande. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Matanzas.
60. Oña, C. 2019. Evaluación de la lluvia efectiva a partir del balance hídrico bajo diferentes condiciones de manejo del suelo. Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico. Universidad Tecnológica de La Habana.
61. Orduz, J. y Fischer, G. 2007. Balance hídrico e influencia del estrés hídrico en la inducción y desarrollo floral de la mandarina 'Arrayana' en el pie de monte llanero de Colombia". *Agronomía Colombiana*. 25(2): 255-263.
62. Pérez-Pérez, J. G.; Robles, J. M. y Botía, P. 2010. Economic analysis of navel orange cv. 'Lane late' grown on two different drought-tolerant rootstocks under deficit irrigation in South-eastern Spain". *Agricultural Water Management*. 97: 157-164.
63. Pérez-Pérez, J. G.; Robles, J. M. y Botía, P. 2014. Effects of deficit irrigation in different fruit growth stages on "Star Ruby" grapefruit trees in semi-arid conditions". *Agricultural Water Management*. 133: 44–54.
64. Planos, E. 2014. Síntesis informativa sobre impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba. Ed. AMA, La Habana, Cuba.
65. Procolombia, 2021. El mercado de cítricos en el mundo. Informe [en línea]. Disponible en: <http://www.colombiatrade.co>. [Consulta: noviembre, 22 2021]
66. Puente, A.; Aranguren, M. y Forteza, L. A. 2017. Cambios de pH y nutrientes en suelos asociados al cultivo intensivo de cítricos en Jagüey Grande, Matanzas, Cuba. *CitriFrut*. 34(1): 25-30.
67. Rivero, O.; Boquet, A. D.; López, C.; Valentín, P. y Manso, R. 2015. Segunda comunicación nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, Inst. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, La Habana, Cuba. 228 p.
68. Roistacher, C. N. 2003. The importance of a certification program for citrus. Memoria Encuentro Interamericano de Cítricos. p. 41-60.

69. Roose, M. 2017. Citrus rootstocks breeding and evaluation [en línea]. Disponible en: <http://citrusresearch.org/news2016-03-citrus-combination-tolerancetoHLB>. [Consulta: noviembre, 20 2021]
70. Ruiz, O.; Vargas, R.; Rolún, J.; Chávez, C. y Pichardo, R. 2019. Análisis del requerimiento hídrico en un distrito de riego de Tamaulipas, México. *Ingeniería Agrícola*. 9(2): 3-13.
71. SIAM. 2018. Necesidades de riego de un cultivo tradicional de cítricos [en línea]. Disponible en: <http://www.pérezguarinos.files.wordpress.com>. [Consulta: noviembre, 28 2021].
72. Solano, O. O.; Menéndez, C. G.; Vázquez, R. M.; Menéndez, J. G. y Martín, M. P. 2003. Estudio de la evapotranspiración de referencia en Cuba. *Cubana de Meteorología*. 10(1): 33.
73. Toledo, E y Cárdenas, R. 1980. El sistema radical en árboles adultos de naranjo 'Olinda Valencia' sobre patrón naranjo 'Agrio'. *Cienc. Téc. Agric. Cítricos y Otros Frutales. Suplemento*. 61-76.
74. Valdés, P. J. 2017. Predicción de las normas netas del riego del cultivo del frijol común en la zona occidental de Cuba. Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico. Universidad Tecnológica de La Habana.
75. Verdecia, L. 2016. Predicción de las normas netas de riego del tomate a cultivarse en las zonas occidental, central y oriental de Cuba en el período 2016- 2050 en función de la variabilidad y el cambio climático. Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico. Universidad Tecnológica de La Habana.
76. Zamora, E. y Chaterlán, Y. 2001. Estudios sobre evapotranspiración de referencia en Cuba. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 10(3): 87-89.
77. Zhang, Y.; Hansen, N.; Trout, T.; Nielsen, D. y Pausian, K. 2018. Modeling Deficit Irrigation of Maize with Day Cent Model. *Agronomy Journal*. 1(1): 1-11.