



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

F01

Hermosillo, Sonora, a 10 de noviembre de 2017

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

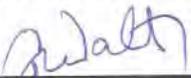
Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

"FACTORES CONDICIONANTES DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN UN CULTIVO DE SANDÍA EN LA COSTA DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO"

Esto es con el fin de que el alumno: **RAMÓN SAIZ RODRÍGUEZ**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Grado de la Maestría en Ciencias-Geología.

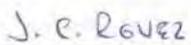
Sin otro en particular quedamos de Usted.

ATENTAMENTE



Dr. Christopher John Watts

Director de Tesis



Dr. Julio Cesar Rodriguez

Co-director de Tesis



C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA ^{F02}

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 24 de noviembre de 2017

Dr. Christopher John Watts
Director de Tesis
Dr. Julio César Rodríguez
Codirector de Tesis

Por este conducto les comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Ustedes, intitulado:

"FACTORES CONDICIONANTES DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN UN CULTIVO DE SANDÍA EN LA COSTA DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO"

Esto, con el fin de que el alumno **RAMÓN SAIZ RODRÍGUEZ** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo les comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

Dr. Julio César Rodríguez	Presidente
M.C. José Alfredo Ochoa Granillo	Secretario
Dr. Jesús Enrique López Avendaño	Vocal (Sinodal Externo)
Dr. Christopher John Watts	Vocal

Sin otro en particular quedo de Ustedes

Atentamente

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**



El saber de mis hijos
hará mi grandeza

UNIVERSIDAD DE SONORA

F06

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

"FACTORES CONDICIONANTES DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN UN CULTIVO DE SANDÍA EN LA COSTA DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO"

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

RAMÓN SAIZ RODRÍGUEZ

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

J. C. ROJAS
Dr. Julio Cesar Rodríguez

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

[Signature]
M.C. José Alfredo Ochoa Granillo

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

Dr. Jesús Enrique López Avendaño

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

[Signature]
Dr. Christopher John Watts

Atentamente

[Signature]
Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

F07

Hermosillo, Sonora, a 27 de noviembre de 2017

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que después de revisar y aprobar el trabajo de tesis del alumno **RAMÓN SAIZ RODRÍGUEZ**, hemos acordado que la presentación del examen de grado del alumno se lleve a cabo el día Miércoles 06 de diciembre del presente a las 08:00 horas.

Sin otro particular, quedamos a la espera de su respuesta.

ATENTAMENTE
Comité de Tesis

J. C. Rovez

Dr. Julio Cesar Rodríguez

M.C. José Alfredo Ochoa Granillo

Dr. Christopher John Watts
Director de Tesis

Dr. Jesús Enrique López Avendaño

C.c.p. Archivo





El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 29 de noviembre de 2017

Dr. Christopher John Watts
Director de Tesis
Dr. Julio César Rodríguez
Codirector de Tesis

Por este conducto y en atención a la solicitud recibida el día 28 de noviembre del presente, le comunico que ha sido aprobada la fecha para la presentación de Examen de Grado del alumno **RAMÓN SAIZ RODRÍGUEZ** propuesta por el Comité de Tesis.

Dicho examen se llevará a cabo el día **miércoles 06 de diciembre del presente a las 08:00 horas** en el *Aula 302 de la Maestría en Ciencias Geología, del Edificio 3R.*

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

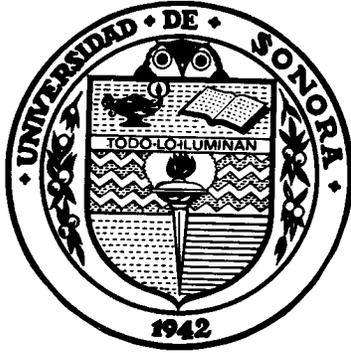


Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Archivo



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**FACTORES CONDICIONANTES DE LA
EVAPOTRANSPIRACIÓN EN UN CULTIVO DE
SANDÍA EN LA COSTA DE HERMOSILLO,
SONORA, MÉXICO.**

TESIS

**Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.**



P R E S E N T A:

RAMÓN SAIZ RODRÍGUEZ.

Hermosillo, Sonora, Diciembre de 2017

Dedicatoria

A mi hijo Ramón André Saiz, mi más grande motivación y orgullo. Te quiero mucho.

A mi padre Juan Arcadio Saiz Hernández, por ser mi ejemplo a seguir, mi mentor y amigo. Gracias por todo el apoyo que me has brindado, por tu paciencia y cariño.

A mi madre Martha Leticia Rodríguez Hurtado. Gracias por apoyarme en todo momento, por toda la ayuda que me has brindado, por tu presencia y amor. Nunca podré pagártelo.

A mis hermanos Juan Alejandro y David. Gracias por todo su apoyo, cariño y por los grandes momentos que pasamos juntos.

A mi hermano Carlos Armando, que aunque se que nunca podré decírselo, cada vez que estoy por darme por vencido es quien me ha dado fuerzas y un motivo para continuar ¡te extraño mucho!

A mis amigos Manuel, Stephany y Ludsviga, por su apoyo y amistad durante todo este tiempo.

A Aylin Rodríguez por estar conmigo en todo momento, gracias por brindarme tu apoyo, cariño y comprensión.

Agradecimientos

Al programa de Maestría en Ciencias en Geología de la División de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Sonora, por permitirme realizar este importante proyecto en mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el estímulo y apoyo para realizar estudios de posgrado.

Al Dr. Christopher Watts por su enseñanza, dedicación y apoyo incondicional para realizar este proyecto.

Al Dr. Julio Cesar Rodríguez por compartir conmigo sus conocimientos, experiencia y su tiempo, que me permitieron lograr esta importante meta en mi vida.

Al M.C. Alfredo Ochoa por compartir conmigo sus conocimientos y experiencia que enriquecieron a esta tesis.

Resumen

La evapotranspiración es uno de los procesos del Ciclo Hidrológico de mayor relevancia en estudios de balance y disponibilidad de agua en las áreas agrícolas de la región árida del Noroeste de México. En este trabajo, se utilizaron imágenes del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) obtenidas a partir del sistema satelital PROBA-V para elaborar un modelo y estimar la evapotranspiración (ET) de un cultivo de sandía en la zona agrícola de la Costa de Hermosillo, Sonora. El procedimiento se basó en la correlación entre el coeficiente de cultivo (K_c) y el valor del NDVI. Con el modelo se estimó la ET para el cultivo de sandía, los resultados se contrastaron con valores de ET medidos con el método de covarianza de vórtices. La correlación entre los valores medidos y los estimados fue de $r^2 = 0.729$ y, aunque los resultados fueron aceptables, pueden ser mejorados a medida que se incrementa el número de imágenes satelitales de buena calidad y la ET sea medida en una mayor variedad de cultivos.

Palabras Clave: Covarianza de vórtices, percepción remota, Costa de Hermosillo.

Summary

Evapotranspiration is one of the most important hydrological cycle processes in balance and water availability studies in a crop field of the arid region of northwestern Mexico. In this work, images of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained from the PROBA-V satellite were used to develop a model to estimate the evapotranspiration (ET) in a watermelon crop in an agricultural area of the coast of Hermosillo, Sonora. The procedure was based on the correlation between the crop coefficient (K_c) and the NDVI value. With the developed model, the ET of a watermelon crop was estimated and the results were contrasted with ET values measured with the eddy covariance method. The correlation between the measured values and the estimated values was $r^2 = 0.729$ and, although the results were acceptable, they can improve as the number of good quality satellite images increases and ET is measured in a greater variety of agricultural crops.

Index Words: Eddy Covariance, Remote sensin, Hermosillo Coast.

Índice

Introducción.....	1
Objetivos.....	2
Justificación.....	3
Motivación personal para la titulación por artículo publicado.....	3
Estimación de evapotranspiración con imágenes de PROBA-V de un cultivo de sandía en la Costa de Hermosillo, Sonora, México.	4
Discusión General y Conclusiones.....	21

Índice de Figuras en el artículo

Figura 1. Localización del sitio de estudio.....	15
Figura 2. Áreas de cultivo en el sitio de estudio.....	15
Figura 3. Comportamiento del coeficiente de cultivo (K_c) en relación al NDVI obtenido con imágenes de PROBA-V.....	16
Figura 4. Comparación de evapotranspiración (ET) medida en el sitio con los valores estimados con PROBA-V.....	17
Figura 5. Comportamiento ET medida y ET estimada con PROBA-V en 201.....	17
Figura 6. Variabilidad temporal de la precipitación, la radiación solar y la evapotranspiración durante el periodo de análisis en el sitio de estudio en 2014.....	17

Índice de tablas en el artículo

Tabla 1. Estimación de evapotranspiración para el año 2014.....	16
---	----

I. Introducción

La evapotranspiración es un proceso que comprende a la evaporación y la transpiración de las plantas. Es considerada uno de los principales componentes del balance de agua, en el análisis hidrológico de una cuenca con vegetación natural y para la determinación de los requerimientos de agua en las zonas agrícolas. Es un proceso complejo, que depende de muchos factores como la radiación solar, temperatura del aire y del suelo, la humedad atmosférica y del suelo, la velocidad y dirección del viento, tamaño, textura y estado de crecimiento de la hoja y el vegetal, estación del año, hora del día y el tipo de suelo.

En regiones áridas del Noroeste de México, las variables meteorológicas como la radiación solar, las altas temperaturas del aire y del suelo, la humedad y los vientos dominantes generan una alta demanda de agua en la atmósfera afectando de manera significativa la disponibilidad de agua y limitando el desarrollo de actividades agrícolas, que constituyen una de las principales actividades económicas en esta zona.

Existen una amplia variedad de métodos para determinar la evapotranspiración, por lo que, con el fin de estandarizar criterios, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), publicó en 1977 las metodologías para determinar las necesidades hídricas de los cultivos. En 2006, presenta una actualización del procedimiento para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la evapotranspiración de cultivo (ET_c) a partir de datos meteorológicos y coeficientes de cultivo.

Los avances científicos y tecnológicos y el desarrollo de nuevas metodologías, en las últimas décadas, han provisto a la Hidrología de nuevos métodos que permiten determinar con mayor precisión la evapotranspiración, entre los que destacan el de la relación de Bowen y el de covarianza de vórtices. También, utilizando resultados de estos métodos para contrastar, se han desarrollado procedimientos basados en sensoría remota y scintilometría, que permiten estimar la evapotranspiración y su comportamiento espacial y temporal, lo que ha mejorado la calidad de los estudios ambientales, los modelos climáticos y meteorológicos y la administración de recursos hídricos en amplias extensiones territoriales.

Entre los sensores remotos, actualmente destaca el sistema PROBA-V, satélite de pequeñas dimensiones operado por la Agencia Espacial Europea para mapear cobertura vegetal en todo el planeta, proveyendo imágenes cada dos días, con el fin de continuar el legado del sistema satelital SPOT que inició en 1998.

En esta tesis, utilizando datos de una torre micrometeorológica instalada en un Cultivo de Sandía en la costa de Hermosillo, Sonora, México, se pretende evaluar el potencial de las imágenes de PROBA-V y determinar, aplicando el método de covarianza de vórtices, utilizando valores diarios de evapotranspiración de los años 2014, 2015 y 2016 e identificar los factores hidroclimáticos que la condicionan, utilizando el método estadístico Análisis de Componentes Principales.

1.1. Objetivos

Objetivo general

Conocer el comportamiento de la evapotranspiración, evaluar el potencial del sistema PROBA-V para estimarla y determinar los factores hidroclimáticos que la condicionan en un cultivo de Sandía en la Costa de Hermosillo, Sonora, México.

Objetivos específicos

- ✓ Obtener medidas de evapotranspiración mediante el método de Covarianza de vórtices (Eddy Covariance) durante el período de cultivo de sandía en los años 2014, 2015 y 2016.
- ✓ Determinar el comportamiento de variables hidroclimáticos en una torre micrometeorológica durante el período de cultivo.
- ✓ Analizar componentes de la ecuación de balance de energía en un cultivo de sandía
- ✓ Identificar los factores hidroclimáticos que condicionan la evapotranspiración en el sitio de estudio.
- ✓ Evaluar imágenes satelitales del sistema PROBA-V para estimar la evapotranspiración en el sitio de medida.

1.2. Justificación

- ✓ Determinar la evapotranspiración e identificar factores condicionantes en el sitio de estudio, permitirá ampliar el conocimiento sobre uno de los principales elementos del Ciclo Hidrológico en esta región árida del noroeste de México.
- ✓ Conocer la lámina evapotranspirada por el cultivo de sandía en esta región árida de México, es un buen punto de partida para hacer más eficiente el uso de agua en ese y otros cultivos, con lo que es posible reducir la lámina de agua que se utiliza cada temporada y con ello reducir las extracciones del acuífero, que ya está en situación de sobreexplotación.
- ✓ Estimar la evapotranspiración con imágenes satelitales, permitirá extrapolar valores puntuales a grandes zonas de cultivo, en las que se requiere eficientizar el uso del recurso hídrico.
- ✓ Los resultados pueden ser utilizados para realizar otros trabajos de investigación, como la validación de métodos basados en sensores satelitales para estimar la evapotranspiración.

II. Motivación personal para la titulación por artículo publicado

Se avanzó en la tesis propuesta ante la H. Comisión Académica, logrando un 90% de avance; sin embargo, los esfuerzos que hace la Coordinación de Programa de Maestría en Ciencias en Geología para la difusión del conocimiento que se genera en el programa y el apoyo de los profesores miembros de mi Comité de Tesis, en particular del Dr. Julio Cesar Rodríguez, fueron la motivación para escribir el artículo: *“Estimación de evapotranspiración con imágenes de PROBA-V de un cultivo de sandía en la Costa de Hermosillo, Sonora, México”* y para solicitar ante la Comisión Académica de Posgrado de la Maestría en Ciencias-Geología de la División de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Sonora, me permitiera obtener el título de Maestro en Ciencias-Geología, contemplada como una de las opciones en los *artículos 64 y 67 del reglamento para estudios de posgrado* y el punto dos de los *requisitos para la obtención del grado mediante los incentivos para la titulación de estudiantes de posgrado*. Una vez recibida la respuesta favorable de la Comisión Académica y cumpliendo con los requisitos solicitados, se procedió a integrar el presente documento que sustituye a la tesis para la obtención del grado.

III. Artículo publicado

TERRA

Latinoamericana



Órgano Oficial de Divulgación de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

Octubre • Diciembre de 2017 • Volumen 35 • Número 4 ISSN 2395-8030

TERRA LATINOAMERICANA

OCTUBRE – DICIEMBRE DE 2017 • VOLUMEN 35 • NÚMERO 4

<http://www.terralatinoamericana.org.mx>

<http://www.chapingo.mx/terra/>

Terra Latinoamericana es una publicación trimestral de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. y tiene como finalidad difundir la investigación edafológica generada en el ámbito latinoamericano.

Terra Latinoamericana está incluida en el índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica del CONACyT

Terra Latinoamericana está incluida en la red de colecciones de revistas científicas SciELO México.

Terra Latinoamericana está incluida en la Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal (REDALyC).

Terra Latinoamericana está incluida en la lista de revistas de acceso libre, científicas y académicas del Directory of Open Access Journals (DOAJ)

Terra Latinoamericana está indizada en AGRIS (FAO), AGRICOLA (USDA), CAB ABSTRACTS y PERIODICA.

TERRA LATINOAMERICANA

COMITÉ EDITORIAL

EDITORA

Dra. Mariela Hada Fuentes Ponce
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco

COEDITOR

Dr. David Espinosa Victoria
Colegio de Postgraduados Campus Montecillo

EDITORES ADJUNTOS

Dr. Jorge D. Etchevers Barra
Colegio de Postgraduados

Dr. Manuel Sandoval Villa
Colegio de Postgraduados

Dra. Claudia Hidalgo Moreno
Colegio de Postgraduados

Dr. Fernando De León González
Universidad Autónoma Metropolitana

Dra. Norma E. García Calderón
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. David Cristóbal Acevedo
Universidad Autónoma Chapingo

Dra. Elizabeth Hernández Acosta
Universidad Autónoma Chapingo

EDITORA DE ESTILO EN INGLÉS

Diane Fumiko Miyoshi Udo

EDITORA DE FORMATO

Rosa María López Atilano

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

Eva Geraldina Vázquez Martínez

WEBMASTER

Lic. Cristopher Escalera de la Rosa

Fotografía Portada

Cristián Reyna

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

Dr. Antonio Turrent Fernández
Dr. Carlos Ortiz Solorio
Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Oscar L. Palacios Vélez
Dr. Ronald Ferrera Cerrato

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

Dr. Alberto Hernández	Cuba
Dr. Bernardo Van Raij	Brasil
Dr. Christian Prat	Francia
Dr. Daniel Buschiazzi E.	Argentina
Dr. Donald L. Suarez	EE. UU.
Dr. Eric S. Jensen	Dinamarca
Dr. Fernando Santibañez Q.	Chile
Dra. Floria Bertsch Hernández	Costa Rica
Dr. Hari Eswaran	EE. UU.
Dr. Héctor J. M. Morrás	Argentina
Dr. Jorge A. Delgado	EE. UU.
Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. José M. Hernández Moreno	España
Dr. Juan F. Gallardo Lancho	España
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Narciso Pastor Saez	España
Dr. Rafael Villegas Delgado	Cuba
Dr. Renato Grez Z.	Chile
Dr. Walter Luzio Leighton	Chile
Dr. Winfried E. H. Blum	Austria

TERRA LATINOAMERICANA

EDITORIAL COMMITTEE

EDITOR

Dra. Mariela Hada Fuentes Ponce
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco

COEDITOR

Dr. David Espinosa Victoria
Colegio de Postgraduados Campus Montecillo

ASSOCIATE EDITORS

Dr. Jorge D. Etchevers Barra
Colegio de Postgraduados

Dr. Manuel Sandoval Villa
Colegio de Postgraduados

Dra. Claudia Hidalgo Moreno
Colegio de Postgraduados

Dr. Fernando De León González
Universidad Autónoma Metropolitana

Dra. Norma E. García Calderón
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. David Cristóbal Acevedo
Universidad Autónoma Chapingo

Dra. Elizabeth Hernández Acosta
Universidad Autónoma Chapingo

ENGLISH EDITOR

Diane Fumiko Miyoshi Udo

FORMAT EDITOR

Rosa María López Atilano

EDITORIAL STAFF

Eva Geraldina Vázquez Martínez

WEBMASTER

Lic. Cristopher Escalera de la Rosa

Cover Photograph

Cristián Reyna

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Antonio Turrent Fernández
Dr. Carlos Ortiz Solorio
Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Oscar L. Palacios Vélez
Dr. Ronald Ferrera Cerrato

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Alberto Hernández	Cuba
Dr. Bernardo Van Raij	Brasil
Dr. Christian Prat	Francia
Dr. Daniel Buschiazzi E.	Argentina
Dr. Donald L. Suarez	EE. UU.
Dr. Eric S. Jensen	Dinamarca
Dr. Fernando Santibañez Q.	Chile
Dra. Floria Bertsch Hernández	Costa Rica
Dr. Hari Eswaran	EE. UU.
Dr. Héctor J. M. Morrás	Argentina
Dr. Jorge A. Delgado	EE. UU.
Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. José M. Hernández Moreno	España
Dr. Juan F. Gallardo Lancho	España
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Narciso Pastor Saez	España
Dr. Rafael Villegas Delgado	Cuba
Dr. Renato Grez Z.	Chile
Dr. Walter Luzio Leighton	Chile
Dr. Winfried E. H. Blum	Austria

TERRA LATINOAMERICANA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A. C.

MESA DIRECTIVA 2016-2018

Presidente	Dr. Enrique Troyo Diéguez
Vicepresidente	Dr. Juan Pedro Flores Margez
Secretario General	Dr. Félix Alfredo Beltrán Morales
Tesorera	Dra. Norma Eugenia García Calderón
Secretario de Relaciones Públicas	Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez
Secretario Técnico	Dr. Juan Manuel Cortés Jiménez
Secretario de Eventos Nacionales e Internacionales	M.C. Baltazar Corral Díaz
Coordinador de Comité de Apoyo	Dra. Catarina Loredo Osti
Primer Vocal	Dr. Armando Guerrero Peña
Segundo Vocal	Dra. Claudia Isabel Hidalgo Moreno

TERRA LATINOAMERICANA

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.

Octubre - Diciembre de 2017 Volumen 35 · Número 4

ISSN ELECTRÓNICO 2395-8030

Los artículos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta revista, citándola como fuente de información.

Las contribuciones a esta revista deben enviarse en versión electrónica conforme a las Normas para Publicación en la Revista TERRA LATINOAMERICANA a:

<http://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra>

Editor de la Revista TERRA LATINOAMERICANA. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.

Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Estado de México, México.

Oficina: Edificio del Departamento de Suelos

Universidad Autónoma Chapingo

56230 Chapingo, Estado de México.

Teléfono: 01(595) 95 2 17 21

TERRA LATINOAMERICANA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD 2016-2018

President	Dr. Enrique Troyo Diéguez
Vicepresident	Dr. Juan Pedro Flores Margez
Secretary	Dr. Félix Alfredo Beltrán Morales
Treasurer	Dra. Norma Eugenia García Calderón
Public Relations	Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez
Technical Adviser	Dr. Juan Manuel Cortés Jiménez
National and International Events	M.C. Baltazar Corral Díaz
Coordinator Support Committee	Dra. Catarina Loredo Osti
Voters	Dr. Armando Guerrero Peña Dra. Claudia Isabel Hidalgo Moreno

TERRA LATINOAMERICANA

Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science

October - December, 2017 Volume 35 · Number 4

ISSN 2395-8030 (Online)

The authors take full responsibility for the articles published. Partial or total reproduction of the content of this journal is authorized, as long as this publication is cited as the information source. When submitting articles to this journal an electronic version must be sent to:

<http://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra>

Editor de la Revista TERRA LATINOAMERICANA, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Estado de México, México.

Office address: Soils Department building
Universidad Autónoma Chapingo
56230 Chapingo, Estado de México.

Telephone: +52 (595) 952 17 21

TERRA

LATINOAMERICANA

OCTUBRE - DICIEMBRE DE 2017 • VOLUMEN 35 • NÚMERO 4

OCTOBER - DECEMBER, 2017 • VOLUME 35 • NUMBER 4

- 281** Clasificación digital de suelos a través de covariables ambientales de la cuenca del río Mixteco.
Digital soil classification through environmental covariables of the Mixteco river watershed.
Gerardo Colín García, Demetrio S. Fernández Reynoso, Mario R. Martínez Menez, José Donald Ríos Berber, Patricio Sánchez Guzmán, Erasmo Rubio Granados y Laura Alicia Ibáñez Castillo
- 293** Leguminosas aisladas e consorciadas con milheto em diferentes sistemas de manejo do solo no feijão orgânico.
Legumes not associated and associated with millet in different soil management systems in organic bean.
Marisol Rivero Herrada, Wilson Mozena Leandro e Enderson Petrônio de Brito Ferreira
- 301** Estimación de evapotranspiración con imágenes de PROBA-V de un cultivo de sandía en la costa de Hermosillo, Sonora, México.
Estimates of evapotranspiration with PROBA-V images in a crop field on the coast of Hermosillo, Sonora, Mexico.
Ramón Saiz Rodríguez, Génesis Luisana Aguirre López, Julio Cesar Rodríguez, Christopher John Watts Thorp, Juan Alejandro Saiz Rodríguez, Alfredo Ochoa Granillo y Juan Arcadio Saiz Hernández
- 309** Mitigación de NaCl por efecto de un bioestimulante en la germinación de *Ocimum basilicum* L.
Mitigation of NaCl by effect of a biostimulant in the germination of *Ocimum basilicum* L.
Daulemys Batista Sánchez, Bernardo Murillo Amador, Alejandra Nieto Garibay, Lilia Alcaráz Meléndez, Enrique Troyo Diéguez, Luis Hernández Montiel y Carlos Michel Ojeda Silvera

TERRA

LATINOAMERICANA

- 321** Plant and livestock waste compost compared with inorganic fertilizer: nutrient contribution to soil.
Aporte nutricional al suelo mediante fertilizantes químicos y abonos orgánicos de residuos vegetales y pecuarios.
Ofelia Adriana Hernández Rodríguez, César H. Rivera Figueroa, Elías E. Díaz Ávila, Dámaris L. Ojeda Barrios, and Víctor M. Guerrero Prieto

NOTA DE INVESTIGACIÓN / *Research Note*

- 329** Validación del modelo expo-lineal precipitación-escorrimento en un simulador de lluvia. A validation exercise of the precipitation-runoff expolinear model using a rain simulator.
Fernando Paz, Eliezer López Bautista y Ma. Isabel Marín Sosa

REVISIÓN / *Review*

- 343** Fundamentação teórica dos sistemas de amostragem de solo de acordo com a variabilidade de características químicas.
Theoretical background of soil sampling systems according to variability of chemical characteristics.
André Guarçoni, Víctor Hugo Alvarez V. e Fabrício Moreira Sobreira

REVISIÓN / *Review*

- 353** Biorremediación de arsénico mediada por microorganismos genéticamente modificados. Arsenic bioremediation mediated by genetically modified microorganisms.
Her Lizeth Rodríguez Martínez, Maribel Peña Manjarrez, Ana Victoria Gutiérrez Reyes, Cynthia Lizeth González Trevizo, Silvia Lorena Montes Fonseca y Gladys Guadalupe López Avalos

Revisores de este número **363**
Reviewers of this number

Índice de Autores Volumen 35 **365**
Authors index Volume 35

Normas para publicación / Instructions to authors **367**

Estimación de evapotranspiración con imágenes de PROBA-V de un cultivo de sandía en la costa de Hermosillo, Sonora, México

Estimates of evapotranspiration with PROBA-V images in a crop field on the coast of Hermosillo, Sonora, Mexico

Ramón Saiz Rodríguez^{1‡}, Génesis Luisana Aguirre López¹, Julio Cesar Rodríguez², Christopher John Watts Thorp³, Juan Alejandro Saiz Rodríguez⁵, Alfredo Ochoa Granillo⁴ y Juan Arcadio Saiz Hernández⁵

¹ Maestría en Ciencias en Geología. Universidad de Sonora. Blvd Luis Encinas y Rosales SN, Centro. 83000 Hermosillo, Sonora, México.

[‡] Autor responsable (ramon.saiz@unison.mx)

² Profesor del Departamento de Agricultura y Ganadería. Universidad de Sonora. Km 20.5 Carretera Hermosillo-Bahía Kino, Apartado Postal 305. Hermosillo, Sonora, México.

³ Profesor del Departamento de Física, ⁴ Profesor del Departamento de Geología, ⁵ Profesor del Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Universidad de Sonora. Blvd Luis Encinas y Rosales SN, Centro, 83000, Hermosillo, Sonora, México.

RESUMEN

La evapotranspiración es uno de los procesos del ciclo hidrológico de mayor relevancia en estudios de balance y disponibilidad de agua en las áreas agrícolas de la región árida del Noroeste de México. En este trabajo, se utilizaron imágenes del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) obtenidas a partir del sistema satelital PROBA-V para elaborar un modelo y estimar la evapotranspiración (ET) de un cultivo de sandía en la zona agrícola de la Costa de Hermosillo, Sonora. El procedimiento se basó en la correlación entre el coeficiente de cultivo (Kc) y el valor del NDVI. Con el modelo se estimó la ET para el cultivo de sandía, los resultados se contrastaron con valores de ET medidos con el método de covarianza de vórtices. La correlación entre los valores medidos y los estimados fue de $r^2 = 0.729$ y, aunque los resultados fueron aceptables, pueden ser mejorados a medida que se incremente el número de imágenes satelitales de buena calidad y la ET sea medida en una mayor variedad de cultivos.

Palabras claves: covarianza de vórtices, percepción remota, Costa de Hermosillo.

SUMMARY

Evapotranspiration is one of the most important hydrological cycle processes in balance and water availability studies in a crop field of the arid region of northwestern Mexico. In this work, images of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained from the PROBA-V satellite were used to develop a model to estimate the evapotranspiration (ET) in a watermelon crop in an agricultural area of the coast of Hermosillo, Sonora. The procedure was based on the correlation between the crop coefficient (Kc) and the NDVI value. With the developed model, the ET of a watermelon crop was estimated and the results were contrasted with ET values measured with the eddy covariance method. The correlation between the measured values and the estimated values was $r^2 = 0.729$ and, although the results were acceptable, they can improve as the number of good quality satellite images increases and ET is measured in a greater variety of agricultural crops.

Index words: eddy covariance, remote sensing, Hermosillo Coast.

Cita recomendada:

Saiz Rodríguez, R., G. L. Aguirre López, J. C. Rodríguez, C. J. Watts Thorp, J. A. Saiz Rodríguez, A. Ochoa Granillo y J. A. Saiz Hernández. 2017. Estimación de evapotranspiración con imágenes de PROBA-V de un cultivo de sandía en la costa de Hermosillo, Sonora, México. Terra Latinoamericana 35: 301-308.

Recibido: junio de 2017. Aceptado: agosto de 2017.

Publicado en Terra Latinoamericana 35: 301-308.

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) es uno de los principales componentes del balance hidrológico en cuencas con vegetación natural, zonas agrícolas y, en los últimos años, con los avances tecnológicos y el desarrollo de nuevas metodologías de análisis, su estimación es fundamental para estudios ambientales, modelos climáticos y meteorológicos (Shuttleworth, 2007; Polhamus *et al.*, 2013).

Las variables meteorológicas como la radiación solar, temperatura del aire, humedad y vientos, generan una alta demanda de vapor de agua atmosférico en las regiones áridas del noroeste de México (Rodríguez *et al.*, 2011)¹, influyendo notablemente en la disponibilidad de agua y con ello limitando el desarrollo de las áreas agrícolas (Watts *et al.*, 1999), por lo que es fundamental cuantificar apropiadamente la evapotranspiración (ET) de una forma simple, económica y que permita resultados consistentes con mediciones de superficie.

La ET, constituida por la lámina de agua que retorna a la atmósfera mediante los procesos de evaporación de superficies evaporantes y la transpiración a través de las plantas (Allen, 2006), ha sido estimada durante décadas mediante métodos que se basan en variables meteorológicas medidas de manera puntual en estaciones climatológicas (Brutsaert, 1982; Parlange *et al.*, 1995; Jiang e Islam, 1999; Allen, 2000). Algunos utilizan parámetros determinados experimentalmente y fórmulas sin sustento científico sólido (Parlange *et al.*, 1995), lo que resulta en determinaciones poco precisas y no aplicables para todo sitio de estudio; además, para estimar la ET en áreas extensas con vegetación, es necesario hacer muchas medidas puntuales con alguno de estos métodos y después aplicar un método de interpolación.

En las últimas décadas, el conocimiento del proceso de ET y los avances en el desarrollo tecnológico han dado lugar al desarrollo de modelos con los que se representa o estima de manera precisa el proceso de la ET. Entre los métodos basados en micrometeorología, destaca el de covarianza de vórtices, que ha sido probado con éxito en áreas pequeñas y grandes (Burba, 2013), en vegetación natural de zonas áridas en planicies y montañas (Vivoni *et al.*, 2010; Mendez Barrozo *et al.*, 2014) y en cultivos de hortalizas (Rodríguez *et al.*, 2011)¹ y perennes (Rodríguez *et al.*, 2010).

Las estaciones micrometeorológicas, además de proveer datos indispensables para los programas de riego y fundamentales para estudios de balance energético en sitios agrícolas y de vegetación natural, han sido de gran utilidad para validar métodos o contrastar estimaciones de ET en grandes superficies de terreno, que se han realizado con imágenes de 1 km del *sensor avanzado de muy alta resolución* (AVHRR) de los satélites NOAA (Jiang e Islam, 1999) y con combinaciones de datos de AVHRR y del espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) que portan las plataformas de sistemas satelitales AQUA y TERRA (Batra *et al.*, 2006; Ma *et al.*, 2014). Las imágenes de alta resolución espacial también han mostrado su utilidad para estimar ET; se han utilizado imágenes del satélite LANDSAT 8 (TIRS, VNIR), con píxeles de 100 × 100 m en cuencas hidrológicas de gran extensión (Senay *et al.*, 2016) y se han combinado con datos de MODIS, con las que se han desarrollado modelos para determinar la evapotranspiración a escala diaria (Yang *et al.*, 2017). Los satélites SPOT-4 y SPOT-5 también dan buenos resultados en estimaciones de evapotranspiración de cultivos (Farg *et al.*, 2012; Bisquert *et al.*, 2016) y con el lanzamiento del satélite PROBA-V (Project for On-Board Autonomy – Vegetation), que entró en operación en la primavera de 2013, se ofrecen productos con resolución espacial en el rango de 0.10 a 1 km con lo que se preserva el legado de 19 años del instrumento Vegetation que portan los satélites SPOT-4 y SPOT-5 (Dierckx *et al.*, 2014; Francois *et al.*, 2014) y se amplía la capacidad y calidad del sistema para estudios científicos y el desarrollo tecnológico.

El objetivo de este trabajo fue elaborar y validar un modelo a partir de la correlación lineal de valores del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) obtenidas con datos del sistema satelital PROBA-V con datos de evapotranspiración medidos mediante el método de Covarianza de Vórtices.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El sitio de estudio comprendió el área agrícola localizada en el kilómetro 21 de la Carretera SON-100, de la Costa de Hermosillo, Sonora, México (Figura 1),

¹ Rodríguez, J. C., C. J. Watts, J. Garatuza-Payán, C. Lizarraga-Celaya, J. Grajeda-Grajeda, A. Ochoa-Meza, S. F. Moreno-Salazar y M. E. Rentería Martínez. 2011. Evapotranspiración y balance hídrico en nogal pecanero (*Carya illinoensis* K. Koch) en la Costa de Hermosillo, México. pp. 692-698. In: Memorias XIV Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas.

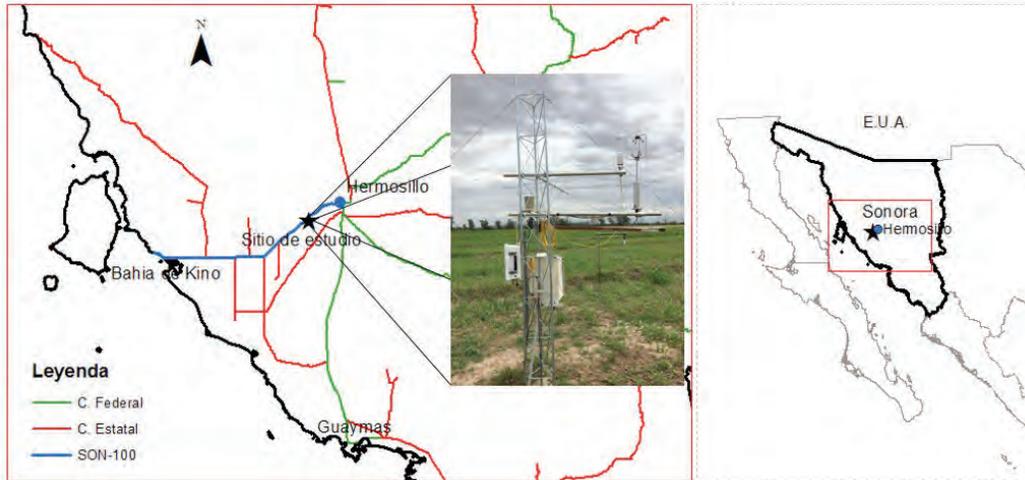


Figura 1. Localización del sitio de estudio.

en el que prevalece un clima desértico (BWw) con precipitación y temperatura media anual de 320.8 mm y 23.1 °C, respectivamente; la textura del suelo se caracteriza por un contenido de 49.08% de arena, 32.12% de limo y 18.8% de arcillas.

Cultivos en el Área de Estudio

El cultivo en el año 2014, fue sandía (*Citrullus lanatus*) mini triploide, variedad Extazy (Hazera Genetics) sobre una superficie de 60 ha, trasplantada entre el 8 y 15 de agosto, en un sistema de plantación con equidistancia entre cama de 2 m y longitud de 150 m, con una densidad de 12 000 plantas por ha y una

secuencia de un macho cada dos hembras, 9 líneas y una calle de cosecha. Se regó con un gasto de 1.287 L h⁻¹, con una distancia entre goteros de 0.406 m. La cosecha de los frutos inició el 9 de octubre y finalizó el 4 de noviembre.

El análisis del año 2015, se llevó a cabo con sandía de la variedad Fantasy, sembrada en una superficie de 120 ha, trasplantada entre el 20 y 21 de enero y plantados con la misma configuración y características que el cultivo del año 2014. La fecha de cosecha fue el 2 de abril.

En la Figura 2 se muestran las áreas de cultivo de los años analizados y la ubicación de la torre de micrometeorológica en cada predio cultivado.

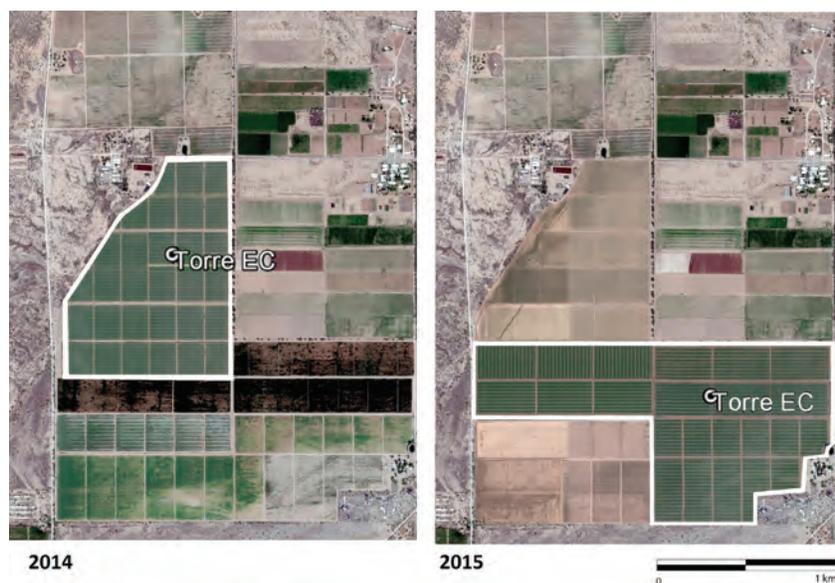


Figura 2. Áreas de cultivo en el sitio de estudio.

Datos de PROBA-V

Las imágenes satelitales utilizadas fue PROBA-V S1 TOC de NDVI de 100 m de resolución corregido por efecto atmosférico. Las imágenes se obtuvieron de la página web <http://www.vito-eodata.be/>. Las condiciones de nubosidad permitieron elaborar series de trece imágenes del año 2014 y catorce del 2015. Se delimitaron en las imágenes las áreas de cultivo de ambos periodos de estudio, se normalizaron los valores del NDVI y se extrajo de cada imagen el valor del píxel correspondiente a la ubicación de la torre micrometeorológica.

Datos Micrometeorológicos

En cada predio cultivado se instaló, por el período analizado, una torre instrumentada para medir los componentes de la ecuación de balance de energía: Radiación neta, R_n ; flujo de calor latente, LE y sensible, H y flujo de calor de suelo, G . También se midieron las variables meteorológicas: temperatura, humedad del aire, velocidad y dirección del viento, precipitación, presión barométrica, radiación solar y del suelo, humedad y temperatura. La información recolectada de los flujos (radiativos y turbulentos) fueron muestreados a 10 Hz, para obtener promedios cada 30 min, y los datos meteorológicos se muestrearon a 30 s y se almacenaron con promedios a cada 30 min.

Medición de la Evapotranspiración (ET_c)

Los flujos turbulentos: Calor sensible (H) y calor latente (LE) fueron medidos con la técnica de covarianza de vórtices o Eddy Covariance (EC) (Baldocchi, 2003).

Los datos crudos se procesaron con el programa EdyPro versión 4.1 (desarrollado por LI-COR) y se obtuvieron promedios cada 30 min, siguiendo los procedimientos propuestos por Burba (2013), se realizaron las correcciones y particiones requeridas, usando el sitio http://www.bgcjena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/output/20141205021959/results_ext.php. Considerando que el déficit en la ecuación de balance de energía (entrante y saliente) se mantuvo entre el 10 y 20%, no fue necesario aplicar la corrección de la relación de Bowen (Twine *et al.*, 2000) para la obtención de los flujos turbulentos (LE y H). Los datos meteorológicos y de suelo fueron promediados a 30 min y posteriormente se obtuvieron los valores diarios.

La lámina de evapotranspiración en mm d^{-1} se obtuvo haciendo la conversión de unidades considerando que el flujo de calor latente (W m^{-2}) es la energía requerida en el proceso de evapotranspiración por unidad de tiempo y que el calor latente de evaporación $\lambda = 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$.

Cálculo de la Evapotranspiración de Referencia

La evapotranspiración de referencia (ET_0) se determinó con la ecuación de Penman-Monteith modificada por Allen *et al.* (1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

donde: ET_0 es la evapotranspiración de referencia, en mm día^{-1} ; R_n es la radiación neta, en $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$; G es el flujo de calor del suelo, en $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$; T es la temperatura del aire promedio diario, en $^{\circ}\text{C}$; Δ es la pendiente de la curva de presión a saturación a la temperatura T , en $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$; γ es constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e_s es la presión de saturación del vapor a temperatura T , en kPa ; e_a es la presión de vapor promedio diario, en kPa y u_2 es la velocidad de viento promedio diario a 2 m de elevación sobre el terreno, en m s^{-1} .

Coefficiente de Cultivo (K_c)

El coeficiente de cultivo se determinó utilizando la aproximación de Doorenbos y Pruitt (1977) modificada por Allen *et al.* (1998):

$$K_c = K_{cb} * K_s + K_e = \frac{ET_c}{ET_0}$$

donde: ET_c es la evapotranspiración medida en (mm d^{-1}) con el método de EC, K_{cb} es la transpiración del cultivo, K_e la evaporación del suelo, K_c el coeficiente de cultivo y K_s el coeficiente de estrés hídrico.

En ambos ciclos, debido a que el cultivo se encontraba sin estrés hídrico, se tomó un valor igual a la unidad para el coeficiente K_s . De igual forma por lo complejo que resulta medir la transpiración y evaporación por separado, se consideró K_c como el cociente entre ET_c y ET_0 .

$$Kc = \frac{ET_c}{ET_0}$$

Correlación de Kc y NDVI Obtenido con Imágenes de PROBA-V

Los valores de Kc estimados para el cultivo de sandía del año 2015, se correlacionaron con los valores de NDVI elaborados con las imágenes de PROBA-V del mismo año (Figura 3), obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.567.

Modelo Lineal para Obtención de Kc y ET

Esta correlación, permitió determinar valores de Kc en función de NDVI con la relación:

$$Kc = 0.765 \text{ NDVI} + 0.295$$

Y los valores de ET con la relación:

$$ET = (0.765 \text{ NDVI} + 0.295) ET_0$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se muestran, para los trece días de análisis del cultivo de sandía del año 2014, los valores de evapotranspiración (ET) medidos con el método de

Cuadro 1. Estimación de la evapotranspiración para el año 2014.

Fecha	Día del año	ET	ET ₀	NDVI (2014)	Kc estimado	ET PROBA-V
		- - - - mm día ⁻¹ - - - -				
09-Sep-14	252	3.03	7.28	0.36	0.57	4.15
14-Sep-14	257	3.93	6.99	0.44	0.63	4.40
23-Sep-14	266	3.54	6.17	0.63	0.77	4.78
02-Oct-14	275	3.47	7.26	0.68	0.82	5.92
07-Oct-14	280	2.34	5.08	0.48	0.67	3.38
11-Oct-14	284	3.06	5.56	0.64	0.78	4.35
16-Oct-14	289	2.42	6.14	0.62	0.77	4.71
20-Oct-14	293	1.61	3.85	0.58	0.74	2.85
25-Oct-14	298	2.02	4.64	0.62	0.77	3.57
29-Oct-14	302	2.08	4.63	0.67	0.81	3.75
03-Nov-14	307	1.58	4.18	0.62	0.77	3.21
07-Nov-14	311	1.51	2.77	0.59	0.74	2.06
12-Nov-14	316	1.05	3.22	0.28	0.51	1.65

ET = evapotranspiración; ET₀ = evapotranspiración de referencia; NDVI = índice de vegetación de la diferencia normalizada; Kc = coeficiente de cultivo.

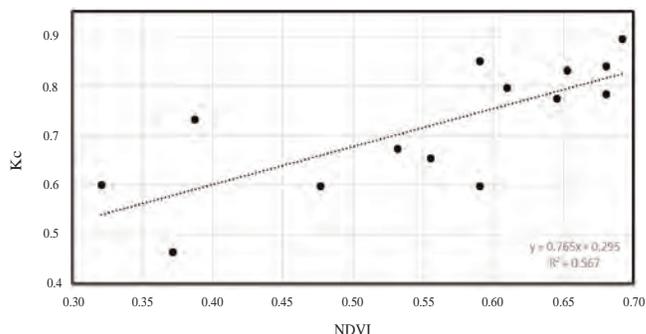


Figura 3. Comportamiento del coeficiente de cultivo (Kc) en relación al NDVI obtenido con imágenes de PROBA-V.

covarianza de vórtices, ET₀ estimado con la ecuación de Penman-Monteith, NDVI obtenido de las imágenes de PROBA-V, los valores de Kc y los de ET estimados con el modelo Elaborado.

En la Figura 4, se muestra la comparación entre los valores medidos de ET y los estimados con PROBA-V, y como lo indica el coeficiente de correlación ($r = 0.729$) el modelo lineal estima con precisión aceptable la evapotranspiración en el cultivo de sandía, aunque sobreestima la lámina de agua evapotranspirada durante todo el cultivo de sandía analizado (Figura 5). En la misma figura, también, se puede apreciar que la variabilidad temporal que muestra la ET estimada con las imágenes de PROBA-V es congruente con las fluctuaciones de la variable medida.

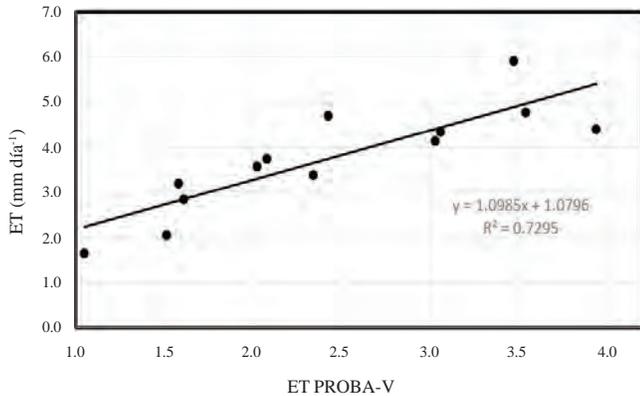


Figura 4. Comparación de evapotranspiración (ET) medida en el sitio con los valores estimados con PROBA-V.

Los resultados reflejan el comportamiento de los elementos del tiempo atmosférico prevaleciente durante el ciclo de cultivo y condicionan los valores determinados con el método de Flujo turbulento y los estimados con las imágenes de PROBA-V. En las tres semanas posteriores a la primera semana de trasplante, se registraron 195 mm de lluvia, de los 292 registrados durante el ciclo de cultivo (Figura 6), propiciando la aparición de malezas que contribuyeron a las láminas de evapotranspiración medidas con el método de covarianza de vórtices. La radiación solar decreció desde el inicio del cultivo con notables disminuciones durante los días con lluvia o nublados que limitaron la visibilidad del sensor de PROBA-V y la cantidad de imágenes de NDVI utilizadas para el estudio.

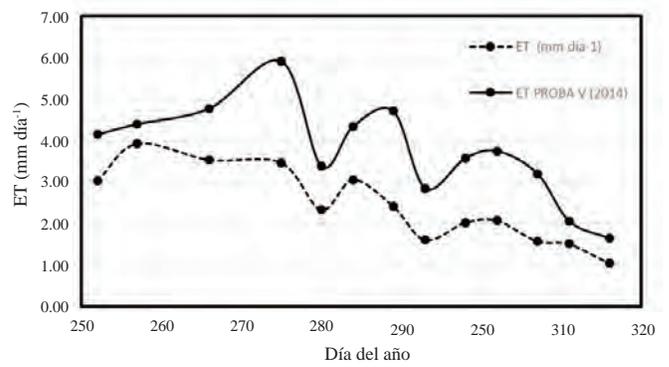


Figura 5. Comportamiento de evapotranspiración (ET) medida y ET estimada con PROBA-V en 2014.

La evapotranspiración total en todo el período de cultivo medida con el método de flujo turbulento en el sitio de estudio fue 214.4 mm, superior a los 180 mm cuantificados con el mismo procedimiento por Román *et al.* (2017), pero dentro del rango de 250 mm a 350 mm medidos con lisímetro reportados por Erdem *et al.* (2005), Bastos *et al.* (2012) y Shukla *et al.* (2014). En el período analizado, limitado por la disponibilidad de imágenes, la estimación con PROBA-V fue de 255.22 mm, 86.57 mm por encima de la medida en la torre micrometeorológica en el mismo período.

En cuanto al coeficiente de cultivo (Kc), los valores obtenidos durante los días intermedios, coinciden con el promedio semanal máximo Kc = 0.73 obtenido por Román *et al.* (2017).

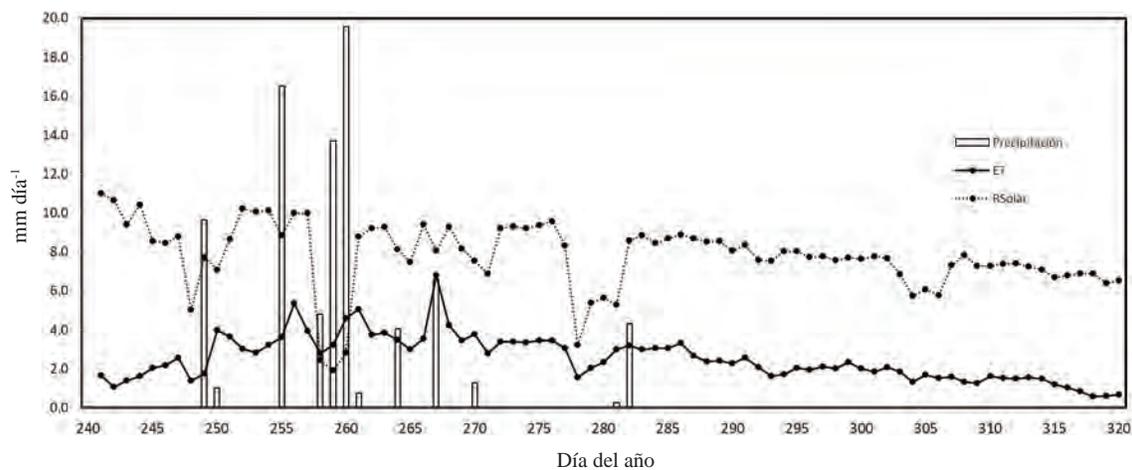


Figura 6. Variabilidad temporal de la precipitación, la radiación solar y la evapotranspiración durante el período de análisis en el sitio de estudio en 2014.

El modelo lineal se elaboró a partir de los datos del año 2015, en el que el ciclo del cultivo abarcó los meses de enero a abril, en los que la correlación entre K_c y NDVI fue de $r^2 = 0.567$ con una serie de 14 imágenes de NDVI, que a diferencia del año 2014, en el que el cultivo se desarrolló de agosto a noviembre, solo se obtuvieron 13 imágenes libres de nubes, obteniéndose una correlación de $r^2 = 0.528$.

CONCLUSIONES

- Este estudio muestra que es posible estimar evapotranspiración con imágenes de NDVI obtenidas con PROBA-V y el error medio cuadrático $EMC = 1.44 \text{ mm día}^{-1}$ de los valores estimados con respecto a los medidos, que en los días de mayor evapotranspiración representan una sobreestimación cercana al 12% y en los días de menor evapotranspiración alcanza el 57%, se puede reducir con más medidas de evapotranspiración y más imágenes de satélite del área de estudio durante los dos ciclos de cultivo de sandía y elaborando modelos independientes para cultivos de primavera y verano, en las que se consideren las variables climáticas propias de cada estación en la región, donde es necesario hacer un uso más eficiente del agua.

- El estudio, también muestra, que se mantiene el legado del sensor *Vegetation* que opera desde 1998 a bordo de los satélites SPOT 4 y SPOT 5 y estudios futuros pueden enfocarse, a partir de datos de estaciones micrometeorológicas, a explicar el efecto de las variables climatológicas de la diferencia entre los valores medidos de ET y los estimados con PROBA-V de manera que se determinen los factores de escala que permitan mayor precisión en la estimación con sensores remotos de esta variable hidroclimática.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, del gobierno de la República Mexicana por su apoyo para realizar estudios de posgrado.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy. ISBN 92-5-104219-5.
- Allen, R. G. 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *J. Hydrol.* 229: 27-41.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 2006. Evapotranspiración de cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje No. 56, Roma, Italia.
- Baldocchi, D. D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Changes Biol.* 9: 479 -492
- Bastos, A. E., C. R. Silva, B. H. N. Rodrigues, A. S. Andrade, and L. M. M. Ibiapina. 2012. Evapotranspiration and crop coefficient of drip irrigated watermelon in Piauí coastline, Brazil. *Eng. Agric.* 32: 582-590.
- Batra, N., S. Islam, V. Venturini, G. Bisht, and L. Jiang. 2006. Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. *Remote Sens. Environ.* 103: 1-15.
- Bisquet, M., J. M. Sánchez, R. López-Urrea, V. Caselles, and J. Galve. 2016. Downscaling LST data to estimate field-scale evapotranspiration using images from the SPOT-5 Take-5 experiment. Living planet symposium 2016. European Space Agency. Prague, Czech Republic.
- Brutsaert, W. 1982. Evaporation into the atmosphere: Theory, history and applications. Springer Netherlands. Dordrecht, Netherlands.
- Burba, G. 2013. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications. A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. LI-COR Biosciences. Lincoln, NE, USA.
- Dierckx, W., S. Sterckx, I. Benhadj, S. Livens, G. Duhoux, T. Van Achteren, M. Francois, K. Mellab, and G. Saint. 2014. PROBA-V Mission for global vegetation monitoring: Standard products and image quality. *Int. J. Remote Sens.* 35: 2589-2614.
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 24. FAO. Rome, Italy.
- Erdem, Y., T. Erdem, A. Orta, and H. Okursoy. 2005. Irrigation scheduling for watermelon with crop water stress index (CWSI). *J. Central Eur. Agric.* 6: 449-460.
- Farg, E., S. M. Arafat, M. S. Abd El-Wahed, and A. M. El-Gindy. 2012. Estimation of evapotranspiration E_{Tc} and crop coefficient K_c of wheat, in south Nile Delta of Egypt using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. *The Egyptian J. Remote Sens. Space Sci.* 15: 83-89.

- Francois, M., S. Santandrea, K. Mellab, D. Vrancken, and J. Versluys. 2014. The PROBA-V mission: The space segment. *Int. J. Remote Sens.* 35: 2548-2564.
- Jiang, L. and S. Islam. 1999. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophys. Res. Lett.* 26: 2773-2776.
- Ma, Y., Z. Zhu, L. Zhong, B. Wang, C. Han, Z. Wang, Y. Wang, L. Lu, P. M. Amatya, W. Ma, and Z. Hu. 2014. Combining MODIS, AVHRR and in situ data for evapotranspiration estimation over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau. *Atmos. Chem. Phys.* 14: 1507-1515.
- Méndez-Barroso, L. A., E. R. Vivoni, A. Robles-Morua, G. Mascaro, E. A. Yépez, J. C. Rodríguez, C. J. Watts, J. Garatuza-Payán, and J. A. Saiz-Hernández. 2014. A modeling approach reveals differences in evapotranspiration and its partitioning in two semiarid ecosystems in Northwest Mexico. *Water Resour. Res.* 50: 3229-3252.
- Parlange, M. B., W. E. Eichinger, and J. D. Albertson. 1995. Regional scale evaporation and the atmospheric boundary layer. *Rev. Geophys.* 33: 99-124.
- Polhamus, A., J. B. Fisher, and K. P. Tu. 2013. What controls the error structure in evapotranspiration models? *Agric. For. Meteorol.* 169: 12-24.
- Rodríguez, J. C., J. Grageda, C. J. Watts, J. Garatuza-Payán, A. Castellanos-Villegas, J. Rodríguez-Casas, J. A. Saiz-Hernández, and V. Olavarrieta. 2010. Water use by perennial crops on the lower Sonora watershed. *J. Arid Environ.* 74: 603-610.
- Román-Román, L., T. Díaz-Valdés, E. López-Avendaño, C. Watts, F. Cruz-Bautista, J. Rodríguez-Casas y J. C. Rodríguez. 2017. Evapotranspiración del cultivo de sandía (*Citrullus lantanus*) en la Costa de Hermosillo, Sonora, México. *Terra Latinoamericana* 35: 41-49.
- Senay, G. B., M. Friedrichs, R. K. Shing, and N. M. Velpuri. 2016. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sens. Environ.* 185: 171-185.
- Shukla, S., N. K. Shrestha, F. H. Jaber, S. Srivastava, T. A. Obreza, and B. J. Boman. 2014. Evapotranspiration and crop coefficient for watermelon grown under plastic mulched conditions in sub-tropical Florida. *Agric. Water Manage.* 132: 1-9.
- Shuttleworth, W. J. 2007. Putting the "vap" into evaporation. *Hydrol. Earth System Sci.* 11: 210-244.
- Twine, T. E., W. P. Kustas, J. M. Norman, D. R. Cook, P. R. Houser, T. P. Meyers, J. H. Prueger, P. J. Starks, and M. L. Wesely. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agric. For. Meteorol.* 103: 279-300.
- Vivoni, E. R., J. C. Rodríguez and C. J. Watts. 2010. On the spatiotemporal variability of soil moisture and evapotranspiration in a mountainous basin within the North American monsoon region. *Water Resour. Res.* 46: W02509. doi: 10.1029/2009WR008240
- Watts, C. J., J. C. Rodríguez, J. Garatuza-Payán, H. de Bruin y J. Stewart. 1999. Estimación de evaporación y radiación solar en el valle del Yaqui Sonora usando datos de satélite. *Ing. Hidrául. Méx.* 14: 45-53.
- Yang, Y., M. C. Anderson, F. Gao, C. R. Hain, K. A. Semmens, W. P. Kustas, A. Noormets, R. H. Wynne, V. A. Thomas, and G. Sun. 2017. Daily Landsat-scale evapotranspiration estimation over a forested landscape in North Carolina, USA, using multi-satellite data fusion. *Hidrol. Earth Syst. Sci.* 21: 1017-1037.

IV. Conclusiones e Investigación Futura

Conclusiones

Un aspecto relevante de la tesis fue contar con medidas precisas de evapotranspiración y de las 15 variables que hidrometeorológicas relacionadas con este proceso y que fueron registradas en la torre de flujos. La tecnología y el proceso de medida usados en los trabajos de campo, han sido utilizados por diversos investigadores en todo el mundo, lo que avala la calidad de los datos y su aplicabilidad en una amplia variedad de estudios que han contribuido al desarrollo de la hidrometeorología.

Estos datos también sustentan la confiabilidad del modelo lineal elaborado en la publicación que sustituye al documento de esta tesis para estimar la ET a partir de imágenes digitales de PROBA-V y constituyen el soporte para ampliar el conocimiento sobre el proceso de evapotranspiración, su cuantificación y la determinación de las variables hidrometeorológicas que condicionan el proceso en un cultivo de sandía en el noroeste de México, como era el propósito original de la tesis y que seguirá siendo el objetivo de nuevas publicaciones.

Investigación futura

La metodología aplicada y la información generada abre la posibilidad de seguir ampliando el conocimiento sobre la hidrometeorología en la región, en especial sobre el proceso de evapotranspiración y su impacto en el uso del recurso hídrico, así como en el estudio de otras variables hidroclimáticas, su interrelación y su efecto en las imágenes de PROBA-V y otros sensores remotos que determinan la precisión de los modelos elaborados a partir de estos satélites.