



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICA

CARRERA DE BIOFÍSICA

“Determinación de la evapotranspiración mediante imágenes aéreas en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano para cultivos de papa *solanum spp*”

Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de:

BIOFÍSICO

AUTOR: MIGUEL ÁNGEL SÁEZ PAGUAY

TUTOR: ING. JUAN LEÓN RUIZ

Riobamba–Ecuador

2016

© 2016, Miguel Angel Sáez Paguay

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICA
CARRERA DE BIOFÍSICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo experimental: **Determinación de la evapotranspiración mediante imágenes áreas en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano para cultivos de papa *solanum spp***, de responsabilidad del señor Miguel Ángel Sáez Paguay, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

Ing. Juan León Ruiz

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Biof. Javier Carrasco

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Yo, Miguel Ángel Sáez Paguay soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo experimental; y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO.

Miguel Ángel Sáez Paguay

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a la vida por permitirme llegar a este momento importante en mi formación profesional. A mis padres por su ejemplo.

También a esas personas importantes en mi vida, que siempre estuvieron listas para brindarme todo su apoyo. Con todo mi cariño este Trabajo de Titulación va por ustedes.

Miguel.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por el apoyo fundamental en lo económico, sentimental, moral, etc.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, institución que me abrió las puertas para formarme como profesional de éxito, a los docentes de la Escuela de Física y Matemática y de manera especial al Biofísico Javier Carrasco por su invaluable acompañamiento en la elaboración del presente trabajo.

Al Centro experimental del Riego ESPOCH en la persona del Ing. Juan León Ruiz por la colaboración incondicional y su iniciativa en pro de incrementar la calidad académica en la institución.

Al Centro de Energías Alternativas y Ambiente ESPOCH en la persona del Dr. Celso Recalde por el apoyo científico y económico.

Al Centro de Sistemas de Información Geográfica ESPOCH en la persona de la Ing. Pamela Paula por el apoyo técnico.

A los militantes del Movimiento Estudiantil Politécnicos Libres por el apoyo en el ideal de forjar una institución a la altura de nuestros sueños.

A todas las personas que de una u otra forma me apoyaron.

A mis amigos por la alegría en las buenas y en las malas.

Miguel.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN.....	xii
SUMMARY	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	4
1.1 Antecedentes	4
1.2 Bases teóricas	5
1.2.1 Evapotranspiración	6
1.2.2 Factores que intervienen en la evapotranspiración.	8
1.2.3 Conceptos de evapotranspiración.....	9
1.2.4 Unidades de evapotranspiración.	12
1.2.5 Determinación de la evapotranspiración.....	13
1.2.6 Evapotranspiración mediante sensoramiento remoto.....	16
CAPÍTULO II	
MARCO METODOLÓGICO.....	20
2.1 Características de equipos experimentales.....	21
2.2 Variables dependientes e independientes.....	25
2.3 Tipos y caracterización de pruebas experimentales	25
2.3.1 Pruebas experimentales para determinar la ETc instantánea mediante sensoramiento remoto	28
2.3.2 Pruebas experimentales para determinar la ETc mediante información proveniente de lisímetro de drenaje, tanque evaporímetro tipo A e información meteorológica	29
2.3.3 Obtención de la ET potencial (teórica) método de Thorntwaite.....	40
2.3.4 Mediciones para correlacionar el mapa de evapotranspiración de cultivo obtenido por detección remota y el estado fisiológico de la planta	41
2.4 Modelación matemática de la experimentación	42
CAPÍTULO III	
MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	44
3.1 Resultados mediante detección remota.	44
3.2 Resultados provenientes de datos en tierra	48
3.3 Resultados de la ETp provenientes del método teórico de Thorntwaite	50
3.4 Resultado de la recolección de información de la fenología (emergencia,	

floración, tuberización), además de otros parámetros útiles al momento de evaluar la actividad fisiológica del vegetal.	51
3.5 Curvas características de la experimentación.....	53
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Proceso de evapotranspiración.	6
Figura 2-1. Esquematación de un estoma durante el proceso de transpiración.	7
Figura 3-1. Cálculo evapotranspiración.	11
Figura 4-1. Coeficiente de cultivo.....	12
Figura 5-1. Factores de conversión para expresar evapotranspiración.	13
Figura 6-1. Espectro de absorción de la mayoría de pigmentos en plantas.....	18
Figura 7-1. Espectro de reflectancia de una típica hoja verde en la región visible e infrarroja cercana del espectro electromagnético.	18
Figura 1-2. Cuadricóptero de mediana autonomía equipada con una cámara RGB modificada con un filtro para captar el infrarrojo.....	21
Figura 2-2. Fabricación del lisímetro.	22
Figura 3-2. Instalación del lisímetro.	22
Figura 4-2. Tensiómetros colocados junto al lisímetro.	22
Figura 5-2 Localización de la estación meteorológica automática ESPOCH - INER en relación a las parcelas del estudio instaladas en el campo. La distancia entre los dos puntos es de 520 metros.....	23
Figura 6-2. Estación meteorológica automática ESPOCH – INER. La estación provee información en intervalos de una hora de magnitudes como temperatura ambiental, radiación solar, velocidad de viento, entre otras	24
Figura 7-2. Localización de la Estación Agro meteorológica Facultad de Recursos Naturales ESPOCH - INAMHI en relación a las parcelas del estudio instaladas en el campo. La distancia entre los dos puntos es de 490 metros.	24
Figura 8-2. Localización de la zona de estudio.....	25
Figura 9-2. Cultivo sembrado, instalado el sistema de riego y colocado postes de referencia... ..	26
Figura 10-2. Descripción del tanque clase A.	27
Figura 11-2. Ortofotomosaico de la parcela estudiada, las etiquetas hacen referencia al número de tratamiento y a la repetición asignada	29
Figura 12-2. Conceptos de evapotranspiración.....	31
Figura 13-2. Componentes de la radiación.....	35
Figura 14-2. Radiación extraterrestre diaria para diferentes latitudes para el 15avo día del mes.	37
Figura 15-2. Coeficientes de cultivo tabulados para usar en la fórmula FAO Penman Monteith para ciertos cultivos.....	40
Figura 16-2. Factores de corrección de evapotranspiración potencial mensual, dados por el método de Thornthwaite, para ajustarlo al número de días del mes y a la	

duración del brillo solar diario, en los meses del año de interés y en latitudes entre 15 grados Norte y 22 grados sur.	41
Figura 17-2. Distribución de los individuos a quienes se les registró los datos en las parcelas en estudio	42
Figura 18-2. Representación gráfica del procedimiento a seguir para determinar la ETc mediante sensoramiento remoto.	42
Figura 19-2. Representación gráfica del procedimiento a seguir para determinar la ETc a nivel de suelo.	43
Figura 20-2. Representación gráfica del procedimiento a seguir para determina la ETp mediante el método teórico de Thorntwaite.	43
Figura 1-3 Mapa de Evapotranspiración de cultivo determinado mediante detección remota correspondiente al 17 de abril de 2015.	44
Figura 2-3. Evapotranspiración integrada para los cultivos de importancia del ciclo otoño invierno en México.	45
Figura 3-3. Mapa de Evapotranspiración de cultivo determinado mediante detección remota correspondiente al 17 de mayo de 2015.	45
Figura4-3 Mapa de Evapotranspiración de cultivo determinado mediante detección remota correspondiente al 15 de junio de 2015.	46
Figura 5-3. Mapa de Evapotranspiración de cultivo determinado mediante detección remota correspondiente al 17 de julio de 2015.	47
Figura 6-3. Porcentajes de pixeles involucrados en cada constituyente del fenómeno evapotranspiratorio.	47
Figura 7-3. Comparación entre los métodos en tierra y mediante teledetección para determinar ETc.	49
Figura 8-3. Comparación entre valores de ETo calculados	50
Figura 9-3. Altura de la planta.	52
Figura 10-3. Contenido de clorofila.	53

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-2.	Valores de ETo de referencia para los meses estudiados	28
Tabla 1-3.	Evapotranspiración de cultivo mediante detección remota	48
Tabla 2-3.	Valores de ETo calculados mediante el método FAO Penman Montreith para los días estudiados.....	48
Tabla 3-3.	Kc proveniente de los registros de la FAO utilizado en los distintos meses del presente estudio.....	48
Tabla 4-3.	Valores calculados de ETc para los meses de estudio	48
Tabla 5-3.	Valores de ETo calculados con el método de Thornthwaite	50
Tabla 6-3.	Información fenológica del cultivo	51
Tabla 7-3.	Altura de planta en días cercanos a la fotografía	52
Tabla 8-3.	Contenido de Clorofila	53

RESUMEN

La metodología denominada “en dos pasos” es usada para la determinación de la evapotranspiración de cultivo (ET_c), consiste en multiplicar la evapotranspiración de referencia (ET_o) por el coeficiente de cultivo (K_c). La metodología operativa denominada “K_c NDVI” (Índice de vegetación de diferencia normalizada) se basa en la relación lineal existente entre el K_c basal y el NDVI para obtener mapas de K_c utilizando la respuesta espectral de una cubierta vegetal representada en el NDVI con imágenes de satélite. En el presente trabajo se determinó la ET_c de un cultivo de papa *solanum* spp. localizado en la ciudad de Riobamba – Ecuador. El K_c se obtuvo mediante la metodología “K_c-NDVI” con el uso de imágenes aéreas en el espectro visible e infrarrojo cercano. La ET_o se determinó por el método del tanque evaporímetro tipo A. Para la validación se comparó el valor resultante con la ET_c determinada a nivel de suelo mediante el método “FAO Penman Monteith para la ET_o y datos tabulados de K_c. Se observó un comportamiento similar entre los resultados de ambos procedimientos, además de una concordancia con la información fenológica del cultivo. Se concluye que la metodología empleada describe adecuadamente el fenómeno de ET_c a partir de imágenes aéreas respondiendo apropiadamente a las variaciones de los ciclos de desarrollo del cultivo por lo que se recomienda su uso tanto en esta especie vegetal como en otras especies en posteriores estudios.

Palabras Clave: <EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO><PAPA SOLANUM SPP>
<METODOLOGÍA KC- NDVI><EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA>
<COEFICIENTE DE CULTIVO><RIOBAMBA><INDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN>.

Ing. Juan León Ruiz

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

ABSTRACT

The methodology called “two step” is used to determine crop evapotranspiration (ET_c), it is to multiply the reference evapotranspiration (ET_o) by the crop coefficient (K_c). The operational methodology called “K_c-NDVI” (normalized difference vegetation index) is based on the linear relationship between K_c basal and NDVI for get maps K_c using the spectral response of vegetation cover represented in NDVI by satellite imagery. In this paper the ET_c was determined of potato growing of *Solanum* spp, located in the city of Riobamba – Ecuador. The K_c was obtained by “K_c NDVI” methodology with the use of aerial imagery in the visible spectrum and near infrared. The ET_o was determined by the method of evapo tank of type A. To validate was compared the resulting value with the ET_c determined at ground level through “FAO Penman Montheith method” for ET_o and tabulated data K_c. Similar behavior was observed between the results of both procedures, In addition to an agreement with phenological information from crop. We conclude that methodology used describes adequately the phenomenon of ET_c from aerial imagery responding appropriately to changes in crop development cycles so that recommended for use both in this plant species and other species in subsequent studies.

Key words: Crop Evapotranspiration, Potato *Solanum* SPP, K_c NDVI Methodology, Reference Evapotranspiration, Crop Coefficient, Riobamba, Normalized Difference Vegetation Index.

INTRODUCCIÓN

Situación Problemática

La gestión sustentable de los recursos naturales es una prioridad para el estado ecuatoriano, es así que el Art. 281 de la Constitución ecuatoriana señala que la soberanía alimentaria constituye un objetivo estratégico y una obligación del Estado para garantizar que las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades alcancen la autosuficiencia de alimentos sanos y culturalmente apropiados de forma permanente.

Uno de los medios por el cual se puede garantizar el cumplimiento de este objetivo es mediante la investigación científica, es así que el Art. 9 de la Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria enuncia que el Estado asegurará y desarrollará la investigación científica y tecnológica en materia agroalimentaria, que tendrá por objeto mejorar la calidad nutricional de los alimentos, la productividad, la sanidad alimentaria, así como proteger y enriquecer la agrobiodiversidad.

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH asume esta responsabilidad en su Plan de investigación ESPOCH 2014 – 2018, en el Área: Ciencias Agrarias, Línea: Gestión sustentable de los recursos naturales y gestión de riesgos, Programa: Manejo del agua y desarrollo del riego tecnificado. Este programa se viene desarrollando en la Facultad de Recursos Naturales, carrera de agronomía.

Este estudio dará apoyo desde el punto de vista físico y matemático a la investigación científica desarrollada en la Facultad de Recursos Naturales para determinar la evapotranspiración en cultivos de papa. Los objetivos de la carrera de Biofísica descritos en la información curricular indican que sus graduados deberán resolver problemas en el campo de la física aplicada en sistemas y procesos biológicos, en instituciones y organismos nacionales e internacionales.

Planteamiento del problema

Es urgente el estudio de los procesos de evapotranspiración, porque su estimación interviene en el cálculo del requerimiento hídrico de los cultivos, en la planificación del riego y en los estudios hidrológicos, y pese a estas bondades en el país no existen suficiente información del fenómeno evapotranspiratorio. La determinación de la evapotranspiración de una manera

sencilla adaptando nuevas tecnologías permitirá alcanzar un avance de la agricultura de precisión y el mejor aprovechamiento de recursos.

Justificación teórica

La obtención de un método para obtener la evapotranspiración a partir de la información procedente de fotografías aéreas en un cultivo de papa relacionado directamente con la información en tierra y para las condiciones del país, es un paso fundamental para la aplicación del riego en agricultura de precisión, además, el presente trabajo será una base para estudios en otras especies vegetales. El trabajo de titulación será ejecutado en colaboración al proyecto de tesis doctoral del Ing. Juan León Ruiz docente de la ESPOCH quien a su vez contribuirá con la asesoría en la parte agronómica de la investigación. Gracias a la colaboración mencionada, este trabajo de titulación es factible.

Justificación práctica

El empleo de nuevos métodos como las fotografías aéreas y satelitales en diversas bandas del espectro electromagnético para evaluar la evapotranspiración y otros parámetros de los cultivos permiten optimizar las labores de riego, aumentando la productividad y la eficiencia en el uso de recursos. Varios métodos han sido desarrollados alrededor del mundo para relacionar la información de las fotografías aéreas o satelitales con la fisiología de los cultivos específicamente con la evapotranspiración, sin embargo estos estudios son poco precisos para el Ecuador debido a que no consideran las condiciones ambientales propias de nuestro territorio.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la evapotranspiración mediante imágenes aéreas en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano para un cultivo de papa *solanum spp.*

Objetivos específicos

Validar el uso de fotografías aéreas para el cálculo de la evapotranspiración en cultivos de papa *solanum spp*, realizando un análisis comparativo con métodos de balance hídrico in situ y con métodos teóricos.

Realizar un ajuste al valor obtenido de la evapotranspiración, relacionando los datos determinados con los datos reales obtenidos por métodos de balance hídrico.

Correlacionar los datos obtenidos con el estado fisiológico de la planta.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes

Desde el inicio de la exploración aeroespacial el interés de conocer los recursos naturales ha sido una tarea que ha desembocado a través de trabajos de investigación en la obtención de métodos y herramientas para el levantamiento de información mediante fotografías en rangos espectrales diversos, y también para relacionar la información fotográfica en ciertas bandas del espectro electromagnético con características físicas y biológicas de vegetales y otros componentes de terrestres, a través de índices de vegetación que de acuerdo al objetivo del estudio se relacionan para formar otros parámetros constituyendo un conjunto de pasos (algoritmo) que permiten calcular procesos vegetales más complejos como la evapotranspiración.

La evapotranspiración ET puede ser determinada experimentalmente, usando lisímetros, por balance hídrico en el suelo, o puede ser estimada a partir de datos meteorológicos con aplicación de ecuaciones, como el Penman-Monteith, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 10 y 89). Sin embargo, dichas determinaciones son válidas para áreas homogéneas y cuando se requiere conocer la ET a escala regional, o sobre grandes áreas, el uso de esas técnicas son prácticamente inaplicables o muy poco exactas. Entonces la aplicación de técnicas de sensoramiento remoto basado en imágenes de satélites se constituye en una alternativa de grandes potencialidades para enfrentar este tipo de requerimientos.

Varias metodologías han sido desarrollados en los últimos años para estimar los requerimientos hídricos de los vegetales, dentro de los cuales se destaca el algoritmo SEBAL (“Surface Energy Balance Algorithm for Land”) que fue desarrollado por Bastiaanssen en 1995 que permite la obtención de la ET a través de datos de imágenes de satélite y algunos datos complementarios de superficie. SEBAL utiliza imágenes captadas por el sensor TM Landsat u otro sensor que capture bandas del espectro visible, infrarrojo y termal.

En 2011 se publicó el trabajo denominado Evapotranspiration – Remote Sensing and Modeling, editado por Ayse Irmak donde se resume una investigación titulada

Evapotranspiration of Grasslands and Pastures in North-Eastern Part of Poland realizado por Daniel Szejba de la Warsaw University of Life Sciences – SGGW de Polonia, donde se hace un análisis comparativo de las estimaciones de evapotranspiración a partir del método de Thornthwaite y el enfoque de coeficiente de cultivo con la fórmula de tipo Penman como la evapotranspiración de referencia, donde se llega a la conclusión de que no hay una diferencia significativa entre los resultados arrojados por los dos métodos (*Penman Monteith* y *Penman Monteith modificado*) de la Región de Warmia, así como la cuenca del río Biebrza medio para todo el período de la vegetación (abril a septiembre). Se sugiere estudiar el potencial de evapotranspiración con los dos métodos mencionados para períodos más cortos y períodos vegetales específicos y el cálculo de coeficientes de cultivo para otros vegetales. Este estudio permite evidenciar que los métodos de estimación en tierra son confiables y pueden ser útiles para validar posteriores estudios.

En 2011 en Perú se publicó un trabajo denominado “Estimación espacial de la evapotranspiración mediante imágenes de satélite Landsat y el modelo SEBAL en el humedal Paraíso – Huacho” de autoría de Erick Garcia y Miguel Ángel Lleellish, donde se demuestra la factibilidad de aplicar el modelo SEBAL y las imágenes de satélite Landsat para estimar espacialmente la evapotranspiración. La comparación de los valores estimados por SEBAL con los obtenidos usando la fórmula FAO Penman-Monteith, incluyendo el empleo del coeficiente de cultivo (K_c), muestran una buena concordancia en la vegetación del humedal y en las áreas agrícolas del valle.

El 8 de Noviembre de 2013, en España se publicó un trabajo denominado Mapping crop water stress index in a ‘Pinot noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle, realizado por Bellvert, Zarco-Tejada, Girona y Fereres en el cual se correlacionó datos en tierra en un viñedo específicamente el potencial hídrico de la hoja (Ψ_L) con el índice de estrés hídrico en el cultivo (CWSI), posteriormente esta correlación se probó con el CWSI obtenido de imágenes aéreas. A un tiempo aproximadamente igual se midió el Ψ_L en 184 plantas y se correlacionó con el CWSI obtenido por imágenes aéreas a diferentes horas en la mañana y en la tarde. Se llegó a la conclusión de que el índice de vegetación (CWSI) obtenido mediante imágenes aéreas fue efectivo evaluando la variabilidad espacial del estrés hídrico en el viñedo estudiado.

1.2 Bases teóricas

1.2.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración es la pérdida de agua que ocurre en una superficie como consecuencia de la combinación de los procesos de evaporación de una superficie evaporante (lagos, ríos, mares, suelo y vegetación mojada) y la transpiración de la planta, tal como se muestra en la Figura 1.1 (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 1). La ET es un parámetro importante en la definición de las necesidades hídricas de los cultivos y por consiguiente en la programación de riego de los cultivos.

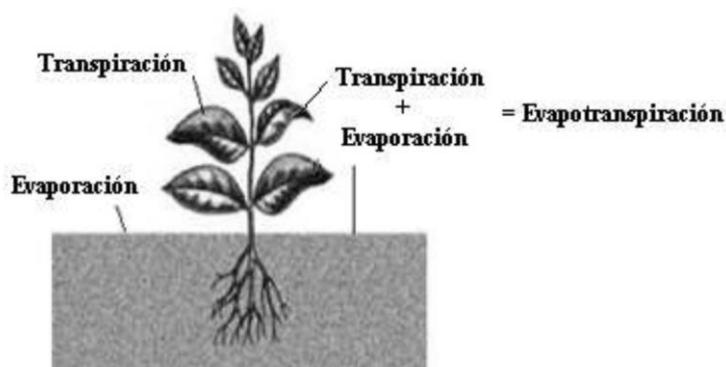


Figura 1-1. Proceso de evapotranspiración.

Fuente: ALLEN, R. P. (2006). EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO. ROMA: BOLETÍN FAO 56.

Se emplea el término ET debido a la dificultad de diferenciar entre los procesos de evaporación y transpiración, los cuales se producen de manera simultánea. El agua que se pierde por transpiración entra a la planta a través de la raíz, pasa al follaje y luego a la atmósfera por medio de la apertura de los estomas. Entre tanto, la pérdida de agua a través de la evaporación se presenta por el paso directo del agua disponible en el suelo a la atmósfera, (Brown, 2000, pág. 1)

- **Evaporación.**

Es el proceso mediante el cual el agua en forma líquida se convierte en vapor de agua y luego se remueve de la superficie evaporante. Para el cambio de estado se requiere energía que proviene en gran medida por la radiación solar y en menor grado por la temperatura del aire. La remoción se presenta como resultado de la diferencia de presión de vapor de agua predominante entre la superficie evaporante y la atmósfera en determinado lugar. Cuando la superficie evaporante es un espejo de agua (lago, laguna, mar, etc) en este proceso sólo intervienen parámetros climatológicos tales como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento; pero, cuando se trata de la superficie del suelo,

a los parámetros anteriormente mencionados se le suman otro tipo de parámetros como el porcentaje de suelo cubierto por una vegetación dada y la cantidad de agua disponible en la superficie evaporante. (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 1)

La velocidad tasa de evaporación depende del grado de saturación de la atmósfera circundante, por tanto, a medida que el aire se satura esta disminuye hasta el punto de no tener la capacidad de retirar el agua de la superficie evaporante, requiriendo un cambio en las condiciones de humedad de la atmósfera que se genera con una restitución del aire saturado. La velocidad de evaporación también puede llegar a ser nula debido a la limitada disponibilidad de agua en el suelo, tal caso es el que se presenta en zonas con prolongados intervalos de sequía y riegos poco frecuentes. (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 1)

- **Transpiración.**

Es el proceso mediante el cual el agua líquida que se encuentra contenida en el espacio intercelular de los estomas se convierte en vapor de agua y pasa a la atmósfera a través de la apertura de estos, (ver Figura 2.1). El agua tomada por la planta a través de las raíces en su mayor parte es transpirada y sólo un bajo porcentaje es empleado en la actividad fisiológica de la misma, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 3)

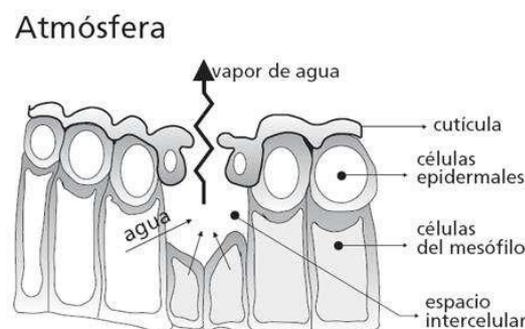


Figura 2-1. Esquemática de un estoma durante el proceso de transpiración.

Fuente: ALLEN, R. P. (2006). EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO. ROMA: BOLETÍN FAO 56.

La transpiración es un proceso vital para las plantas, necesario para enfriar las hojas y transportar agua y nutrientes. Consiste en la emisión de vapor de agua hacia el aire circundante a través de los estomas. La pérdida de agua por transpiración se ve influenciada por la capacidad del suelo para conducir agua hacia las raíces, la salinidad del suelo, la calidad del agua de riego, el tipo de cultivo, estado vegetativo, prácticas de manejo y por los factores que

afectan el proceso de evaporación, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 3). Además, interviene en este proceso la radiación solar. A medida que aumenta la radiación solar, las plantas se calientan, se incrementa el gradiente de presión de vapor entre las hojas y el aire circundante y la resistencia total disminuye y por ende aumenta la transpiración, (Aalsmeer, 2003).

La razón por la que se pierden altas cantidades de agua durante el proceso de transpiración es que las estructuras vegetales están compuestas por átomos de carbono, el cual entra a la planta a través del dióxido de carbono (CO₂) que es obtenido de la atmosfera mediante la apertura de los estomas, elemento por donde se pierde agua hacia la atmosfera, presentando una extensa descripción de la relación fotosíntesis Vs. Transpiración y la manera como intervienen los factores ambientales en el comportamiento de la planta desde el punto de vista fisiológico, (Salisbury, 1992, pág. 1)

1.2.2 Factores que intervienen en la evapotranspiración.

Los factores que intervienen están relacionados con las condiciones climatológicas (radiación solar, flujo de calor, viento, humedad relativa y temperatura) y la relación del sistema suelo-planta. Los factores de clima proporcionan la energía necesaria para vaporizar el agua y extraer el vapor desde una superficie evaporante (suelo o vegetación), (Brown, 2000, pág. 1).

La radiación solar define la cantidad de energía disponible para evaporar el agua, pero hay que tener en cuenta que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar; parte de esta energía se emplea para calentar la atmósfera y el suelo, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 29).

La temperatura juega un papel importante porque el calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo haciendo que a temperaturas altas la ET se incremente y a temperaturas bajas la ET disminuya, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 29).

La humedad del aire contribuye en el proceso de ET. En condiciones de alta humedad la ET es baja, ya que la diferencia de presión del aire circundante y la superficie evapotranspirante disminuye.

El viento influye en la remoción de agua de la superficie evaporante, porque renueva constantemente el aire circundante a la planta. Si no existiera esta sustitución, la velocidad de transpiración disminuye hasta lograr condiciones de equilibrio en el aire circundante, (Esmeral, 2011, pág. 24)

En el sistema suelo-planta, se destacan las condiciones de humedad del suelo y estado fenológico de la planta. La humedad del suelo es el parámetro más importante que interviene en la ET. El tipo de planta está relacionado con la variedad o especie del cultivo y el estado de la planta se relaciona con el tamaño y actividad de crecimiento de la misma. La cantidad de ET producida en un cultivo depende en gran medida de la cobertura del suelo y el área de la hoja expuesta al proceso de transpiración, (Brown, 2000, pág. 2).

1.2.3 Conceptos de evapotranspiración.

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{c aj}). ET_o es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. ET_c requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 7).

Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ET_o. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. No se recomienda el uso de otras denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición. El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ET_o en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia. Los únicos factores que afectan ET_o son los parámetros

climáticos. Por lo tanto, ETo es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de ETo con parámetros climáticos. Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ETo de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Además, se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes, (Allen, Pereira, Raetz, & Smith, 2006, pág. 7).

Evapotranspiración potencial teórica estimada por el método de Thornthwaite

Este método determina la evapotranspiración potencial que es la cantidad máxima teórica, de agua, susceptible a evaporarse desde una superficie totalmente cubierta de vegetación y con un suministro constante de agua. Requiere únicamente datos de temperatura del aire, se basa en la determinación de la energía disponible requerida para el proceso de evapotranspiración. La relación entre el promedio mensual de la temperatura del aire y la evapotranspiración potencial es calculada basada en un estándar de treinta días con doce horas de luz cada día.

Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ETc, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes. La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith. Debido a que todavía existe una considerable falta de información para los diferentes cultivos, el método de Penman-Monteith se utiliza solo para la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia (ETo). La relación ETc/ETo que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como Coeficiente del Cultivo (Kc), y se utiliza para relacionar ETc a ETo de manera que $ETc = Kc * ETo$. Las diferencias en la anatomía de las hojas, características de los estomas, las propiedades aerodinámicas, e incluso el albedo, ocasionan que la evapotranspiración del cultivo difiera de la evapotranspiración del cultivo de referencia bajo las mismas condiciones climáticas. Debido a variaciones en las características del cultivo durante los diferentes

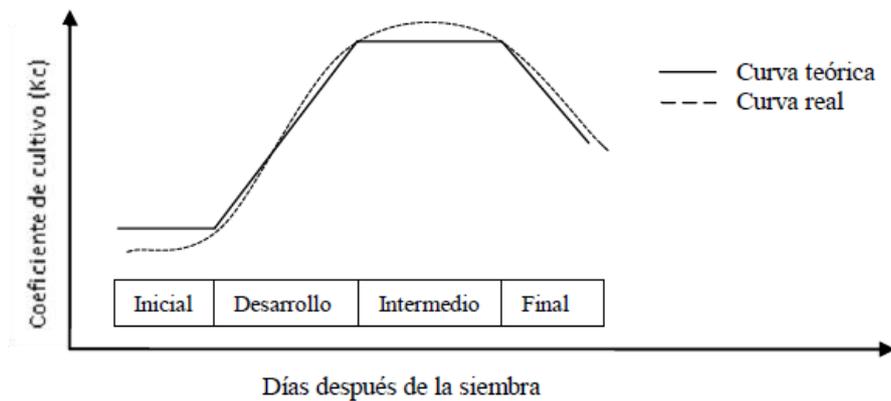


Figura 4-1. Coeficiente de cultivo.

Fuente: ESMERAL, Y. Y. (2011). ANÁLISIS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN EL CULTIVO DE ROSA. BOGOTÁ: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj) se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. Bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ETc debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ETc. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico Ks o ajustando Kc a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 10).

1.2.4 Unidades de evapotranspiración.

Las pérdidas por evapotranspiración se expresan en milímetros (mm) por unidad de tiempo (hora, día, 10 días, mes o año) y definen la cantidad de agua perdida en una superficie cultivada en unidades de altura de agua, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 3) (Brown, 2000, pág. 2). También, esta pérdida de agua se puede expresar en términos de calor latente de vaporización (energía recibida por unidad de área), que es la energía requerida para vaporizar el agua. En la Figura 5-1 se muestran los factores de conversión más utilizados para expresar la ET en diferentes unidades.

Unidades	Altura de agua mm	Volumen por unidad de área		Energía por unidad de área* MJ/(m ² día)
		m ³ /(ha día)	l/(s día)	
1 mm/día	1	10	0.116	2.45
1 m ³ /(ha día)	0.1	1	0.012	0.245
1 l/(s día)	8.640	86.40	1	21.17
1 MJ/(m ² día)	0.4082	4.082	0.047	1
1 W/m ²	0.035271			0.086402

Figura 5-1. Factores de conversión para expresar evapotranspiración.

Fuente: ALLEN, R. P. (2006). EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO. ROMA: BOLETÍN FAO 56.

1.2.5 Determinación de la evapotranspiración

La evapotranspiración no es simple de medir. Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros. Los métodos experimentales de campo, son en general caros, exigiendo precisión en las mediciones, y pueden ser completamente realizados y analizados apropiadamente sólo por personal de investigación suficientemente preparado. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para la evaluación de las estimaciones de ET obtenidas con otros métodos indirectos, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 10).

Métodos de balance de energía y microclimáticos.

La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de calor sensible o de energía radiante. Por ello, el proceso de evapotranspiración es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de energía. La energía que llega a la superficie debe ser la misma a la energía que sale de la superficie en el mismo periodo de tiempo.

Todos los flujos de energía deben ser considerados cuando se deriva una ecuación de balance de energía. La ecuación 1 describe la conservación de energía para una superficie de evaporación:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (1)$$

Donde,

R_n radiación neta,
H calor sensible,
G flujo de calor del suelo, y
λET flujo de calor latente.

Los distintos términos pueden ser positivos o negativos. Cuando R_n es positivo, proporciona energía a la superficie y cuando G, λET y H son positivos retiran energía de la superficie. La

ecuación está restringida a cuatro componentes: R_n , λET , H y G . No se consideran otros términos de energía, tal como el calor almacenado y liberado de la planta, o la energía utilizada en actividades metabólicas. Estos términos solo utilizan una pequeña fracción de la radiación solar diaria y pueden ser considerados despreciables cuando se comparan con los otros cuatro componentes. El flujo de calor latente (λET) representa la fracción de la evapotranspiración que puede ser derivada de la ecuación del balance de energía si todos los otros componentes son conocidos. La radiación neta (R_n) y el flujo de calor del suelo (G) pueden ser medidos o estimados en función de parámetros climáticos. Por el contrario la medición del calor sensible (H) es compleja y sus valores no pueden obtenerse fácilmente. La determinación de H incluye mediciones precisas de los gradientes de temperatura por encima de la superficie, esta ecuación ha sido mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 11).

Otro método para estimar la evapotranspiración es el método de transferencia de masa. Este enfoque considera los movimientos verticales de pequeñas cantidades de aire (remolinos) por encima de una amplia superficie homogénea. Los remolinos tiempo (horas) transportan la materia (vapor de agua) y la energía (calor, momentum) desde y hacia la superficie de evapotranspiración. Asumiendo condiciones de equilibrio y que los coeficientes de transferencia de los remolinos para el vapor de agua son proporcionales a aquellos para el calor y el momentum, la evapotranspiración puede ser calculada a partir de los gradientes verticales de la temperatura del aire y vapor de agua usando la relación de Bowen. Otros métodos de observaciones directas, utilizan gradientes de velocidad del viento y de vapor de agua. Estos métodos y otros como el de la covarianza de remolinos, requieren medidas precisas de la presión de vapor, y de la temperatura del aire o velocidad del viento a diferentes niveles sobre la superficie. Por lo tanto su aplicación se restringe principalmente, a situaciones de investigación, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 12).

Balance de agua en el suelo.

La evapotranspiración también puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo.

Lisímetros.

Si se aísla la zona radicular del cultivo y se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación del balance de agua en el suelo se pueden determinar con apreciable exactitud. Esto se hace en lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. En lisímetros de pesaje de precisión, la evapotranspiración se puede obtener con una exactitud de centésimos de milímetro, donde la pérdida de agua es medida directamente por el cambio de masa y períodos pequeños tales como una hora pueden ser considerados. En lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es medida por un período dado, restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros, de la cantidad total de agua ingresada. Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar). Este requisito no se ha respetado normalmente en muchos estudios de lisimetría y ha dado lugar a datos seriamente desviados y poco representativos de ET_c y K_c . Como los lisímetros son difíciles de manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, su uso se restringe normalmente a trabajos investigativos, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 13).

ET calculada con datos meteorológicos

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, ET se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos. Algunos de los métodos son solamente válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas y no se pueden aplicar bajo condiciones diferentes de las que fueron desarrolladas originalmente. Numerosos investigadores han analizado el funcionamiento de los varios métodos del cálculo para diversas localidades. Como resultado de una Consulta de expertos llevada a cabo en mayo de 1990, el método FAO Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiration de referencia, ET_o . La ET del cultivo bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo (K_c) que relacionan la ET_c con la ET_o . La ET de superficies cultivadas bajo condiciones no estándar se ajusta mediante un coeficiente de estrés hídrico (K_s) o modificando el coeficiente de cultivo, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 13).

ET estimada con el tanque de evaporación

La evaporación de una superficie libre de agua, proporciona un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y del viento en la evapotranspiración.

Sin embargo, diferencias entre la superficie de agua y las superficies cultivadas producen diferencias significativas entre la pérdida de agua de una superficie libre de agua y una superficie cultivada. El tanque ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con ETo, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 78).

1.2.6 Evapotranspiración mediante sensoramiento remoto

Estudios temporales mediante detección remota

La detección remota o teledetección es la adquisición de información sin contacto con el objeto o fenómeno de estudio mediante dispositivos de grabación o escaneo a pequeña o gran escala. Con esta tecnología es posible el estudio de procesos dinámicos mediante estudios multitemporales, sin embargo se debe considerar las limitaciones propias del ciclo orbital de la plataforma, el campo de visión del sensor y otros factores como la nubosidad. Según (Chuvieco, 1998, pág. 1), se puede clasificar en dos casos a los estudios multitemporales:

El caso en el que se busca seguir la evolución fenológica de una determinada cubierta vegetal (cultivada o no) el énfasis se pone en estudiar su contraste estacional en un determinado período (una o varias temporadas). Por el contrario, cuando el objetivo es determinar los cambios producidos entre dos fechas de referencia, de cara a evaluar la dinámica a largo plazo de un determinado fenómeno (crecimiento urbano, deforestación, expansión agrícola, entre otros) las imágenes suelen adquirirse con cierto rango temporal generalmente varios años.

En ocasiones el fin último de estudio es determinar perfiles estacionales en las cubiertas vegetales de interés, habitualmente el análisis se lo hace sobre las distintas fechas de modo simultáneo, lo cual puede aumentar el volumen de cálculo. Ha sido bastante frecuente emplear previamente alguna técnica de compactación como el análisis de componentes principales o los índices de vegetación. De esta forma se puede procesar sólo las bandas con mayor contenido informativo, evitando redundancias innecesarias como lo corrobora Jolly et al y Marsaelli et al ambos citados por (Chuvieco, 1998, pág. 3). Los cambios en la fotorreflectancia a lo largo del ciclo de crecimiento de los cultivos son evidentes y ocurren durante períodos breves (Meneses, 2011, pág. 40).

Evapotranspiración mediante teledetección

El uso de la metodología $ET_c = K_c ET_0$ es el método recomendado para estimar las necesidades hídricas del cultivo desde el punto de vista operacional (Gonzales, 2007, pág. 6), y recomendado también para el cálculo de la ET_c mediante teledetección. Un procedimiento propuesto es la estimación del coeficiente de cultivo K_c a partir de índices de vegetación o parámetros biofísicos.

Índices de vegetación

Los índices de vegetación son combinaciones de valores de reflectancia en diferentes longitudes de onda, con alta sensibilidad a cambios en la vegetación y baja sensibilidad a otra información (atmósfera o suelo) (Poveda, 2010, pág. 12). Estos índices se fundamentan en el alto contraste existente entre el intervalo espectral del rojo (Red) y del infrarrojo cercano (NIR) para la vegetación viva y verde. Existen limitantes debido al efecto distorsionador del suelo y su saturación en valores altos de área foliar. El Índice de Vegetación Normalizado y Diferenciado (NDVI) está definido de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (2)$$

Existen diversas metodologías para estudiar mediante imágenes satelitales los cambios estacionales que ocurren en la vegetación; uno de ellos es la aplicación de índices vegetativos relacionados con el verdor, (Chuvieco, 1998, pág. 3). El NDVI mide la relación entre la energía absorbida y emitida por el objeto de estudio, aplicado a los cultivos, provee valores de intensidad del verdor, y da cuenta de la cantidad de vegetación y su estado de vigor vegetativo, sus valores van de -1 a $+1$. Prácticamente los valores inferiores a $0,1$ corresponden a las superficies acuíferas y a la tierra desnuda, mientras que los valores más altos son indicadores de la actividad fotosintética.

Relación del NDVI con las características estructurales y fisiológicas vegetales.

Las características de absorción de las superficies vegetales se deben principalmente a la clorofila, que para los intereses de la teledetección presenta baja reflectividad en la región del espectro electromagnético del rojo ($0,62-0,7 \mu m$) y alta en el infrarrojo cercano ($0,7-1,1 \mu m$), lo cual se aprovecha por los índices de vegetación (Gonzales, 2007, pág. 62). Existen sin embargo varios pigmentos a más de la clorofila en la hoja que influyen en el espectro de reflectancia y mediante un estudio adecuado se puede conocer la absorbancia espectral de estos pigmentos midiendo la radiación reflejada, en la Figura 6-1. podemos observar la absorbancia de estas

sustancias en el espectro electromagnético. Varios estudios han demostrado que los datos multiespectrales de banda ancha como los que se puede obtener de satélites como el LANDSAT TEMATIC MAPPER son inadecuados para el monitoreo remoto de propiedades bioquímicas de la vegetación (Blackburn, 2006, pág. 856) y que se requiere información de banda estrecha (alta resolución espectral; usualmente de 10 nm o menos) según Broge y Mortensen, ambos citados por (Blackburn, 2006, pág. 857), esta información puede ser obtenida por estudios de espectralradiometría.

Hay que considerar que existen otros factores que influyen el espectro de reflectancia en la vegetación que deben ser también tomados en cuenta. La estructura interna de las hojas, con gran número de discontinuidades refractivas entre paredes celulares y espacios de aire intercelulares dispersa la radiación incidente y permite a una gran proporción de radiación pasar de nuevo a través la epidermis superior para ser observado como radiación reflejada.

Pigmentos, agua y otros productos bioquímicos absorben ciertas longitudes de onda de la radiación lo cual reduce la reflectancia en estas regiones. A causa de la superposición de las características de absorción de todos estos componentes indicados, puede ser difícil relacionar la reflectancia a una simple longitud de onda con una concentración individual de determinado pigmento. Además la reflectancia de la hoja puede variar independientemente de la concentración de pigmentos a causa de diferencias de estructuras internas, características de la superficie (por ejemplo: pelos, ceras) y contenido de humedad. El espectro de reflectancia de todo un dosel está sujeto a incluso más factores de control, en particular al número de hojas, orientación de las hojas, la cobertura del suelo con el dosel, presencia de elementos ajenos a la hoja, zonas de sombra y la reflectancia suelo / arena de la superficie. Este rango de factores a escalas de hoja y dosel, opaca la relación entre la reflectancia espectral y concentraciones individuales de pigmentos (Blackburn, 2006, pág. 857).

Sin embargo se ha podido aprovechar las características reflectivas en conjunto de los componentes de las hojas como se observa en el gráfico dos para la generación de índices de vegetación.

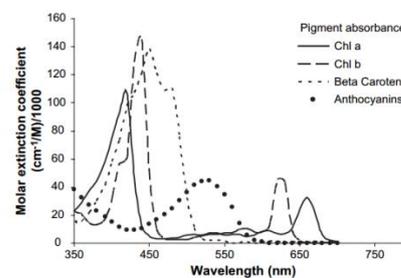


Figura 6-1. Figura 6-1 Espectro de absorción de la mayoría de pigmentos en plantas.

Fuente: BLACKBURN, G. (2006). HYPERSPECTRAL REMOTES ENSING OF PLANT PIGMENTS. JOURNAL OF EXPERIMENTAL BOTANY.

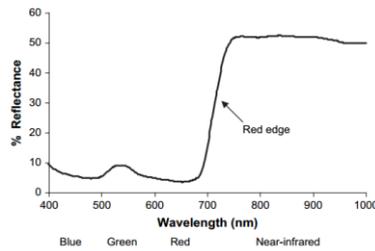


Figura 7-1. Espectro de reflectancia de una típica hoja verde en la región visible e infrarroja cercana del espectro electromagnético.

Fuente: BLACKBURN, G. (2006). HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING OF PLANT PIGMENTS. JOURNAL OF EXPERIMENTAL BOTANY.

Relación NDVI Kc

La ETc puede ser calculado mediante el uso del Kc, definido como la relación entre la ET del cultivo en condiciones óptimas (ETc) y la ET de referencia (ETo). El coeficiente de cultivo está determinado por las características del cultivo, los efectos promedios de la evaporación en el suelo, además considera las fases de crecimiento del cultivo. (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 89)

$$Kc = \frac{ETc}{ETo} \quad (3)$$

Según Wright citado por (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005) el Kc se fracciona en dos coeficientes separados, uno para la transpiración del cultivo (Kcb, coeficiente de cultivo basal) y otro para la evaporación del suelo (Ke). El coeficiente de evaporación del suelo, Ke, representa la componente de evaporación de la ET. Para la determinación del Ke se requiere conocimiento del balance de agua en el suelo. El Kcb representa a la transpiración, donde la componente de evaporación del suelo de la ET es mínima debido a que la superficie del suelo está seca pero se cuenta con una adecuada humedad en la zona radicular del cultivo como lo menciona (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 213):

$$ETc = (Kcb + Ke)ETo \quad (4)$$

Neale et al. citado por (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 213), relacionaron la reflectividad de la cubierta del cultivo con el coeficiente de cultivo basal para maíz, desarrollando una técnica operacional para la estimación de la ET del cultivo. El coeficiente de cultivo basado en reflectividad fue derivado mediante la transformación del índice de vegetación normalizado (NDVI) usando medidas del porcentaje de sombreado y del área foliar para establecer la cobertura efectiva máxima (EFC) y relacionarla con el coeficiente de cultivo

basal. La ecuación obtenida para dos zonas experimentales (Fruita y Greely, Colorado) usando alfalfa como superficie de referencia es (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 213):

$$K_{cb\ NDVI,alf} = 1,181 * NDVI - 0,026 \quad (5)$$

González-Piqueras et al. citados por (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 213), durante las campañas experimentales del proyecto DEMETER, obtuvieron, para maíz la siguiente ecuación para el cálculo del coeficiente de cultivo basal basado en reflectividad a partir del NDVI usando festuca como superficie de referencia:

$$K_{cb\ NDVI,FAO} = 1,37 * NDVI - 0,017 \quad (6)$$

Para poder comparar en la que se ha usado alfalfa como superficie de referencia con la ecuación en la que se ha usado festuca como superficie de referencia transformaron la ecuación 5 multiplicando por un factor de 1.15 los valores Kcb basados en alfalfa pasando a ser valores Kcb basados en festuca, como se describe en ASCE 28 citado por (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 213).

$$K_{cb\ NDVI,FAO} = 1,36 * NDVI - 0,031 \quad (7)$$

La ecuación 5 y la ecuación 7 muestran la relación lineal entre el NDVI y el Kcb. (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218) basándose en la relación lineal existente entre el NDVI y el Kcb proponen la aplicación de la ecuación:

$$K_c = 1,25 * NDVI - 0,2 \quad (8)$$

Para la obtención de un valor operacionalmente aceptable para determinar el Kcb en la fase inicial de desarrollo y media del cultivo, y para la fase final:

$$K_c = 1,5625 * NDVI - 0,05 \quad (9)$$

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO

2.1 Características de equipos experimentales

Equipos para determinar ETc mediante teledetección

- Cuadricóptero de mediana autonomía equipado con una cámara fotográfica de alta resolución marca Canon SX260 HS con un intervalómetro incorporado para la toma secuencial de fotos, con una resolución de 12 megapíxeles y un GPS de 1 m de precisión. Las fotografías fueron tomadas por un sensor RGB modificado que se le ha colocado un filtro de manera que no permita la absorción de la banda del rojo y permita por el contrario la parte del Infrarrojo. Para la obtención de la imagen en el espectro visible se tomó una sesión de fotos con una cámara RGB normal.



Figura 1-2. Cuadricóptero de mediana autonomía equipada con una cámara RGB modificada con un filtro para captar el infrarrojo.

Fuente: : ING. JUAN LEÓN RUIZ (INVENTOR)

- Termómetro infrarrojo Extech de gran amplitud MODELO 42515, termopar tipo k para mediciones con contacto y sin contacto, emisividad regulable, permite medir superficies orgánicas ajustando una emisividad de 0.96.
- Medidor de contenido de clorofila marca Minolta.

Equipos para determinar ETc mediante balance hídrico

- Lisímetros de drenaje contruidos de un tanque de agua de 200 lts de capacidad de uso doméstico y tuberías de drenaje instaladas con válvulas de bola independientes.



Figura 2-2. Fabricación del lisímetro.
Fuente: ING. JUAN LEÓN RUIZ (INVENTOR)



Figura 3-2. Instalación del lisímetro.
Fuente: ING. JUAN LEÓN RUIZ (INVENTOR)

Equipos medidores de tensión de humedad en el suelo

- Tensiómetros (dispositivos porosos llenos de agua conectados a un manómetro de válvula al vacío, sirven para medir el potencial mátrico del suelo) colocados a profundidades de 15, 30 y 45 cm.



Figura 4-2. Tensiómetros colocados junto al lisímetro
Fuente: .. JUAN LEÓN RUIZ (INVENTOR)

Estaciones meteorológicas

- Estación meteorológica portátil que contiene sensores de temperatura entre otros, además se cuenta con un tanque evaporímetro estándar tipo A de 121 cm de diámetro y 25.5 cm de altura colocado a 100 metros del cultivo. Este tanque está construido de hierro galvanizado

y montado a 15 cm del suelo sobre una tarima de madera separada permitiendo la ventilación, es de color blanco de acuerdo a las especificaciones de la FAO.

- Estación meteorológica automática ESPOCH - INER, localizada a una altura de 2840 m.s.n.m., en el campus politécnico de la ciudad de Riobamba a 520 metros del cultivo en estudio. Esta estación cuenta con dos piranómetros SR11-10-Hukseflux, uno de ellos provisto de un anillo de sombra para el registro de radiación difusa, pluviómetro, anemómetro ultrasónico 8500 de marca Vaisalia, barómetro QML 201C de marca Vaisalia, termómetro HMP155 de marca Vaisalia, además de sensores de perfil de temperatura de suelo.



Figura 5-2 Localización de la estación meteorológica automática ESPOCH - INER en relación a las parcelas del estudio instaladas en el campo. La distancia entre los dos puntos es de 520 metros. **Realizado por:** MIGUEL SÁEZ



Figura 6-2. Estación meteorológica automática ESPOCH – INER. La estación provee información en intervalos de una hora de magnitudes como temperatura ambiental, radiación solar, velocidad de viento, entre otras **Realizado Por:** MIGUEL SÁEZ

- Estación Agro meteorológica Facultad de Recursos Naturales ESPOCH - INAMHI, localizada a una altura de 2840 m.s.n.m., en el campus politécnico de la ciudad de Riobamba a 490 metros del cultivo en estudio. Esta estación cuenta con un tanque evaporímetro estándar Tipo A que provee continuamente información de evaporación en un intervalo diario de la zona de estudio, además de otros sensores de temperatura, velocidad de viento, pluviosidad, entre otros.



Figura 7-2. Localización de la Estación Agro meteorológica Facultad de Recursos Naturales ESPOCH - INAMHI en relación a las parcelas del estudio instaladas en el campo. La distancia entre los dos puntos es de 490 metros.

Realizado Por: MIGUEL SÁEZ

2.2 Variables dependientes e independientes

Variable independiente: Imágenes en el espectro visible y del infrarrojo cercano de las parcelas

Variable dependiente: Evapotranspiración

2.3 Tipos y caracterización de pruebas experimentales

El experimento consistió en la siembra del cultivo de papa *solanum spp.*, ubicado en el Centro Experimental del Riego de la Facultad de Recursos Naturales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en la parroquia Licán del cantón Riobamba, provincia de Chimborazo en Ecuador a una altitud de 2833 msnm, en las coordenadas UTM 17M 7582329817776 distribuido en nueve parcelas y el monitoreo aéreo de la ETc durante el ciclo de vida del cultivo. Para la validación del experimento se determinó la ETc a nivel de suelo calculando la ETo mediante la ecuación FAO Penman Monteith y los coeficientes de cultivo Kc tabulados para papa mediante el método propuesto por la FAO.



Figura 8-2. Localización de la zona de estudio.

Fuente: MELO, P. (2015). LEVANTAMIENTO DE FOTOGRAFÍA E ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARCELAS ESPOCH CENTRO EXPERIMENTAL DEL RIEGO. QUITO: DRON AND GIS.



Figura 9-2. Cultivo sembrado, instalado el sistema de riego y colocado postes de referencia.

Fuente: ING. JUAN LEÓN RUIZ

La recolección, organización y procesamiento de datos:

Esta prueba tiene como finalidad obtener un mapa de ET_c instantánea como resultado de la aplicación de la ecuación 3 mencionada en (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 89):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (3)$$

La ET_o de la región de estudio fue obtenida gracias a la colaboración con la estación agrometeorológica de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH quienes proveyeron los valores de evaporación del Tanque Evaporímetro Tipo A (E_{pan}), para posteriormente calcular la ET_o mediante la aplicación de la ecuación 11.

Tanque evaporímetro tipo A

El tanque tipo A nos permite determinar la evaporación en forma manual en unidades de mm/día, cuyo valor se utiliza en la fórmula mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 79):

$$ET_o = K_p * E_{pan} \quad (11)$$

Donde

- ET_o evapotranspiración de referencia [mm día^{-1}],
- K_p coeficiente del tanque evaporímetro [-],
- E_{pan} evaporación del tanque evaporímetro [mm día^{-1}].

Para la determinación del coeficiente del tanque evaporímetro se tomó en cuenta las características del tanque: color plateado, de dimensiones como lo indica la imagen, y la

ubicación considerando que el tanque se encontraba sobre barbecho y alejado a 1000 metros del cultivo, la humedad relativa y la velocidad del viento de acuerdo a las especificaciones descritas por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006).

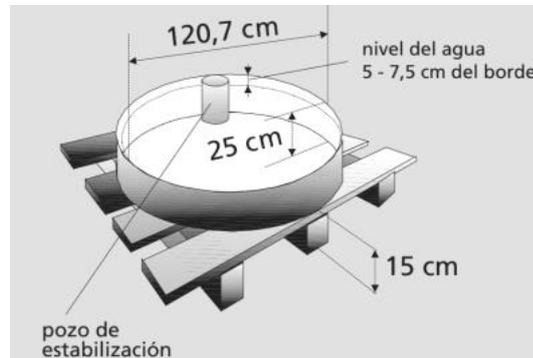


Figura 10-2. Descripción del tanque clase A.

Fuente: ALLEN, R. P. (2006). EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO. ROMA: BOLETÍN FAO 56.

La tasa evaporativa de los tanques de evaporación llenos de agua puede ser fácilmente obtenida. En ausencia de lluvia, la cantidad de agua evaporada durante un período (mm día⁻¹) corresponde a la disminución de la altura de agua en el tanque en ese período. Los tanques proporcionan una medida del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua. Aunque el tanque evaporímetro responde de una manera similar a los mismos factores climáticos que afectan la transpiración del cultivo, varios factores producen diferencias significativas en la pérdida de agua de una superficie libre evaporante y de una superficie cultivada. La reflexión de la radiación solar del agua en el tanque puede ser diferente del 23% asumido para el cultivo de referencia. El almacenaje de calor dentro del tanque puede ser apreciable y puede causar una significativa evaporación durante la noche mientras que la mayoría de los cultivos transpiran solamente durante el día. También se distinguen diferencias en la turbulencia, temperatura y humedad del aire que se encuentran inmediatamente sobre estas dos superficies. La transferencia de calor a través de las paredes del tanque también afecta el balance energético. A pesar de la diferencia en los procesos ligados a la evaporación del tanque y la evapotranspiración de superficies cultivadas, el uso de la evaporación del tanque para predecir la ETo para períodos de 10 días puede ser considerado confiable si se usa correctamente (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 78 y 79).

Se obtuvo los valores de ETo para los meses estudiados mostrados en la tabla 1-2.

Tabla 1-2. Valores de ETo calculados para los meses estudiados

ETo Tanque evaporímetro tipo A Estación Recursos Naturales ESPOCH			
17 de abril	17 de mayo	15 de junio	17 de julio:
3,81	2,96	4,10	4,14

Fuente: ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA FACULTAD DE RECURSOS NATURALES ESPOCH

Obtención del coeficiente de cultivo

El Kc fue obtenido mediante la aplicación de la ecuación 8 (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218):

$$K_c = 1,25 * NDVI - 0,2 \quad (8)$$

Para la obtención de un valor operacionalmente aceptable para determinar el Kc en la fase inicial de desarrollo y media del cultivo; y para la fase final se aplicó la ecuación 9 (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218):

$$K_c = 1,5625 * NDVI - 0,05 \quad (9)$$

Se empleó el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI), obtenido de la ecuación 2:

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (2)$$

Dónde NIR y RED son las reflectancias en el Infrarrojo cercano y en la banda del rojo. Para la obtención de las bandas NIR y RED, se realizaron tomas fotográficas del cultivo en estos rangos del espectro electromagnético. La empresa Dron and GIS, estuvo a cargo de generar un set de fotos aéreas con geolocalización (geotagged) de las parcelas, correspondientes a diferentes fases del cultivo (1 mensual), las tomas fueron hechas el 17 de abril, 17 de mayo, 15 de junio y 17 de julio de 2015, a las 10 horas. Se generó un orto foto mosaico de la zona de estudio para cada toma mensual, además de un modelo digital de superficie a partir de los datos de cada toma mensual

Con esta información se realizó el cálculo de un mapa de NDVI de las parcelas de estudio mediante una combinación de bandas NIR y RED en ARCGIS según la ecuación 2, y con este mapa a su vez se obtuvo el mapa de Kc aplicando la ecuación 8 y 9. Posteriormente se combinó el Kc con la ETo según la ecuación 3 y se obtuvo un mapa de ETc empleando ARCGIS, con lo cual cumplimos el primer objetivo del presente trabajo experimental.

2.3.2 Pruebas experimentales para determinar la ETc mediante información proveniente de lisímetro de drenaje, tanque evaporímetro tipo A e información meteorológica.

El objetivo del trabajo fue emplear la información recogida al dar seguimiento a los tratamientos y repeticiones empleados para determinar el requerimiento hídrico de la parcela para determinar la ETc a nivel de suelo, sin embargo se presentó dificultades como la ruptura de un lisímetro, y datos inconsistentes en los lisímetros restantes que imposibilitó el uso de esta información. Estos métodos son:

Tratamiento 1: Reposición de la lámina de riego mediante la utilización del Lisímetro de drenaje, con tres repeticiones.

Tratamiento 2: Reposición de la lámina de riego mediante la utilización del Tanque evaporímetro tipo A, con tres repeticiones.

Tratamiento 3: Reposición de la lámina de riego mediante la utilización de Fórmulas empíricas, con tres repeticiones.

La distribución de estos tratamientos en la parcela se describe en la figura 18-2.



Figura 11-2. Ortofotomosaico de la parcela estudiada, las etiquetas hacen referencia al número de tratamiento y a la repetición asignada

FUENTE: MELO, P. (2015). LEVANTAMIENTO DE FOTOGRAFÍA E ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARCELAS ESPOCH CENTRO EXPERIMENTAL DEL RIEGO. QUITO: DRON AND GIS.

Para superar este inconveniente se recurrió a un procedimiento alternativo empleando la ecuación FAO Penman Monteith con los datos de la estación meteorológica automática ESPOCH-INER para la obtención de ET_0 y se empleó datos tabulados de K_c , para posteriormente aplicar la ecuación 3 mencionada en (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 89) y determinar la ET_c del cultivo.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (3)$$

Información meteorológica

La ecuación de FAO Penman-Monteith es una representación clara, precisa y simple de los factores físicos y fisiológicos que gobiernan el proceso de la evapotranspiración, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 25), fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activa y adecuadamente regado. Empleamos la ecuación 12 mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 25) para determinar la ET_0 :

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)} \quad (12)$$

Donde:

ET_0	evapotranspiración de referencia (mm día ⁻¹)
R_n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
R_a	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) constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)

Los métodos para calcular la evapotranspiración partiendo de datos meteorológicos requieren de varios parámetros climatológicos y físicos. Algunos de estos parámetros se miden directamente en estaciones meteorológicas. Otros parámetros se relacionan con los datos comúnmente medidos y se pueden derivar con la ayuda de relaciones directas o empíricas mencionado por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 29).. Usando la definición de ETo sobre la que se basa la ecuación FAO Penman-Monteith, se pueden determinar los coeficientes del cultivo relacionando la evapotranspiración medida del cultivo (ETc) con la ETo calculada, es decir: $K_c = ET_c/ETo$. (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 25).

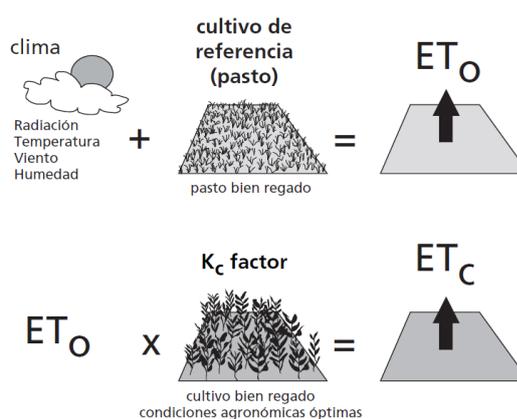


Figura 12-2. Conceptos de evapotranspiración.

Fuente: ALLEN, R. P. (2006). EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO. ROMA: BOLETÍN FAO 56.

Para llevar adelante cálculos diarios, semanales, de diez días o mensuales de ETo, además de la localización del sitio (altura sobre el nivel del mar (m) de la zona para la que se determina la ETo y su latitud (grados norte o sur)), la ecuación FAO Penman-Monteith requiere datos de temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 27). A partir de la altura sobre el nivel del mar calculamos la presión atmosférica y con este dato a su vez la constante psicométrica mediante la ecuación mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 31):

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} \quad (13)$$

Donde

- γ constante psicométrica [kPa °C-1],
- P presión atmosférica [kPa],
- λ calor latente de vaporización, 2,45 [MJ kg-1],
- c_p calor específico a presión constante, 1,013 x 10⁻³ [MJ kg-1 °C-1],
- ϵ cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622.

Temperatura

Para la aplicación de la fórmula FAO Penman-Monteith, se requiere información de temperatura diaria (promedio) máxima y mínima en grados Celcius ($^{\circ}\text{C}$) (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 27). Debido a la relación no lineal de la humedad con la temperatura, ambas incluidas en la ecuación FAO Penman-Monteith, la presión de vapor para cierto periodo se debe calcular como la media entre la presión de vapor bajo la temperatura máxima y la presión de vapor bajo la temperatura mínima del aire en ese periodo. La temperatura máxima diaria del aire (T_{max}) y la temperatura mínima diaria del aire (T_{min}) son, respectivamente, la máxima y la mínima temperatura del aire observadas durante un periodo de 24 horas, desde la medianoche. T_{max} y T_{min} por periodos más largos tales como semanas, diez días o meses se obtienen dividiendo la suma de los valores diarios respectivos por el número de días del periodo. La temperatura media diaria del aire (T_{media}) se emplea en la ecuación FAO Penman-Monteith solamente para calcular la pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor (Δ) y del impacto de la densidad media del aire (P_a) pues el efecto de las variaciones de temperatura en el valor de estos parámetros climáticos es pequeño. Para la estandarización, T_{media} para periodos de 24 horas se define como el promedio de las temperaturas máxima (T_{max}) y mínima diaria (T_{min}) en lugar del promedio de las mediciones horarias de temperatura (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 32).

Humedad

El valor de la presión real (promedio) diaria de vapor, (e_a), en kilopascales (kPa) se requiere como dato de entrada para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith. En caso de que los valores de presión real de vapor no estén disponibles, estos pueden ser derivados de la humedad relativa máxima y mínima (%), de los datos psicrométricos (temperaturas de bulbo seco y mojado en $^{\circ}\text{C}$) o de la temperatura del punto de rocío ($^{\circ}\text{C}$) (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 27). En el presente trabajo empleamos las ecuaciones siguientes para la obtención del déficit de presión de vapor:

Presión media de vapor de la saturación (e_s)

La presión de saturación de vapor puede ser calculada en función de la temperatura del aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa como lo indica (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 36):

$$e^0(T) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right] \quad (14)$$

Donde

$e^{\circ}(T)$ presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T [kPa]

T temperatura del aire [°C]

exp [...] 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [...]

Debido a la característica no-lineal de la ecuación anterior, la presión media de saturación de vapor para un día, semana, década o mes, debe ser calculada como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima media y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media del aire para ese periodo se determina como lo indica (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 36):

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} \quad (15)$$

El uso de la temperatura media del aire en lugar de las temperaturas mínima y máxima da lugar a subestimaciones de la presión media de saturación de vapor. El correspondiente déficit de presión de vapor (un parámetro que expresa la energía evaporante de la atmosfera) también será menor y el resultado será una cierta subestimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia. Por lo tanto, es siempre recomendable el calcular la presión media de saturación de vapor como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima y a la temperatura mínima del aire.

Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ)

La pendiente de la curva a una temperatura dada se da como lo menciona (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 36):

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (16)$$

Para el cálculo de la presión real de vapor empleamos la ecuación mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 38):

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{max}) \frac{HR_{max}}{100} + e^{\circ}(T_{min}) \frac{HR_{min}}{100}}{2} \quad (17)$$

Donde

e_a presión real de vapor [kPa]

$e^{\circ}(T_{min})$ presión de saturación de vapor a la temperatura mínima diaria [kPa]

$e^{\circ}(T_{\max})$	presión de saturación de vapor a la temperatura máxima diaria [kPa]
HR _{max}	humedad relativa máxima [%]
HR _{min}	humedad relativa mínima [%].

Radiación

La radiación neta diaria (promedio) está expresada en megajoules por metro cuadrado por día ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) medida con un piranómetro o de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas por día) medida con el heliógrafo (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 27). Para determinar la radiación neta seguimos en procedimiento que describimos a continuación:

Radiación neta (R_n)

La radiación neta (R_n) es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}) como lo indica (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 53):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (18)$$

La R_{ns} se calcula empleando la ecuación mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 51):

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (19)$$

Donde

R_{ns}	radiación neta solar o de onda corta [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$],
α	albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0,23 para el cultivo hipotético de referencia [adimensional],
R_s	radiación solar entrante [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$].

La radiación solar entrante es obtenida como promedio de los valores de radiación solar global medidos por el piranómetro en las horas de insolación máxima diurna para la latitud correspondiente a la zona y los meses de estudio ($N= 12$ horas) considerando que la radiación global está definida como la radiación solar recibida de un ángulo sólido de 2π estereorradianes sobre una superficie horizontal. Si no se cuenta con mediciones directas de radiación solar, R_s , esta puede ser calculada a través de la aplicación de la fórmula de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación como lo menciona (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 50):

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (20)$$

Donde

- Rs radiación solar o de onda corta [MJ m-2 día-1],
n duración real de la insolación [horas],
N duración máxima posible de la insolación [horas],
n/N duración relativa de la insolación[-],
Ra radiación extraterrestre [MJ m-2 día-1],
as constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados (n = 0),
as+ bs fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados (n = N).

En casos en que no disponga de datos reales de radiación solar y cuando no se han realizado calibraciones previas a la ecuación mencionada, se recomienda usar valores de as= 0,25 y de bs = 0,50.

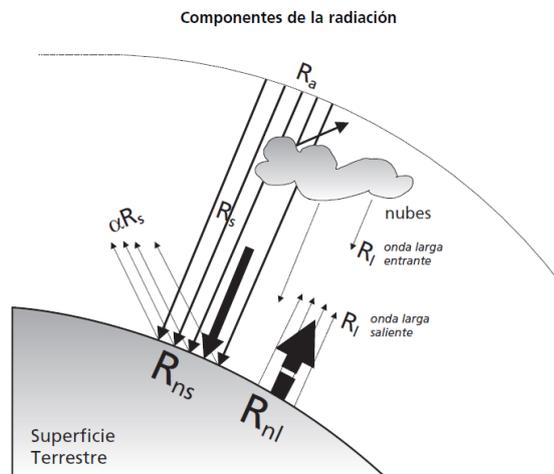


Figura 13-2. Componentes de la radiación.

Fuente: ALLEN, R. P. (2006). EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO. ROMA: BOLETÍN FAO 56. PAG 44

La Rnl por su parte se calcula por medio de la ecuación mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 52):

$$Rnl = \sigma \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (21)$$

Donde

Rnl	radiación neta de onda larga [MJ m ⁻² día ⁻¹],
σ	constante de Stefan-Boltzmann [4,903 x 10 ⁻⁹ MJ K ⁻⁴ m ⁻² día ⁻¹],
Tmax,K	temperatura máxima absoluta en un periodo de 24 horas[K = °C
+273,16],	
Tmin,K	temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas
	[K = °C + 273,16],
ea	presión de vapor real [kPa],
Rs/Rso	radiación relativa de onda corta (valores ≤ 1,0),
Rs	radiación solar medida o calculada [MJ m ⁻² día ⁻¹],
Rso	radiación en un día despejado [MJ m ⁻² día ⁻¹].

Comúnmente, en la ecuación de Stefan-Boltzmann se utiliza el promedio de la temperatura máxima del aire elevada a la cuarta potencia y de la temperatura mínima del aire elevada a la cuarta potencia para periodos de 24 horas. El termino $(0,34 - 0,14\sqrt{e_a})$ expresa la corrección para la humedad del aire, y será más pequeño con valores más elevados de humedad. El efecto de la nubosidad se expresa por $(1,35 (Rs/Rso) - 0,35)$. El término llega a ser más pequeño con mayor nubosidad y por lo tanto Rs disminuye. Cuantos más pequeños son los términos de corrección, más pequeño es el flujo saliente neto de radiación de onda larga.

La Rso por su parte se calculó mediante la ecuación indicada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 51):

$$Rso = (0,75 + 2 * 10^{-5}z)Ra \quad (22)$$

Donde

z	elevación de la estación sobre el nivel del mar [m].
Ra	radiación extraterrestre

La radiación extraterrestre la obtenemos de la figura 21-2. (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 217).

Radiación extraterrestre diaria (R_a) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes¹

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad (\text{Ec. 21})$$

(valores en MJ m² día⁻¹)²

Hemisferio Norte												Lat.	Hemisferio Sur											
Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic	grad.	Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic
0,0	2,6	10,4	23,0	35,2	42,5	39,4	28,0	14,9	4,9	0,1	0,0	70	41,4	28,6	15,8	4,9	0,2	0,0	0,0	2,2	10,7	23,5	37,3	45,3
0,1	3,7	11,7	23,9	35,3	42,0	38,9	28,6	16,1	6,0	0,7	0,0	68	41,0	29,3	16,9	6,0	0,8	0,0	0,0	3,2	11,9	24,4	37,4	44,7
0,6	4,8	12,9	24,8	35,6	41,4	38,8	29,2	17,3	7,2	1,5	0,1	66	40,9	30,0	18,1	7,2	1,5	0,1	0,5	4,2	13,1	25,4	37,6	44,1
1,4	5,9	14,1	25,8	35,9	41,2	38,8	30,0	18,4	8,5	2,4	0,6	64	41,0	30,8	19,3	8,4	2,4	0,6	1,2	5,3	14,4	26,3	38,0	43,9
2,3	7,1	15,4	26,6	36,3	41,2	39,0	30,6	19,5	9,7	3,4	1,3	62	41,2	31,5	20,4	9,6	3,4	1,2	2,0	6,4	15,5	27,2	38,3	43,9
3,3	8,3	16,6	27,5	36,6	41,2	39,2	31,3	20,6	10,9	4,4	2,2	60	41,5	32,3	21,5	10,8	4,4	2,0	2,9	7,6	16,7	28,1	38,7	43,9
4,3	9,6	17,7	28,4	37,0	41,3	39,4	32,0	21,7	12,1	5,5	3,1	58	41,7	33,0	22,6	12,0	5,5	2,9	3,9	8,7	17,9	28,9	39,1	44,0
5,4	10,8	18,9	29,2	37,4	41,4	39,6	32,6	22,7	13,3	6,7	4,2	56	42,0	33,7	23,6	13,2	6,6	3,9	4,9	9,9	19,0	29,8	39,5	44,1
6,5	12,0	20,0	30,0	37,8	41,5	39,8	33,2	23,7	14,5	7,8	5,2	54	42,2	34,3	24,6	14,4	7,7	4,9	6,0	11,1	20,1	30,6	39,9	44,3
7,7	13,2	21,1	30,8	38,2	41,6	40,1	33,8	24,7	15,7	9,0	6,4	52	42,5	35,0	25,6	15,6	8,8	6,0	7,1	12,2	21,2	31,4	40,2	44,4
8,9	14,4	22,2	31,5	38,5	41,7	40,2	34,4	25,7	16,9	10,2	7,5	50	42,7	35,6	26,6	16,7	10,0	7,1	8,2	13,4	22,2	32,1	40,6	44,5
10,1	15,7	23,3	32,2	33,8	41,8	40,4	34,9	26,6	18,1	11,4	8,7	48	42,9	36,2	27,5	17,9	11,1	8,2	9,3	14,6	23,3	32,8	40,9	44,5
11,3	16,9	24,3	32,9	39,1	41,9	40,6	35,4	27,5	19,2	12,6	9,9	46	43,0	36,7	28,4	19,0	12,3	9,3	10,4	15,7	24,3	33,5	41,1	44,6
12,5	18,0	25,3	33,5	39,3	41,9	40,7	35,9	28,4	20,3	13,9	11,1	44	43,2	37,2	29,3	20,1	13,5	10,5	11,6	16,8	25,2	34,1	41,4	44,6
13,8	19,2	26,3	34,1	39,5	41,9	40,8	36,3	29,2	21,4	15,1	12,4	42	43,3	37,7	30,1	21,2	14,6	11,6	12,8	18,0	26,2	34,7	41,6	44,6
15,0	20,4	27,2	34,7	39,7	41,9	40,8	36,7	30,0	22,5	16,3	13,6	40	43,4	38,1	30,9	22,3	15,8	12,8	13,9	19,1	27,1	35,3	41,8	44,6
16,2	21,5	28,1	35,2	39,9	41,8	40,8	37,0	30,7	23,6	17,5	14,8	38	43,4	38,5	31,7	23,3	16,9	13,9	15,1	20,2	28,0	35,8	41,9	44,5
17,5	22,6	29,0	35,7	40,0	41,7	40,8	37,4	31,5	24,6	18,7	16,1	36	43,4	38,9	32,4	24,3	18,1	15,1	16,2	21,2	28,8	36,3	42,0	44,4
18,7	23,7	29,9	36,1	40,0	41,6	40,8	37,6	32,1	25,6	19,9	17,3	34	43,4	39,2	33,0	25,3	19,2	16,2	17,4	22,3	29,6	36,7	42,0	44,3
19,9	24,8	30,7	35,5	40,0	41,4	40,7	37,9	32,8	26,6	21,1	18,5	32	43,3	39,4	33,7	26,3	20,3	17,4	18,5	23,3	30,4	37,1	42,0	44,1
21,1	25,8	31,4	36,8	40,0	41,2	40,6	38,0	33,4	27,6	22,2	19,8	30	43,1	39,6	34,3	27,2	21,4	18,5	19,6	24,3	31,1	37,5	42,0	43,9
22,3	26,8	32,2	37,1	40,0	40,9	40,4	38,2	33,9	28,5	23,3	21,0	28	43,0	39,8	34,8	28,1	22,5	19,7	20,7	25,3	31,8	37,8	41,9	43,6
23,4	27,8	32,8	37,4	39,9	40,6	40,2	38,3	34,5	29,3	24,5	22,2	26	42,8	39,9	35,3	29,0	23,5	20,8	21,8	26,3	32,5	38,0	41,8	43,3
24,6	28,8	33,5	37,6	39,7	40,3	39,9	38,3	34,9	30,2	25,5	23,3	24	42,5	40,0	35,8	29,8	24,6	21,9	22,9	27,2	33,1	38,3	41,7	43,0
25,7	29,7	34,1	37,8	39,5	40,0	39,6	38,4	35,4	31,0	26,6	24,5	22	42,2	40,1	36,2	30,6	25,6	23,0	24,0	28,1	33,7	38,4	41,4	42,6
26,8	30,6	34,7	37,9	39,3	39,5	39,3	38,2	35,8	31,8	27,7	25,6	20	41,9	40,0	36,6	31,3	26,6	24,1	25,0	28,9	34,2	38,6	41,2	42,1
27,9	31,5	35,2	38,0	39,0	39,1	38,9	38,2	36,1	32,5	28,7	26,8	18	41,5	40,0	37,0	32,1	27,5	25,1	26,0	29,8	34,7	38,7	40,9	41,7
28,9	32,3	35,7	38,1	38,7	38,6	38,5	38,1	36,4	33,2	29,6	27,9	16	41,1	39,9	37,2	32,8	28,5	26,2	27,0	30,6	35,2	38,7	40,6	41,2
29,9	33,1	36,1	38,1	38,4	38,1	38,1	38,0	36,7	33,9	30,6	28,9	14	40,6	39,7	37,5	33,4	29,4	27,2	27,9	31,3	35,6	38,7	40,2	40,6
30,9	33,8	36,5	38,0	38,0	37,6	37,6	37,8	36,9	34,5	31,5	30,0	12	40,1	39,6	37,7	34,0	30,2	28,1	28,9	32,1	36,0	38,6	39,8	40,0
31,9	34,5	36,9	37,9	37,6	37,0	37,1	37,5	37,1	35,1	32,4	31,0	10	39,5	39,3	37,8	34,6	31,1	29,1	29,8	32,8	36,3	38,9	39,3	39,4
32,8	35,2	37,2	37,8	37,1	36,3	36,5	37,2	37,2	35,6	33,3	32,0	8	38,9	39,0	37,9	35,1	31,9	30,0	30,7	33,4	36,6	38,4	38,8	38,7
33,7	35,8	37,4	37,6	36,6	35,7	35,9	36,9	37,3	36,1	34,1	32,9	6	38,3	38,7	38,0	35,6	32,7	30,9	31,5	34,0	36,8	38,2	38,2	38,0
34,6	36,4	37,6	37,4	36,0	35,0	35,3	36,5	37,3	36,6	34,9	33,9	4	37,6	38,3	38,0	36,0	33,4	31,8	32,3	34,6	37,0	38,0	37,6	37,2
35,4	37,0	37,8	37,1	35,4	34,2	34,6	36,1	37,3	37,0	35,6	34,8	2	36,9	37,9	38,0	36,4	34,1	32,6	33,1	35,2	37,1	37,7	37,0	36,4
36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6	0	36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6

¹ Los valores de R_a durante el día 15^{vo} del mes, proveen una buena estimación (error <1%) de R, promediada de todos los días del mes. Solamente en casos de latitudes muy elevadas (mayores a 55° N o S) y durante los meses invernales, las desviaciones podrían ser mayores al 1%.
² Los valores pueden ser convertidos a sus equivalentes en mm día⁻¹ si se dividen por Lambda = 2,45.

Figura 14-2. Radiación extraterrestre diaria para diferentes latitudes para el 15avo día del mes.

Fuente: ALLEN, R. P. (2006). EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO. ROMA: BOLETÍN FAO 56 PAG 217

Velocidad de viento

Para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith se requiere contar con la velocidad del viento (promedio) diaria en metros por segundo (ms⁻¹) medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo. Es importante verificar la altura a la cual se mide la velocidad del viento, pues velocidades del viento medidas a diversas alturas sobre la superficie del suelo presentan con seguridad valores diferentes (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 27 y 28).

En el presente trabajo se transformó el valor de velocidad de viento mediante el uso de la ecuación mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 56):

$$u_z = u_z \left(\frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \right) \quad (23)$$

Donde

- u₂ velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m s⁻¹],
- u_z velocidad del viento medida a z m sobre la superficie [m s⁻¹],
- z altura de medición sobre la superficie [m].

Cálculo de ETo para periodos de un día

El cálculo de la ETo usando la ecuación de Penman-Monteith para periodos de tiempo de 24 horas proporcionara generalmente resultados precisos. Los datos meteorológicos requeridos son los siguientes (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 72):

- Temperatura del aire: Temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin) diaria.
- Humedad del aire: el promedio diario de la presión real de vapor (ea) derivada de lecturas psicométricas, de la temperatura del punto de condensación o de los datos de humedad relativa.
- Velocidad del viento: valores promedio diarios para 24 horas de la velocidad diaria del viento medida a una altura de 2 m (u_2).
- Radiación: Radiación neta diaria (R_n) medida o calculada de la radiación solar de onda corta y de la radiación de onda larga o de la duración real de las horas diarias de insolación (n). Como la magnitud del flujo diario de calor del suelo (G) debajo de la superficie de referencia es relativamente pequeña, esta puede ser ignorada en cálculos diarios (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 72).

CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ETc)

Finalmente para la determinación de valores a nivel de suelo de ETc se recurrió al empleo de datos tabulados del coeficiente de cultivo Kc obtenidos de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) por medio de su manual “Evapotranspiración de cultivo, Guías para la determinación de requerimientos de agua de los cultivos”.

La evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando ETo por Kc el cual es un coeficiente que expresa la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la superficie del pasto de referencia. Esta diferencia puede ser combinada dentro de un coeficiente único o integrado del cultivo, o puede ser separada en dos factores que describen por separado las diferencias en evaporación y transpiración entre las dos superficies. La selección del procedimiento a seguir dependerá del propósito del cálculo, la precisión requerida, la disponibilidad de datos climáticos y la escala temporal bajo la cual se realizan los cálculos (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 97 y 98).

Coefficiente 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. Debido a que el coeficiente único K_c representa un promedio de la evaporación en el suelo y la transpiración, este procedimiento se utiliza para estimar ET_c para períodos de tiempo semanales o mayores, a pesar de que los cálculos puedan realizarse a nivel diario. El coeficiente único K_c promediado en el tiempo se utiliza para estudios a nivel de planificación y para el diseño de sistemas de riego donde sea razonable y pertinente considerar los efectos promedios del humedecimiento del suelo. Este es el caso de los sistemas de riego por superficie y aspersión donde el intervalo entre riegos sucesivos es de varios días, generalmente de diez o más días. Por lo tanto, para un manejo típico del riego, es válido aplicar el procedimiento del coeficiente único, K_c , promediado temporalmente, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 98) .

Durante el período 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 ($K_{c\text{ fin}}$), (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 109)

Valores tabulados de K_c

En la Figura 22-2 se incluyen valores típicos de $K_{c\text{ ini}}$, $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$ correspondientes a distintos cultivos. Los coeficientes presentados son organizados en grupos (ej. hortalizas pequeñas, leguminosas, cereales, etc.) con la finalidad de facilitar la localización del cultivo en el cuadro y para ayudar a comparar cultivos pertenecientes a un mismo grupo. Generalmente, los coeficientes para los miembros de un mismo grupo son parecidos, debido a la similitud de la altura de los cultivos, área foliar, grado de cobertura del suelo y manejo del agua. Los coeficientes integran los efectos de la transpiración y la evaporación en el tiempo.

El efecto de esta integración en el tiempo representa una frecuencia de humedecimiento promedio para un cultivo «estándar» bajo condiciones típicas de desarrollo bajo riego. Los valores de K_c durante la etapa inicial y de desarrollo del cultivo dependerán de la gran diversidad de frecuencias de humedecimiento del suelo, por lo que se requerirá de ajustes al valor de K_c ini considerado. Para condiciones de humedecimiento frecuente tal como en los casos de riego por aspersión de alta frecuencia o lluvias, los valores de K_c ini pudieran ser incrementados sustancialmente, (Allen, Pereira, Raetz, & Smith, 2006, pág. 109). Hemos empleado los valores de coeficiente de cultivo presentados en la Figura 22-2 para la papa, las condiciones ambientales para las cuales están determinados esos valores deberán ser considerados en el análisis de la información.

Valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo, K_c y alturas medias máximas de las plantas para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ($HR_{min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$) para usar en la fórmula de la FAO Penman-Monteith ET_c .

Cultivo	$K_{c\ ini}^1$	$K_{c\ med}$	$K_{c\ fin}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
Remolacha, mesa		1,05	0,95	0,4
Yuca o Mandioca – año 1	0,3	0,80 ²	0,30	1,0
– año 2	0,3	1,10	0,50	1,5
Chirivía	0,5	1,05	0,95	0,4
Patata o Papa		1,15	0,75	0,6
Camote o Batata		1,15	0,65	0,4
Nabos (Rutabaga)		1,10	0,95	0,6
Remolacha Azucarera	0,35	1,20	0,70	0,5

Figura 15-2. Coeficientes de cultivo tabulados para usar en la fórmula FAO Penman Monteith para ciertos cultivos.

Fuente: ALLEN, R. P. (2006). EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO. ROMA: BOLETÍN FAO 56.

2.3.3 Obtención de la ET potencial (teórica) método de Thorntwaite

Se empleó la ecuación (Monsalve, 1995, pág. 166):

$$U_j = \left(\frac{10 T_j}{I}\right)^a \times 1,6 \times K_a \quad (24)$$

Donde:

U_j evapotranspiración potencial mensual del mes j, ajustada (cm),

T_j temperatura media mensual del mes j, °C

I índice de calor

$$I = \sum_{i=1}^{12} i_j \quad (25)$$

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5}\right)^{1,514} \quad (26)$$

Donde

a ecuación cúbica de la forma:

$$a = 6,75E - 7 * I^3 - 7,71E - 5 * I^2 + 1,79E - 2 * I + 0,492 \quad (27)$$

Los valores de U_j deben ser ajustados a la longitud del día y al número de días en el mes. Debido a dicho ajuste, los valores de U_j obtenidos deben ser multiplicados por el factor de correlación K_a , el cual se presenta en la Figura 23-2 y depende de la latitud y del mes (Monsalve, 1995, pág. 166).

Lat.	EN.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.
15°N..	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08
10°N..	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.05	1.08	1.07
5°N..	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05
Ecuador	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04
5°S..	1.06	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03
10°S..	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01
15°S..	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00
20°S..	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99
22°S..	1.14	1.00	1.05	0.97	0.95	0.90	0.94	0.99

Figura 8-2. Factores de corrección de evapotranspiración potencial mensual, dados por el método de Thornthwaite, para ajustarlo al número de días del mes y a la duración del brillo solar diario, en los meses del año de interés y en latitudes entre 15 grados Norte y 22 grados sur.

Fuente: MONSALVE, G. (1995). HIDROLOGÍA EN LA INGENIERÍA. BOGOTÁ: DEPARTAMENTO DE PUBLICACIONES ESCUELA COLOMBIANA DE HIDROLOGÍA.

2.3.4 Mediciones para correlacionar el mapa de evapotranspiración de cultivo obtenido por detección remota y el estado fisiológico de la planta.

Desde la siembra (17/03/2015), se recolectó información de la fenología (tuberización, emergencia, floración, profundidad radicular), además de otros parámetros útiles al momento de evaluar la actividad fisiológica del vegetal como son el contenido de clorofila, altura del vegetal, número de tallos y el diámetro de tallos.

Para la toma de datos se delimitó un área denominada parcela neta que contenía 48 plantas distribuidas como lo indica las áreas sombreadas de la figura 24-2.

De cada una de las 9 parcelas netas se seleccionó al azar:

- 10 plantas, de las cuales se evaluó el contenido de clorofila, altura del vegetal, número de tallos y el diámetro de tallos.
- 4 plantas, fuera de las parcelas netas de las cuales se evaluó la profundidad radicular y tuberización.

La emergencia y floración se determinaron de todas las 48 plantas de cada parcela neta.

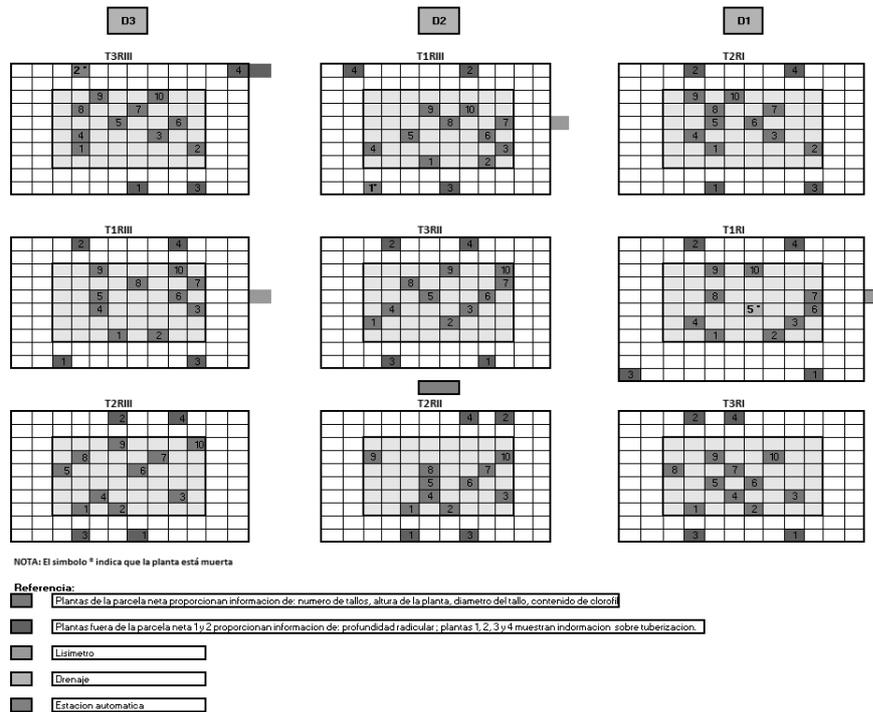


Figura 9-2. Distribución de los individuos a quienes se les registró los datos en las parcelas en estudio

Fuente: ING. JUAN LEÓN RUIZ

2.4 Modelación matemática de la experimentación

La determinación de la ETC mediante sensoramiento remoto seguirá el siguiente esquema, descrito ya anteriormente

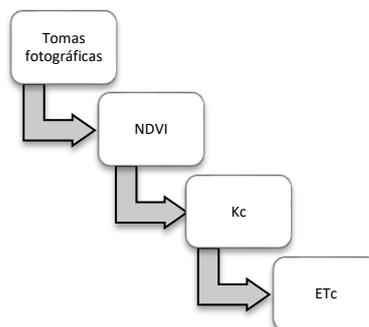


Figura 10-2. Representación gráfica del procedimiento a seguir para determinar la ETC mediante sensoramiento remoto.

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ.

La determinación de la ETC en tierra ha seguido el siguiente procedimiento:

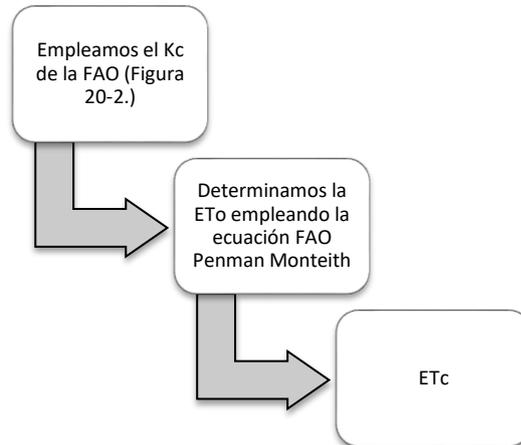


Figura 19-2. Representación gráfica del procedimiento a seguir para determinar la ETc a nivel de suelo.

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ.

Se ha considerado además el empleo del procedimiento teórico de Thorntwaite para el cálculo de la ET potencial teórica.

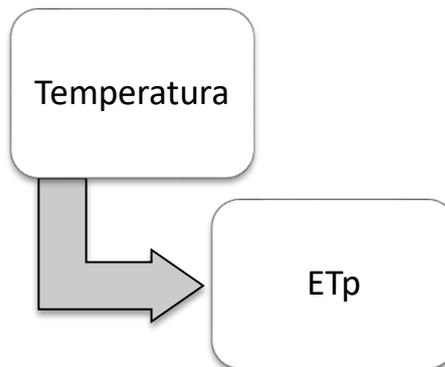


Figura 20-2. Representación gráfica del procedimiento a seguir para determinar la ETp mediante el método teórico de Thorntwaite.

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ.

CAPÍTULO III

MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Análisis e interpretación de resultados

3.1 Resultados mediante detección remota.

Luego de realizar el procesamiento de las imágenes en el infrarrojo cercano y rojo obtenidas mediante fotografía digital aérea, se logró definir mapas de evapotranspiración de cultivo (ETc) en un total de 4 correspondientes a cada sobrevuelo, los cuales proveen importante información para la determinación de requerimientos hídricos del cultivo.

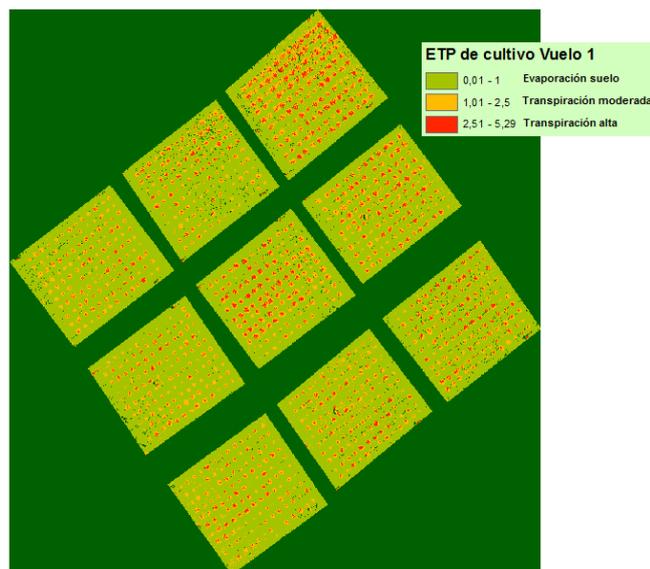


Figura 1-3 Mapa de Evapotranspiración de cultivo determinado mediante detección remota correspondiente al 17 de abril de 2015.

Fuente: ING.PAMELA PAULA CENSIG ESPOCH

Del sobrevuelo del día 17 de abril presentamos el mapa de ETc de la Figura 28-3 para la parcela de estudio, se presentan amplias regiones de baja evapotranspiración interpretadas como evaporación del suelo que representan el 57,45% de los píxeles involucrados en este análisis, las regiones de transpiración por su parte representan el porcentaje restante. Para el día en que ha sido hecha esta primera toma el cultivo tiene 30 días de haber sido sembrado, el valor promedio de la ETc es de 0,82 mm/día, un valor bajo comparado con los sobrevuelo 2 y

3 que registran valores promedio de 1,3 y 2,33 mm/día respectivamente, según (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 105) en este día el cultivo se encuentra en la etapa inicial, comparando con la curva ETc / día mostrada en un estudio realizado en México para un cultivo de papa sembrado en el ciclo otoño invierno de autoría de (Íñiguez, Ojeda, & Rojano, 2011) vemos que este comportamiento es usual para esta etapa como lo indica la Figura 29-3. Para el 9 de abril el 96% de un universo de 48 plantas muestreadas en el cultivo había emergido.

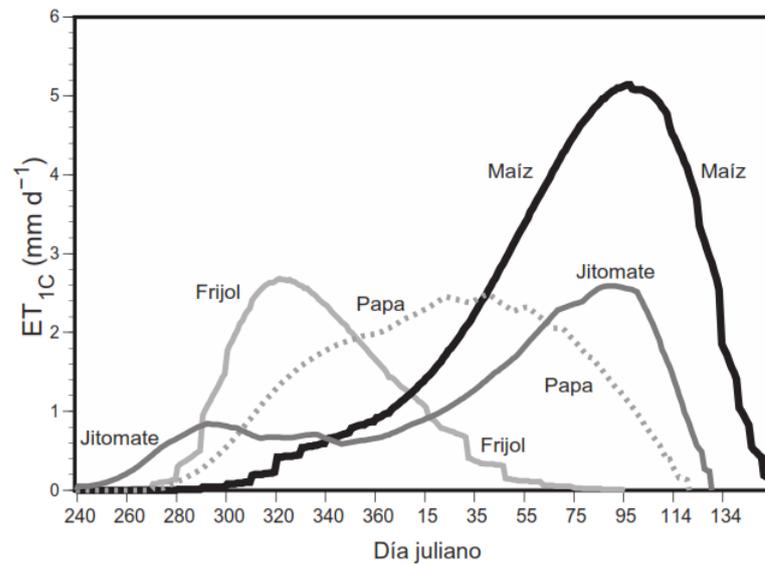


Figura 2-3. Evapotranspiración integrada para los cultivos de importancia del ciclo otoño invierno en México.
Fuente: (Íñiguez, Ojeda, & Rojano, 2011)

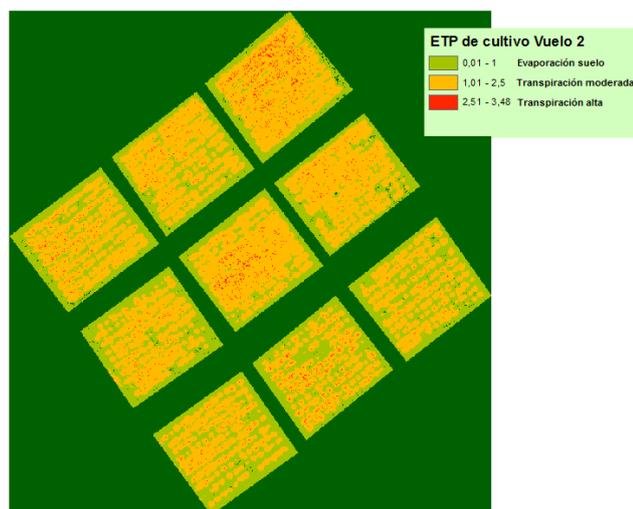


Figura 311-3. Mapa de Evapotranspiración de cultivo determinado mediante detección remota correspondiente al 17 de mayo de 2015.
Fuente: ING. PAMELA PAULA CENSIG ESPOCH

De la segunda toma realizada el día 17 de mayo de 2015 se obtuvo el mapa de Etc de cultivo mostrado en la Figura 30-3, donde se evidencia el crecimiento del cultivo corroborado por la mayor área ocupada por píxeles que representan transpiración del cultivo siendo en esta imagen el 87,95%. El promedio de la Evapotranspiración del cultivo en esta toma es de 1,3 mm/día en la etapa de desarrollo (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 105) que atraviesa nuestro cultivo a los 61 días luego de la siembra, muy similar al comportamiento descrito en la curva ETc / día mostrado en la Figura 29-3 en el estudio realizado por (Íñiguez, Ojeda, & Rojano, 2011). Al relacionar estos datos con información fenológica, vemos que para el 16 de mayo toda la muestra de 45 plantas presentó floración, el inicio de la tuberización inició el 6 de mayo con un 3 % de 36 plantas tuberizadas y para el 18 del mismo mes, el 100 % de la muestra presentó tubérculos en sus raíces. Para el día 16 de mayo, un día antes del segundo sobrevuelo se contó con un 89 % de plantas tuberizadas.

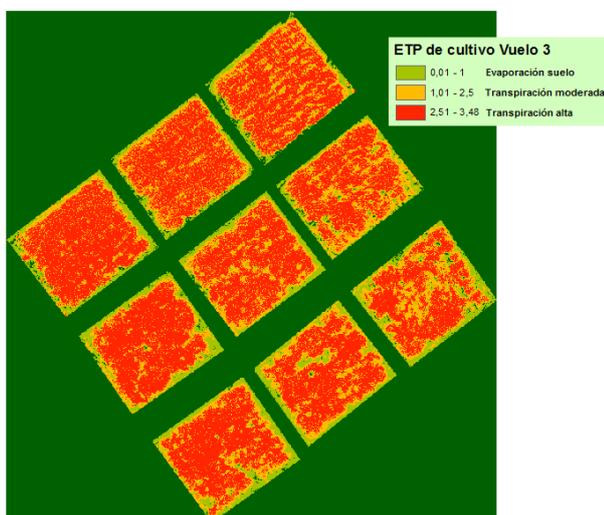


Figura 4-3 Mapa de Evapotranspiración de cultivo determinado mediante detección remota correspondiente al 15 de junio de 2015.

Fuente: ING. PAMELA PAULA CENSIG ESPOCH

La Figura 31-3 muestra la etapa de mayor actividad fisiológica en el cultivo, lo cual se evidencia con un 97,56% de píxeles de la imagen involucrados en la transpiración del vegetal con valores que en su mayoría se ubican en la región de 2,51 a 3,48 mm/día, valores altos en relación a todo el estudio, el valor promedio de la ETc es de 2,33 mm/día. A los 92 días desde la siembra nuestro cultivo se encuentra en el inicio de la etapa de mediados de temporada según (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 105).

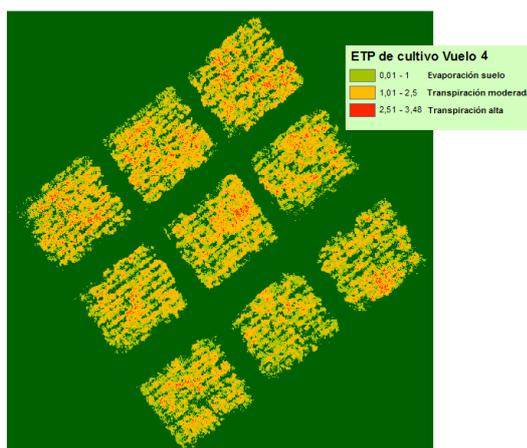


Figura 5-3. Mapa de Evapotranspiración de cultivo determinado mediante detección remota correspondiente al 17 de julio de 2015.

Fuente: ING. PAMELA PAULA CENSIG ESPOCH

Se muestra en la Figura 32-3 el mapa de ETc para el último sobrevuelo correspondiente al 17 de julio de 2015, donde la imagen muestra un valor de ETc de 0,52 mm/día, el más bajo de todo el estudio, esto se debe a que el cultivo se encuentra en la etapa final de su ciclo vital.

En la Figura 33-3 observamos la relación porcentual de los píxeles involucrados en cada constituyente del fenómeno evapotranspiratorio en cada sobrevuelo, esta información ha sido obtenida de un análisis de los mapas de ETc empleando ARCGIS.

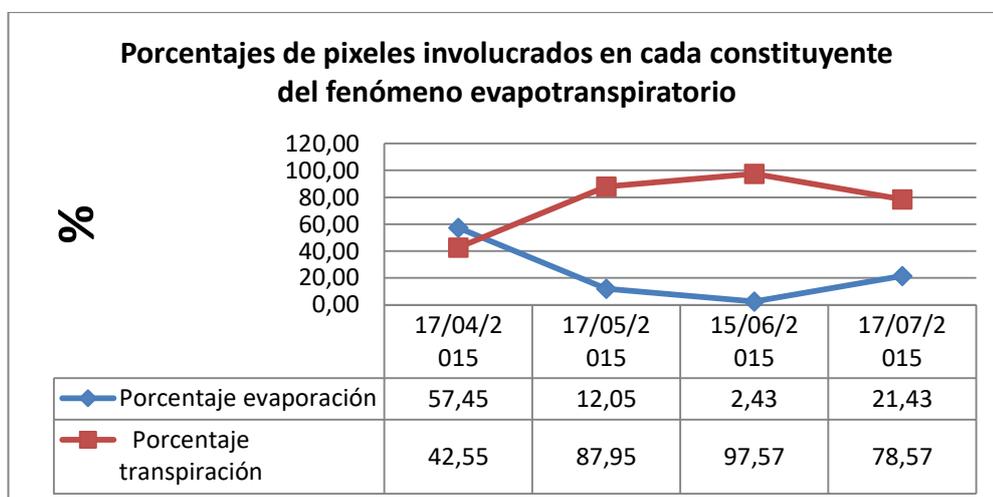


Figura 6-3. Porcentajes de píxeles involucrados en cada constituyente del fenómeno evapotranspiratorio

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

Los valores de la ETc obtenidos por detección remota se presentan en la tabla 2-3, observamos la presencia de valores máximos y mínimos que no han sido considerados directamente en el análisis debido a que la Evapotranspiración integra los valores relativamente bajos de evaporación del suelo y los valores altos de transpiración de la planta, por lo tanto el valor medio es una representación adecuada, por otro lado de este modo se elimina ciertos valores

atípicos máximos y mínimos que son registrados por la cámara fotográfica. Observamos además valores negativos como valores mínimos, sin embargo la recurrencia de estos valores en los pixeles de la imagen es demasiado reducido, pudiendo ser descartados.

Tabla 1-3. Evapotranspiración de cultivo mediante teledetección.

ETC de cultivo determinado por teledetección para los meses de estudio (mm/día)				
	17/04/2015	17/05/2015	15/06/2015	17/07/2015
Máximo	4,38	3,12	4,83	4,07
Mínimo	-2,58	-0,43	-1,95	-3,20
Media	0,82	1,30	2,33	0,52

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

3.2 Resultados provenientes de datos en tierra

La ETo fue determinada con la ecuación FAO Penman Monteith proveyendo los datos mostrados en la tabla 3-3 para los días de sobrevuelo:

Tabla 2-3. Valores de ETo calculados mediante el método FAO Penman Monteith para los días estudiados.

Evolución temporal Eto (Penman Monteith) mm/día			
17-abr	17-may	15-jun	17-jul
3,18	3,1	3,76	3,44

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

Se empleó los valores de Coeficiente de Cultivo (Kc) mostrados en la tabla 4-3, considerando las etapas del cultivo de papa expuestos en (Allen, Pereira, Raetz, & Smith, 2006, pág. 105) tomando en cuenta que el cultivo de papa duró 141 días.

Tabla 3-3. Kc proveniente de los registros de la FAO utilizado en los distintos meses del presente estudio.

Kc			
siembra 17 de mayo	Kc inicial (17 abril)	Kc medio (hasta el 12 de julio)	Kc fin (hasta el 12 de agosto)
	0,5	1,15	0,75

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

Con estos datos se determinó la ETc a nivel de suelo, y sus valores en los meses estudiados se presentan en la tabla 5-3.

Tabla 4-3. Valores calculados de ETc para los meses de estudio

Evapotranspiración de cultivo a nivel de suelo			
17 de abril	17 de mayo	15 de junio	17 de julio
1,59	3,56	4,33	2,58

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

Como podemos apreciar existe una similitud en el comportamiento de los valores de la tabla 5-3 que representa los datos de ETc a nivel de suelo, con respecto a los valores promedio por detección remota Ver Figura 34-3. La mayor anomalía se registra en el mes de mayo, donde la curva indica que es necesario realizar un ajuste al modelo empleado para determinar al ETc por teledetección, pero también podría requerir ajustes los Kc (coeficientes de cultivo) empleados para determinar la ETc en suelo, ya que como se mencionó en la metodología, recurrimos al empleo de datos tabulados de Kc provenientes del manual 56 de la FAO que bien podrían no estar ajustados a las condiciones ambientales de la región de estudio ni a las características de la especie de papa usada. Recurrimos a este procedimiento alternativo a nivel de suelo ya que los datos de los lisímetros y del tanque evaporímetro presentaron inconsistencias y requiere un análisis adicional. Si observamos la tabla 3-3 que muestra el comportamiento de los datos de ETo obtenidos por el método de la FAO Penman Monteith se observa una variación que no sobrepasa los 0,7 mm/día entre cada mes evaluado, lo cual es comprensible debido a que la ETo solo considera la información ambiental para su cálculo, sin embargo al ser determinada la ETc al combinar ETo* Kc, se observa un incremento sustancial de los valores en los meses de mayo y junio coincidente con la etapa de desarrollo, y la curva en suelo toma una forma parecida a la determinada por teledetección.

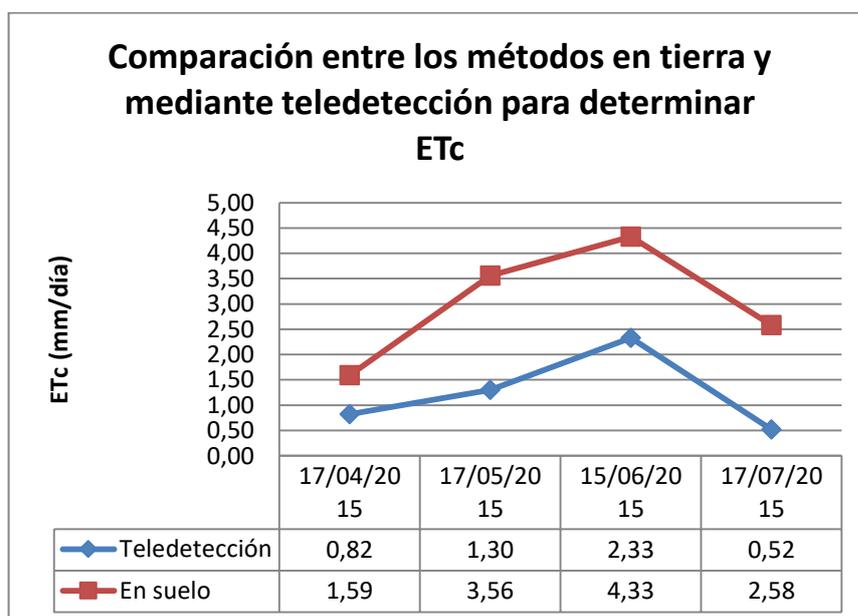


Figura 7-3. Comparación entre los métodos en tierra y mediante teledetección para determinar ETc.

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

Al analizar la diferencia entre los valores obtenidos por datos en suelo y los datos obtenidos por teledetección en los meses estudiados observamos que no existe una variación similar o una relación lineal (ver tabla 6-3), lo que dificulta la determinación de un coeficiente para relacionar las metodologías empleadas por medio de una nueva ecuación, este comportamiento

se debe a que al momento de determinar la ETC en suelo se trabajó con valores de Kc tabulados referenciales de zonas ajenas a nuestras condiciones ambientales.

3.3 Resultados de la ETo provenientes del método teórico de Thornthwaite

La tabla 6-3 indica los valores de evapotranspiración de referencia (ETo) de la zona de estudio, el comportamiento de estos valores difiere y es superior a los valores presentados por los métodos de la FAO Penman Montheit y con el del Tanque evaporímetro tipo A, sin embargo la diferencia de estos valores no supera los 2 mm/día Ver Figura .35-3

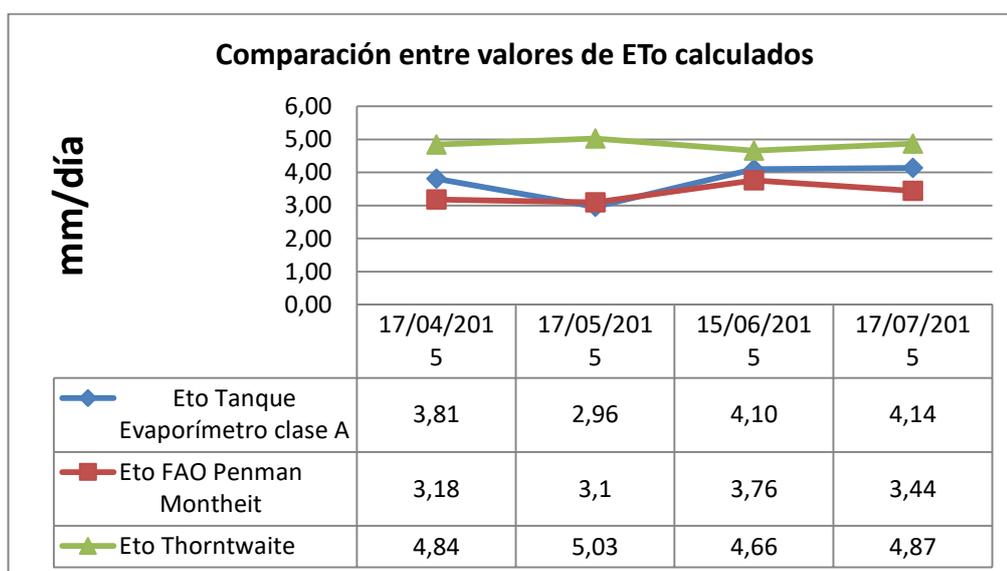


Figura 8-3. Comparación entre valores de ETo calculados
REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

Este modelo considera solo la temperatura ambiental para determinar la ETo, esta puede ser la justificación para este comportamiento.

Tabla 5-3. Valores de ETo calculados con el método de Thornthwaite

Evapotranspiración de referencia media mensual Thornthwaite (cm)			
ABR	MAY	JUN	JUL
4,84	5,03	4,66	4,87

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

3.4 Resultado de la recolección de información de la fenología (emergencia, floración, tuberización), además de otros parámetros útiles al momento de evaluar la actividad fisiológica del vegetal.

Tabla 6-3. Información fenológica del cultivo

MES	Marzo	Abril		Mayo	
SIEMBRA	La siembra fue el 17 de marzo				
EMERGENCIA		9 de abril el 96% de un universo de 48 plantas había emergido			
FLORACIÓN			18 de abril se contó con el 1 % de plantas en floración		16 de mayo toda la muestra presentó floración
TUBERIZACIÓN				6 de mayo un 3 % de 36 plantas presentaron tuberización	18 de mayo el 100 % de plantas presentaron tuberización

fuentes ING. JUAN LEÓN RUIZ

Como se observa en la tabla 7-3, para el 9 de abril el 96% de un universo de 48 plantas había emergido. En cuanto a la floración el 18 de abril se contó con el 1 % de plantas en floración, y para el 16 de mayo toda la muestra presentó floración. Se analizó a las plantas seleccionadas de la parcela neta en un número de 48 muestras. La tuberización inició el 6 de mayo con un 3 % de 36 plantas tuberizadas y concluyó el 18 del mismo mes con un 100 %, la siembra fue el 17 de marzo de 2015. Para el día 16 de mayo se contó con un 89 % de plantas tuberizadas.

La altura de planta fue registrado con un intervalo semanal de mediciones y los resultados en las cercanías a los días de las tomas fotográficas se muestra en la tabla 8-3. Fueron analizadas 48 plantas. En la Figura 36-3 observamos la evolución temporal de las longitudes de la altura de la planta en días cercanos a los sobrevuelos.

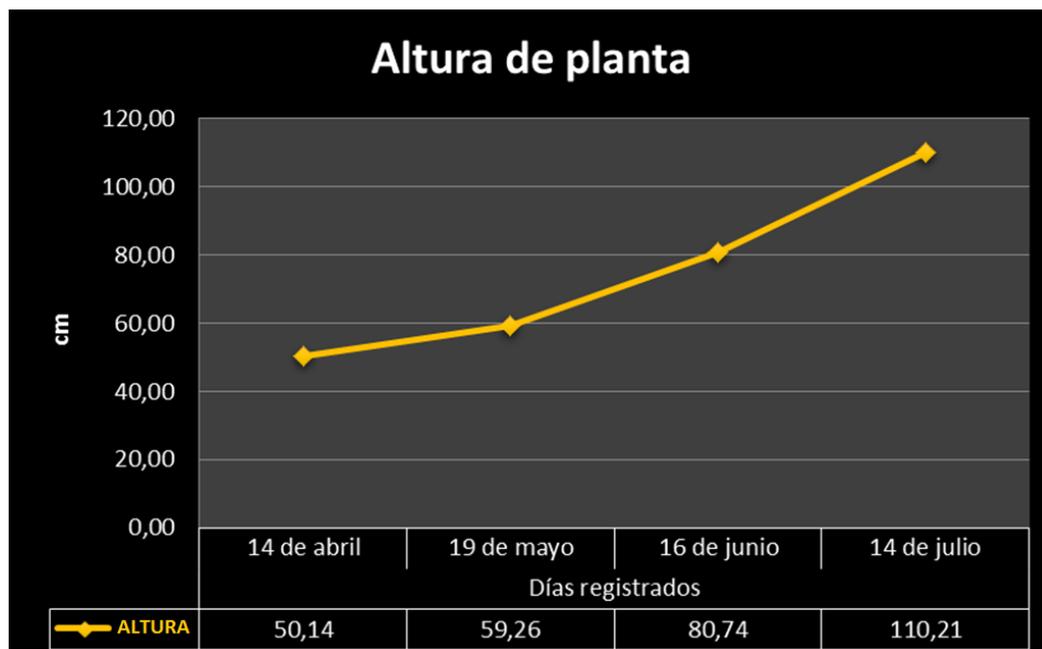


Figura 9-3. Altura de la planta.

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

La altura de la planta tiene que ver directamente con la cobertura vegetal, sin embargo vemos que no es un parámetro que describa la actividad de evapotranspiración del vegetal, ya que en la etapa final del cultivo el tallo registra un crecimiento sin embargo la evapotranspiración del cultivo muestra una baja sustancial.

Tabla 7-3. Altura de planta en días cercanos a la fotografía

Altura de planta (cm)			
14 de abril	19 de mayo	16 de junio	14 de julio
50,14	59,26	80,74	110,21

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

El contenido de clorofila mostró una baja en el tiempo, se registró datos con una frecuencia semanal, los valores promediados de las 48 plantas analizadas para los días cercanos a las tomas fotográficas se muestran en la tabla 9-3.

Desde la evaluación en la primera toma, el contenido de clorofila solo decrece en el tiempo como se aprecia en la Figura 37-3. No es posible determinar el comportamiento específico de la clorofila con una cámara que capte bandas amplias en el espectro electromagnético, se requiere estudios espectro radiométricos de banda estrecha para este fin, puede ser analizada esta relación en posteriores estudios.

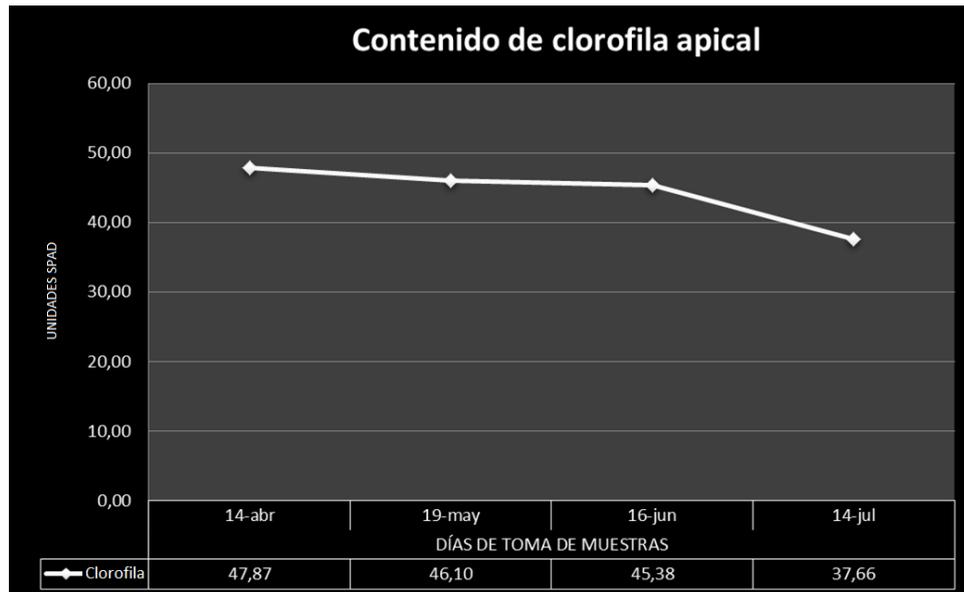


Figura 10-3. Contenido de clorofila.

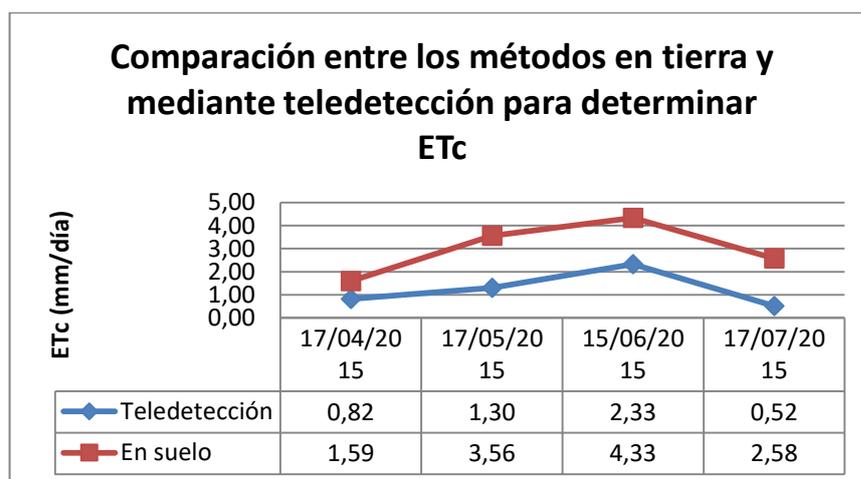
REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

Tabla 8-3. Contenido de Clorofila

CONTENIDO DE CLOROFILA APICAL (Unidades SPAD)			
14-abr	19-may	16-jun	14-jul
47,87	46,10	45,38	37,66

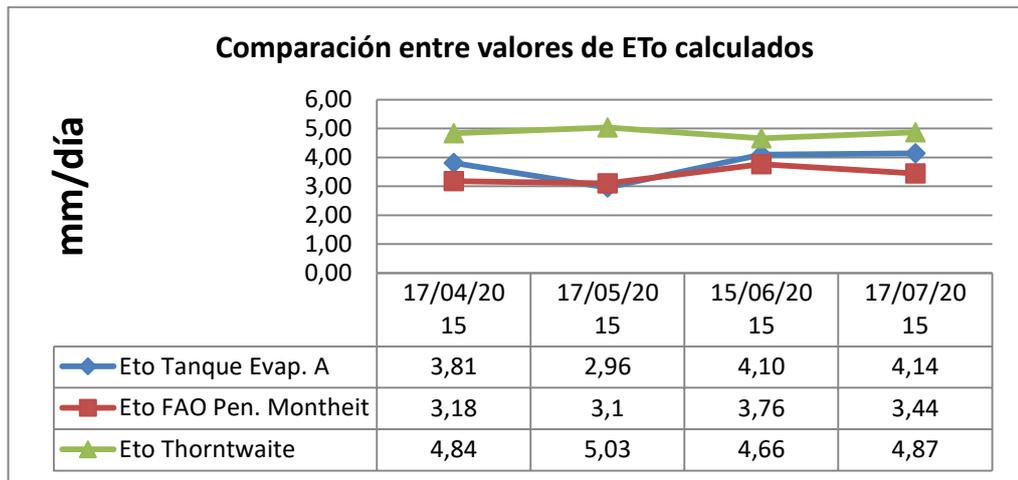
REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

3.5 Curvas características de la experimentación



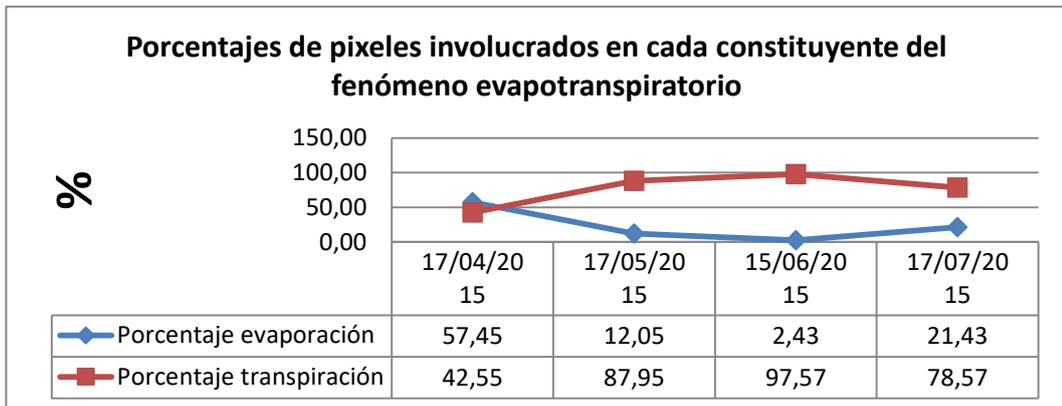
Comparación entre los métodos en tierra y mediante teledetección para determinar ETc.

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ



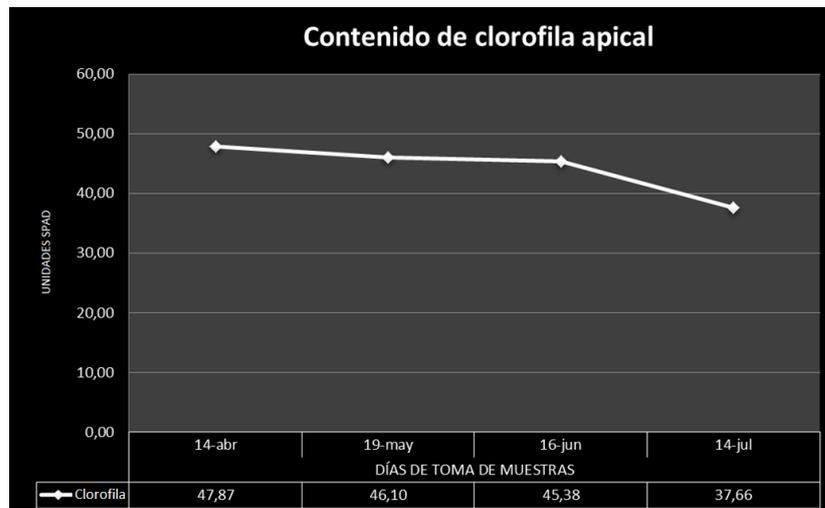
Comparación entre valores de ETo calculados

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

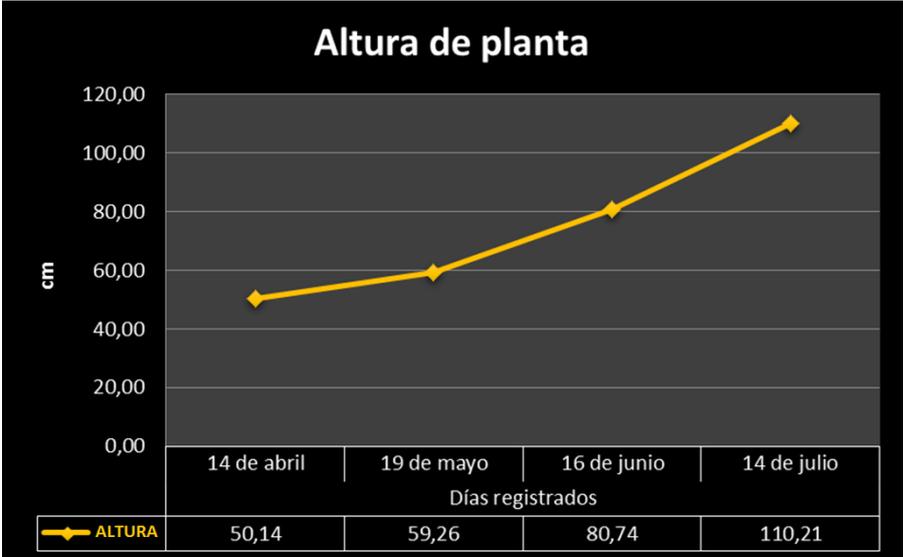


Porcentajes de pixeles involucrados en cada constituyente del fenómeno evapotranspiratorio.

REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ



Contenido de clorofila. REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ



Altura de la planta. REALIZADO POR: MIGUEL SÁEZ

CONCLUSIONES

La metodología denominada “Kc NDVI” propuesta por (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218) que relaciona valores del Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) y Coeficiente de cultivo (Kc) basándose en la relación lineal existente entre estas variables, junto con los datos de ETo calculados con la ayuda de un tanque evaporímetros para la zona de estudio permite determinar la Evapotranspiración de Cultivo (ETc) a partir de imágenes aéreas en las bandas visible e infrarrojo cercano para el cultivo de papa *solanum spp* de forma satisfactoria. Los datos obtenidos por este método son muy cercanos a los obtenidos mediante métodos de determinación de Evapotranspiración en suelo como el de Penman Montheit para calcular ETo y datos tabulados de coeficiente de cultivo (Kc), con lo que queda validado el método mediante detección remota.

Un estudio multitemporal permite dar seguimiento a la ETc (evapotranspiración de cultivo), parámetro fundamental para determinar los requerimientos hídricos en todo el ciclo de vida del vegetal de una manera práctica sin restricciones de frecuencias orbitales o nubosidad a diferencia de los satélites. El tratamiento de las imágenes permite realizar el análisis a nivel de píxel o conjuntos de pixeles mediante el uso de SIG (Sistemas de información Geográfica), lo que facilita el análisis de elementos individuales como plantas, suelo, etc., o incluso diferenciar procesos físicos y fisiológicos como la evaporación del suelo y transpiración vegetal.

El mapa de ETc obtenida mediante detección remota presentan una descripción útil del proceso evapotranspiratorio en los meses estudiados, con una similitud entre las curvas características para su validación (método en suelo) y valores de referencia encontrados en la literatura. Además existe concordancia entre los valores de ETc presentados por teledetección y los ciclos de desarrollo y procesos biológicos del vegetal.

RECOMENDACIONES

Emplear la metodología denominada “Kc NDVI” propuesta por (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218) para determinación de Coeficiente de cultivo Kc y posterior a ello Evapotranspiración de cultivo y determinación de requerimientos hídricos en las condiciones ambientales de nuestra zona con la consideración de que existe un desfase de 2 mm/día en cada etapa.

Realizar un ajuste a la ecuación “Kc NDVI” propuesta por (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218), relacionando valores de NDVI obtenidos por vehículos aéreos como se lo realizó en este estudio y valores de coeficiente de cultivo (Kc) medido con métodos de determinación como los de balance hídrico.

Realizar un estudio que relacione directamente el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) con la Evapotranspiración de cultivo (ETc), considerando que el NDVI es un índice fácil de calcular y sólo requiere información de bandas infrarroja cercana y roja en el espectro electromagnético visible, y que la Evapotranspiración de cultivo es importante porque permite determinar los requerimientos hídricos de los cultivos.

Generar valores tabulados de coeficientes de cultivo para especies agrícolas de nuestra zona en diferentes meses de siembra, determinados mediante métodos de balance hídrico, balance energético, teledetección u otro método confiable.

Promover el uso de la detección remota para la agricultura de precisión con el fin de aprovechar nuestros recursos hídricos de una mejor manera y aumentar la productividad.

BIBLIOGRAFÍA

- Aalsmeer, E. E. (2003). *Cultivo moderno de la rosa bajo invernadero*. Bogotá: Ediciones de Hortitecnica Ltda.
- Allen, R., Pereira, R., Raetz, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración de cultivo*. Roma: Boletín FAO 56.
- Bastiaanssen, W. P. (1998). *A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. Journal of Hydrology*.
- Bermejillo, A. (1998). ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL REGIONAL A PARTIR DE DATOS SATELITALES. *Tesis para optar al grado de MAGISTER SCIENTIAE EN RIEGO Y DRENAJE*. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo.
- Blackburn, G. (2006). Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of experimental botany*, 856.
- Brown, P. (2000). *Basics of evaporation and evapotranspiration*. Arizona.: The University of Arizona – College of Agriculture.
- Chuvienco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, 1.
- Cuesta, A., Montorro, A., Jochum, A. L., & Calera, A. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *ITEA*, 213-223.
- Ekanayake, I. (1994). *CIP Research 30, studying drought stress and irrigation requirements of potatoes*. Lima: CIP.
- Esmeral, Y. y. (2011). *ANÁLISIS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN EL CULTIVO DE ROSA*. Bogotá: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- Gonzales, J. (2007). Evapotranspiración de la Cubierta Vegetal Mediante la Determinación del Coeficiente de Cultivo por Teledetección. *Evapotranspiración de la Cubierta Vegetal Mediante la Determinación del Coeficiente de Cultivo por Teledetección*. Valencia, España: Universitat de Valencia.
- Hidalgo, D. (2008). *Diseño, evaluación e instalación de un sistema de riego*. Lima.
- Íñiguez, M., Ojeda, W., & Rojano, A. (2011). Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Rev FCA UNCUYO*, 187.
- Irmak, S., & Haman, D. (06 de 2003). *University of Florida IFAS extension* . Recuperado el 24 de 05 de 2015, de Evapotranspiration: Potential or Reference?: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/FILES/AE/AE25600.pdf>

- Jensen, M., Burman, R., & Allen, R. (1990). *Evapotranspiration an irrigation water requirements. Manuals and reports on engineering practice No. 70*. New York.: American Society of Civil Engineers – ASCE. .
- León, J. &. (2014). *MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA ESTIMAR LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL CULTIVO DE PAPA (Solanum spp.) EN RIOBAMBA - ECUADOR*. Lima, Perú: Universidad Agraria La Molina.
- Melo, P. (2015). *Levantamiento de fotografía e Índices de Vegetación Parcelas ESPOCH Centro Experimental de Riego*. Quito: Dron and GIS.
- Meneses, C. T. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylya*, 40.
- Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Hidrología.
- Pereira A., P. W. (2004). *Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration*. Elsevier.
- Poveda, I. M. (2010). *Curso de especialista en SIG*. La Mancha: Universidad de Castilla La Mancha.
- Salisbury, R. (1992). *Fisiología de las plantas 1. Células: agua, soluciones y superficies*. Andalucía: Paraninfo & Thomson-Learning.
- Szejba, D. (2011). *Evapotranspiration of Grasslands and Pastures in North-Eastern Part of Poland*. Warsaw: Warsaw University of Life Sciences – SGGW.
- Taylor, S. (1972). *Physical edaphology*. W.H.Freeman and Co: San Francisco.