

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN ESPACIAL EN EL
VALLE DEL MANTARO MEDIANTE EL ALGORITMO SEBAL”**

Presentado por:

LILIANA MILAGROS VILLAORDUÑA VERGARA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÍCOLA

Lima – Perú

2014

DEDICATORIA

A mis padres para que su esfuerzo
se vea reflejado en cada uno
de los logros de sus hijos.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a mis padres, por haberme dado la oportunidad de estudiar y realizar una carrera, por su apoyo en todos estos años, y por su abnegación, en especial a ti mamá; asimismo agradezco enormemente al Centro Internacional de la Papa, en especial a Mariella Carbajal Carrasco, quien me propuso el tema de investigación, y más allá de eso, dedicó parte de su tiempo en buscar y recopilar información de artículos científicos los cuales me sirvieron muchísimo, por tomarse el tiempo de hacer las revisiones y correcciones necesarias de manera que el trabajo se culmine satisfactoriamente, por eso Mary te agradezco de todo corazón.

De la misma manera, agradezco a los ingenieros que me recibieron en Huancayo, en especial a la Ingeniera María Rebeca Frisancho, quien me brindó cobijo y prácticamente me trato como una hija. Agradezco a mis profesor asesor Cayo Ramos quien acepto ser mi asesor con toda la voluntad y me saco de muchas dudas respecto al tema. En general agradezco a los trabajadores del CIP y a los miembros del jurado quienes me brindaron las recomendaciones y correcciones necesarias para que el presente trabajo quede culminado de la mejor manera.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
INDICE DE CUADROS	vii
INDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISION DE LITERATURA	4
2.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET).....	4
2.1.1. Evaporación (E).....	5
2.1.2. Transpiración (T).....	5
2.2. FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	6
2.2.1. Variables climáticas.....	7
2.2.2. Factores de cultivo.....	7
2.2.3. Manejo y condiciones ambientales.....	8
2.3. CONCEPTOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	8
2.3.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)	9
2.3.2. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c).....	10
Fuente: Allen (2006)	12
2.3.3. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$)	13
2.4. ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	14
2.4.1. Lisímetro.....	14
2.4.2. Tanque evaporímetro tipo A.....	16
2.4.3. Penman – Monteith.....	16
2.5. USO DE LA TELEDETECCIÓN PARA ESTIMAR ET	17
2.5.1. Teledetección en la agricultura.....	18

2.5.2.	Imágenes satelitales para la estimación de ET	20
2.6.	MÉTODO DEL BALANCE DE ENERGÍA.....	23
2.6.1.	Radiación Neta (Rn).....	26
2.6.2.	Flujo de Calor del Suelo (G _o).....	27
2.6.3.	Flujo de Calor Sensible (H).....	27
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1.	AREA DE ESTUDIO	30
3.2.	MATERIALES	31
3.2.1.	Información espacial	31
3.2.2.	Datos meteorológicos	33
3.2.3.	Datos de campo	34
3.3.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN SEBAL ...	37
3.3.1.	Coseno del ángulo de incidencia	37
3.3.2.	Radiación Neta	38
3.3.3.	Flujo de Calor del Suelo.....	40
3.3.4.	Flujo de Calor Sensible	41
3.3.5.	Evapotranspiración diaria.....	44
3.4.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CALIBRACIÓN DEL MODELO SEBAL APLICADO EN EL VALLE DEL MANTARO.....	45
3.4.1.	Análisis de sensibilidad	45
3.4.2.	Calibración	45
3.5.	VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	46
3.5.1.	Validación de la Radiación Solar	46
3.5.2.	Validación y comparación de la Temperatura del Aire.....	46
3.5.3.	Comparación de resultados de Evapotranspiración.....	47
3.5.4.	Estadística para la validación y comparación de resultados.....	49

IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	51
4.1.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SEBAL.....	51
4.2.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	55
4.3.	VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE RADIACIÓN SOLAR	60
4.4.	VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE TEMPERATURA DEL AIRE.....	61
4.4.1.	Validación de Temperatura de aire.....	61
4.4.2.	Comparación Espacio – Temporal de los valores de T_{aire}	62
4.5.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	63
4.5.1.	Comparación de resultados de ET distribuido temporalmente.....	63
4.5.2.	Comparación de resultados de ET distribuido espacialmente	70
4.5.3.	Comparación Espacio – Temporal los valores de ET	77
4.6.	RESULTADOS DE LA TEMPERATURA DEL AIRE	79
4.7.	RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	81
4.7.1.	Evapotranspiración para el día 8 de Abril	81
4.7.2.	Evapotranspiración para el día 24 de Abril	82
4.7.3.	Evapotranspiración para el día 26 de Mayo	84
4.7.4.	Evapotranspiración para el día 27 de Junio	85
4.7.5.	Evapotranspiración para el día 13 de Julio.....	86
4.7.6.	Evapotranspiración para el día 14 de Agosto	87
V.	CONCLUSIONES	88
VI.	RECOMENDACIONES.....	89
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
	ANEXOS	95

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Coeficiente de uso consuntivo (K_c) de los principales cultivos de los Andes centrales del Perú, determinados para varias etapas de crecimiento	12
Cuadro 2: Coeficiente de agua para los cultivos	12
Cuadro 3: Resolución espacial y temporal de las Imágenes Satelitales	20
Cuadro 4: Características de las imágenes Landsat 5 TM.....	22
Cuadro 5: Rango espectral TM, post-calibración rangos dinámicos, y la media de la irradiación solar exo-atmosférica ($ESUN_\lambda$)	22
Cuadro 6: Detalle de las Imágenes satelitales Landsat 5TM descargadas	31
Cuadro 7: Estaciones meteorológicas utilizadas	33
Cuadro 8: Cultivos identificados en el Valle del Mantaro para el año 2008.....	35
Cuadro 9: Valores de “ K_c ” para los cultivos identificados en el Valle del Mantaro.....	37
Cuadro 10: Algoritmo para elección de pixeles extremos.....	42
Cuadro 11: Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe.....	50
Cuadro 12: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar los valores de radiación solar para la estación La victoria	60
Cuadro 13: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar los valores de Temperatura del aire para la estación La victoria	61
Cuadro 14: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar todos los valores de temperatura del aire	62
Cuadro 15: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y Penman-Monteith distribuidos temporalmente.....	69

Cuadro 16: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y El tanque evaporímetro tipo A distribuidos temporalmente	70
Cuadro 17: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y Penman-Monteith distribuidos espacialmente	76
Cuadro 18: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y El tanque evaporímetro tipo A distribuidos espacialmente	76
Cuadro 19: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y Penman-Monteith.....	77
Cuadro 20: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y El tanque evaporímetro tipo A.....	78

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Factores que afectan la evapotranspiración (Allen, 2006).....	7
Figura 2: Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), bajo condiciones estándar (ET_c) y no estándar ($ET_{c_{aj}}$) (Allen, 2006).....	9
Figura 3: Coeficiente de estrés Hídrico (K_s) (Allen, 2006).....	14
Figura 4: Lisímetro simple de drenaje (Canales, 2009).	15
Figura 5: Disciplinas y secuencia de procedimientos necesarios para interpretar las mediciones espectrales de satélite para su uso en la gestión práctica de agua. Modificado de Bastiaanssen <i>et al.</i> (2000).....	20
Figura 6: Balance de energía para estimar evapotranspiración – Elaboración propia.....	24
Figura 7: Descripción general de funcionamiento del algoritmo SEBAL. Modificado de Núñez Juliá (2009)	25

Figura 8: Balance de radiación en la superficie – modificado de (Allen <i>et al.</i> , 2002a)	26
Figura 9: Bosquejo de la transferencia de calor aerodinámico (Bastiaanssen, 2000).	28
Figura 10: Concepto de dT (diferencia de temperatura entre la superficie y el aire) la predicción en SEBAL (Morse <i>et al.</i> , 2000).	28
Figura 11: Área de estudio: Valle del Mantaro	30
Figura 12: Modelo de elevación digital del Valle del Mantaro	32
Figura 13: Flujograma para la estimación del coseno del ángulo de incidencia	38
Figura 14: Flujograma para la estimación de la Radiación Neta.....	40
Figura 15: Flujograma para la estimación del Flujo de calor del suelo.....	41
Figura 16: Flujograma para la estimación del Flujo de calor sensible	43
Figura 17: Flujograma para la determinación de la evapotranspiración diaria	44
Figura 18: Relación lineal para obtener una ecuación de temperaturas	47
Figura 19: Implementación de SEBAL en ArcGIS v 10.2 (Model Builder).....	51
Figura 20: Submodelo para estimar el coseno del ángulo de incidencia.....	51
Figura 21: Submodelo para estimar la Radiación neta y el Flujo de calor del suelo	52
Figura 22: Submodelo para estimar el Flujo de calor sensible – valor inicial	53
Figura 23: Submodelo para estimar el Flujo de calor sensible – proceso de iteración	54
Figura 24: Submodelo para estimar el integral del coseno del ángulo de incidencia.....	55
Figura 25: Submodelo para estimar la Evapotranspiración.....	55
Figura 26: Mapa de Temperaturas del suelo para el análisis de sensibilidad.....	56

Figura 27: Análisis de sensibilidad para el flujo de calor sensible.....	57
Figura 28: Resultados de evapotranspiración SEBAL para el análisis de sensibilidad.....	58
Figura 29: Evapotranspiración estimada a distintas temperaturas máximas para el análisis de sensibilidad.	59
Figura 30: Diagrama de dispersión para comparar los valores de Radiación Solar.....	60
Figura 31: Diagrama de dispersión para comparar los valores de Temperatura del aire de la estación La Victoria.....	61
Figura 32: Diagrama de dispersión para comparar todos los valores de temperatura del aire ..	62
Figura 33: Diagrama de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la estación Huayao	64
Figura 34: Diagrama de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la estación Santa Ana	65
Figura 35: Diagrama de ET estimada con SEBAL y Penman-Monteith para la estación Ingenio	66
Figura 36: Diagrama en línea de la evapotranspiración estimada con SEBAL y Penman-Monteith para la estación Jauja	67
Figura 37: Diagrama en línea de la evapotranspiración estimada con SEBAL y Penman-Monteith para la estación Jauja – Escenario estrés hídrico	68
Figura 38: Diagrama en línea de la evapotranspiración estimada con SEBAL y Penman-Monteith para la estación La Victoria	69
Figura 39: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la imagen de 8 de Abril.	71

Figura 40: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la imagen de 24 de Abril.	72
Figura 41: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la imagen de 26 de Mayo.	73
Figura 42: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para para la imagen de 27 de Junio.	74
Figura 43: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la imagen del 13 de Julio.....	74
Figura 44: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la imagen del 14 de Agosto.	75
Figura 45: Diagrama de dispersión para comparar todos los valores de Evapotranspiración ...	77
Figura 46: Diagrama de dispersión para comparar todos los valores de Evapotranspiración – Tanque tipo A.....	78
Figura 47: Temperatura del aire estimado con SEBAL	80
Figura 48: Evapotranspiración para el día 8 de Abril.....	81
Figura 49: Evapotranspiración para el día 24 de Abril.....	83
Figura 50: Evapotranspiración para el día 26 de Mayo.....	84
Figura 51: Evapotranspiración para el día 27 de Junio	85
Figura 52: Evapotranspiración para el día 13 de Julio	86
Figura 53: Evapotranspiración para el día 14 de Agosto	87

RESUMEN

La interpolación espacial de valores medidos o estimados de evapotranspiración (ET) con algoritmos convencionales usualmente genera resultados sesgados. El algoritmo de «Surface Energy Balance for Land» (SEBAL) se ha utilizado con éxito para reducir estos sesgos. No obstante, SEBAL ha sido poco probado bajo condiciones de alta radiación en altas elevaciones. La presente investigación pretende desarrollar una aplicación SEBAL para el valle del Mantaro, situado a una altitud promedio de 3200 msnm. El algoritmo fue programado en Visual Python-ArcGIS v10.2. El balance energético se estimó mediante un conjunto de imágenes Landsat 5 TM registradas desde abril hasta agosto de 2008. Los valores de ET obtenidos se compararon con la evapotranspiración de cultivos específicos (ET_c) estimada con el método de Penman-Monteith (PM) o tanque evaporímetro tipo A (TEA) debido a la falta de lisímetro u otros datos más confiables de ET. Los cultivos dominantes en las proximidades de las estaciones meteorológicas fueron identificados y utilizados para la estimación de ET_c . La comparación entre SEBAL y PM a través del espacio y el tiempo dio lugar a un error medio cuadrático (RMSE) de 0,561 mm/día, un coeficiente de determinación (R^2) de 0.845 y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS) de 0.787. Por otra parte, cuando se comparó con datos TEA, los resultados fueron inferiores pero aceptables: RMSE de 1,024 mm/día, R^2 de 0.416 y ENS de 0.368. El uso de imágenes y el algoritmo SEBAL son herramientas fiables para estimar y entender el comportamiento espacio-temporal de la evapotranspiración en tierras altas y se recomienda como herramientas de gestión de los recursos de agua.

ABSTRACT

Spatial interpolation of gauged or estimated evapotranspiration (ET) values with conventional algorithms usually generates biased results. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) has been successfully used to reduce these biases. Notwithstanding, SEBAL has been little tested under high radiation conditions existing at high elevations. The present research aimed at developing a SEBAL application for the Mantaro Valley, located at an average altitude of 3200 masl. The algorithm was programmed in Visual Python-ArcGIS v10.2. The energy balance was estimated through a set of Landsat 5 TM imageries registered from April – August 2008. Obtained ET values were compared to specific crop evapotranspiration (ET_c) estimated with the Penman-Monteith (PM) method or type A evaporimeter tank (TEA) due to a lack of lysimeter or other more reliable ET data. Dominant crops near the meteorological stations were identified and used for the ET_c estimation. Comparison between SEBAL and PM across space and time resulted in a root mean square error (RMSE) of 0.561 mm/day, coefficient of determination (R²) of 0.845 and Nash-Sutcliffe (ENS) efficiency of 0.787. Moreover, when compared with TEA, results were lower but acceptable: RMSE of 1.024 mm/day, R² of 0.416 and ENS of 0.368. The use of imageries and SEBAL algorithm are reliable tools for estimating and understanding the spatio-temporal behavior of evapotranspiration in highlands and thus recommended as water resources management tools.

I. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global producto del cambio climático es un hecho inequívoco que se viene presentando a nivel mundial; el cual en las próximas décadas según la comunidad científica de expertos ocasionará cambios en los sistemas climáticos, provocando grandes impactos en todos los sectores. Frente a esto, La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, ha mostrado especial preocupación e interés por la vulnerabilidad y necesidad de adaptación de los países en desarrollo (UNFCCC, 2007).

El Perú, según el Tyndall Center de Inglaterra, sería el tercer país más vulnerable a los impactos del cambio climático debido principalmente a la repercusión de los fenómenos hidrometeorológicos en la diversidad ecológica y climática. En este sentido, la pronosticada variación espacial y temporal de la temperatura y precipitación hacen evidente la vulnerabilidad de los recursos hídricos para el sector agrícola. Por tanto, es de vital importancia la sinergia de científicos y políticos para desarrollar metodologías y estrategias que permitan una adaptación oportuna.

Debido al cambio climático, surgió la necesidad de contar con modelos agro – climáticos espaciales que permitan estudiar y planificar el uso de los recursos hídricos de manera eficiente. Un componente clave de estos modelos es la evapotranspiración, en el cual se evalúa la demanda de agua necesaria del sector agrícola. Además, el monitoreo de evapotranspiración tiene implicaciones importantes para el modelamiento del clima global y regional, así como en el conocimiento del ciclo hidrológico y la evaluación sobre el estrés ambiental que afecta a los bosques y los ecosistemas agrícolas. (Kustas y Norman, 1996)

Según Melesse *et al.* (2007), la evapotranspiración es de interés común tanto para aplicaciones hidrológicas y agronómicas, sin embargo, su medición a menudo es difícil y requiere instrumentación costosa. Para su determinación, se suelen utilizar métodos de estimación directos e indirectos; de los directos el más preciso y confiable, pero a la vez menos utilizado por la alta inversión de tiempo y dinero que requiere, son los lisímetros, y de los indirectos, resaltan como los más importantes, los de Penman-Monteith y tanque evaporímetro tipo “A” Allen *et al.* (1998), validados por la FAO (Food and Agriculture Organization). No obstante, estos métodos proporcionan estimaciones de evapotranspiración

válidas a nivel de planta o áreas reducidas, sin considerar las condiciones reales (p.e: utilizan cultivos de referencia, no consideran condiciones de estrés, a las que se encuentran sometidas los cultivos y menos aún la variabilidad espacial en extensiones mayores; lo cual significaría que extrapolar esas medidas puntuales darían resultados gruesos y poco confiables.

Para superar las limitaciones provistas por mediciones puntuales, actualmente existen métodos basados en el principio fundamental de balance de energía, utilizando imágenes de percepción remota; siendo el algoritmo SEBAL, propuesto por Bastiaanssen *et al.* (1998a), el más conocido y validado en muchos países para la planificación de recursos hídricos. Entre los países donde se logró validar el algoritmo SEBAL se encuentran: Idaho (Bastiaanssen *et al.*, 2000), Turquía (Bastiaanssen, 2000), Egipto (Droogers *et al.*, 2009), al este de África (Kiptala *et al.*, 2013), entre otros. Cabe resaltar que la mayoría de estas aplicaciones han sido desarrolladas a bajas elevaciones (Valles costeros), y otros pocos bajo condiciones de altas elevaciones donde se presentan altas radiaciones (Immerzeel, 2008). La importancia de validar el modelo SEBAL en zonas de altas elevaciones es que en Perú existen muchas regiones alto-andinas de gran influencia como es el caso del Valle del Mantaro.

En el Perú, el Valle del Mantaro es uno de los valles interandinos más grandes y de mayor importancia debido a que cuenta con extensas áreas agrícolas y ganaderas, aproximadamente 100000 ha, cuyas tierras corresponden en un 45 por ciento a la actividad agrícola intensiva y un 32 por ciento a la actividad agrícola no intensiva, las áreas de cultivo se encuentran entre los 3 000 y 3 400 msnm, ubicadas en las dos márgenes del río Mantaro y sus correspondientes terrazas de producción, en las provincias de Jauja, Huancayo, Concepción y Chupaca. Predominan los cultivos de papa, maíz (choclo), cebolla, arveja (verde), haba (verde), cebada y alcachofa, entre estos, el cultivo predominante es la papa, que actualmente está siendo remplazada por la quinua, seguida en importancia por el maíz amiláceo, asimismo es una de las principales fuentes para la seguridad alimentaria, no solo en la región, sino también para la ciudad de Lima (Cuellar y Medina, 2009). Estudios previos demuestran que los valles interandinos como este, con presencia de eventos climáticos extremos, son altamente vulnerables a los futuros efectos del cambio climático (Vidal, 2010).

En este contexto, el presente trabajo de investigación describe la metodología seguida para la implementación y validación del algoritmo de evapotranspiración SEBAL en el Valle del Mantaro. El modelo fue implementado utilizando el ambiente de programación visual Model Builder del software ArcGIS v.10.2 (ESRI, 2013), asimismo se realizó el análisis de sensibilidad y calibración del modelo; y finalmente fue aplicado y validado comparando los resultados con otros métodos ampliamente aceptados para estimar evapotranspiración.

Objetivo Principal

- Estimar la evapotranspiración en el valle del Mantaro mediante el uso de imágenes satelitales y el algoritmo SEBAL basado en el balance de energía.

Objetivos Específicos

- Implementar el modelo de evapotranspiración SEBAL, utilizando el Model Builder del software ArcGIS v.10.2.
- Validar y comparar las variables de Radiación solar y Temperatura del aire con mediciones reales.
- Validar y comparar los resultados de evapotranspiración con los métodos de estimación de Penman- Monteith y Tanque evaporímetro tipo A.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET)

La evapotranspiración (ET) según Allen *et al.* (1998), es la combinación de dos procesos separados, por un lado, el agua se pierde de la superficie del suelo mediante la evaporación y por otro lado, de los cultivos mediante la transpiración. La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay manera fácil de distinguir entre los dos procesos. Cuando el cultivo es pequeño, el agua se pierde predominantemente por la evaporación del suelo, pero una vez que el cultivo está bien desarrollado y cubre completamente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. Además de la disponibilidad de agua en la capa superior del suelo, la evaporación de un suelo cultivado se determina principalmente por la fracción de la radiación solar que llega a la superficie del suelo, esta fracción disminuye a lo largo del período de crecimiento ya que el cultivo se desarrolla y las sombras del dosel del cultivo son cada vez más grandes que el área del suelo desnudo.

El concepto de necesidades hídricas está íntimamente conectado con la evapotranspiración del cultivo debido a que ambos se refieren a la misma cantidad de agua; sin embargo existen algunas diferencias entre ellos; la evapotranspiración representa la pérdida de agua que se produce en un determinado cultivo y las necesidades de agua, representa a la cantidad de agua que debería ser suministrada al cultivo para contrarrestar estas pérdidas, de hecho, esta cantidad de agua corresponde a la de suministro de agua de riego efectiva necesaria para alcanzar el rendimiento máximo (Immerzeel, 2008).

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo, esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un completo período de cultivo o un año.

2.1.1. Evaporación (E)

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (eliminación de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, pavimentos, suelos y la vegetación húmeda (Allen, 2006).

Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación (Gangopadhyaya, 1965).

Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación (Pereira *et al.*, 1999).

2.1.2. Transpiración (T)

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y la eliminación de vapor a la atmósfera. Predominantemente, los cultivos pierden su agua a través de los estomas, que son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través del cual pasan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmosfera. (Allen *et al.*, 1998)

El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego (Pereira *et al.*, 1999).

La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración. (Allen, 2006)

2.2. FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Los principales factores que afectan la E y la T, como se muestra en la Figura 1, son las variables climáticas, las características del cultivo, el manejo y las condiciones ambientales donde se desarrolla el cultivo.

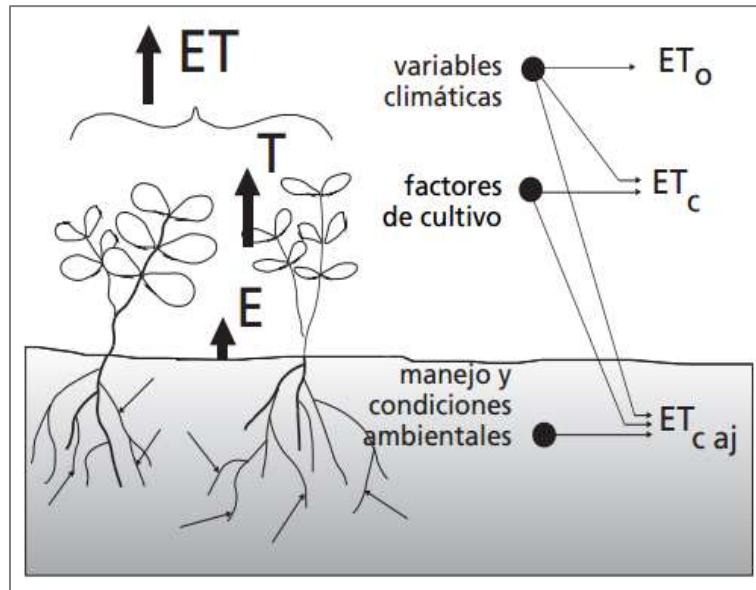


Figura 1: Factores que afectan la evapotranspiración (Allen, 2006).

2.2.1. Variables climáticas

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar (Gong *et al.*, 2006).

2.2.2. Factores de cultivo

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas (Allen, 2006).

2.2.3. Manejo y condiciones ambientales

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo (Gong *et al.*, 2006).

Según Allen (2006), el efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración.

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 ($ET_{c_{aj}}$) (Figura 2).

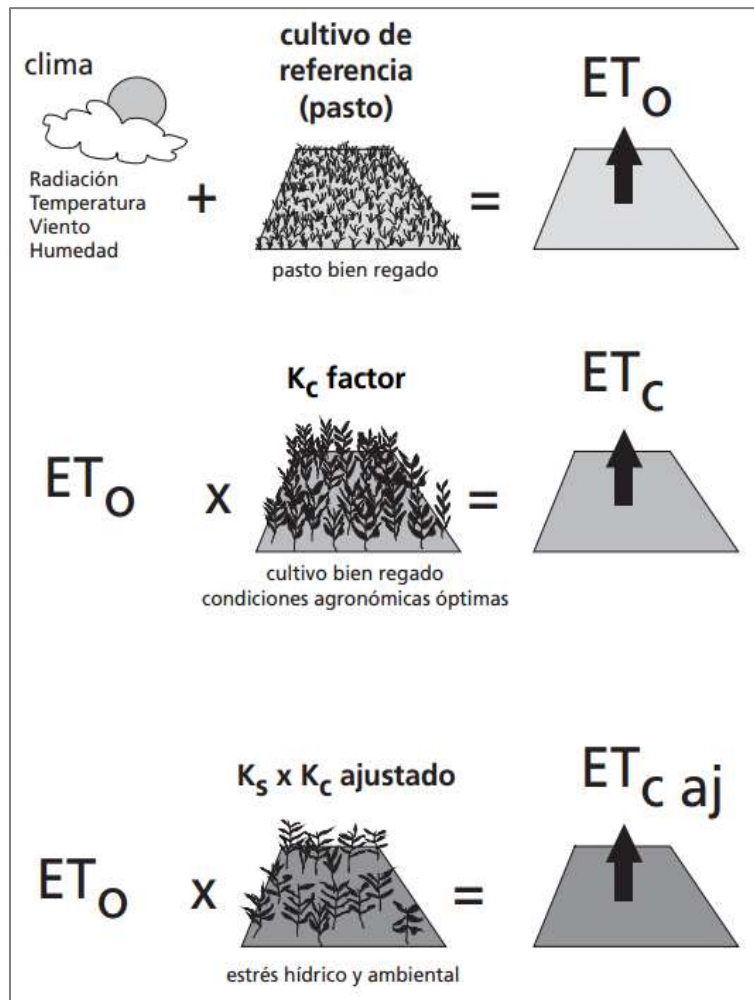


Figura 2: Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), bajo condiciones estándar (ET_c) y no estándar ($ET_{c\ aj}$) (Allen, 2006).

2.3.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

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 la 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 (Irmak y Haman, 2003).

Los únicos factores que afectan ET_o son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET_o es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ET_o 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 ET_o con parámetros climáticos. Este método aproxima de una manera cercana la ET_o 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, 2006)

2.3.2. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)

Según Allen (2006), la ET_c 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. En la Ecuación 1, se muestran las variables implicadas en la estimación de la ET_c bajo condiciones estándar.

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad \dots (1)$$

A pesar de que los valores de la evapotranspiración del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración (Jensen *et al.*, 1990).

Coefficiente de cultivo (K_c)

El coeficiente del cultivo (K_c) integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de K_c . Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del K_c . Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de K_c . (Allen, 2006).

Entre los factores que afectan el valor del coeficiente de cultivo son:

- Tipo de cultivo
- Clima
- Evaporación del suelo
- Etapas del crecimiento de cultivo

Coefficiente de cultivo (K_c) de algunos cultivos comunes que serán utilizados en el presente estudio

En el Cuadro 1 se presentan los diferentes valores del coeficiente de uso consuntivo (K_c) determinados por el método del lisímetro, para los cultivos propios del área de riego del valle del Mantaro. Todos los cultivos fueron manejados casi en un 90 por ciento en la campaña mayo- diciembre de cada año, evitando de esta manera la influencia que pudieron tener las lluvias, las mismas que se presentan en mayor intensidad durante los meses de diciembre a febrero (Canales, 2009).

Cuadro 1: Coeficiente de uso consuntivo (K_c) de los principales cultivos de los Andes centrales del Perú, determinados para varias etapas de crecimiento

Cultivos	Días desde la siembra hasta la cosecha														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Papa	0,18	0,23	0,30	0,40	0,53	0,70	0,84	0,94	1,01	1,05	1,07	1,04	0,95	0,80	0,50
Maíz choclo	0,26	0,30	0,35	0,42	0,51	0,62	0,73	0,83	0,91	0,97	1,01	1,02	1,00	0,93	0,80
Haba en verde	0,24	0,30	0,36	0,44	0,54	0,67	0,77	0,86	0,93	0,96	0,99	1,00	0,96	0,88	0,76
Arveja verde	0,30	0,34	0,40	0,48	0,60	0,71	0,80	0,87	0,93	0,96	0,97	0,97	0,94	0,86	0,77
Trigo (*)	0,25	0,36	0,50	0,65	0,78	0,90	0,98	1,04	1,09	1,11	1,12	1,08	0,98	0,94	0,51
Col	0,18	0,23	0,31	0,41	0,53	0,66	0,76	0,85	0,93	0,96	0,98	0,97	0,94	0,85	0,72
Acelga (*)	0,17	0,21	0,28	0,38	0,51	0,64	0,82	0,91	0,97	1,01	1,02	0,99	0,91	0,78	x
Cebolla	0,28	0,34	0,42	0,52	0,62	0,71	0,78	0,84	0,84	0,91	0,92	0,92	0,90	0,85	0,74
Espinaca (*)	0,18	0,22	0,32	0,48	0,71	0,92	1,04	1,06	1,06	0,94	0,73	x	x	x	x
Lechuga	0,21	0,28	0,37	0,50	0,67	0,82	0,91	0,96	0,96	0,91	0,79	x	x	x	x
Zanahoria	0,34	0,41	0,51	0,60	0,70	0,81	0,90	0,97	1,03	1,07	1,09	1,09	0,96	0,96	0,80

(*) K_c obtenido en base a dos campañas

Fuente: Canales (2009)

Los cultivos requieren del agua retenida en el suelo para sus diferentes procesos fisiológicos y biológicos, y esta necesidad se incrementa, conforme se desarrolle la planta, de ahí que el conocimiento de este factor de crecimiento es importante desde el punto de vista de la planificación de los cultivos y la obtención de buenas cosechas. (Ramos *et al.*, 2005)

Cuadro 2: Coeficiente de agua para los cultivos

Cultivos	Días desde la siembra hasta la cosecha					
	30	60	90	120	150	180
Maíz	0.36	0.84	1	0.85	0.46	
Papa	0.36	0.75	0.99	0.91	0.6	
Cebada	0.15	0.33	0.52	0.77	0.7	0.6
Avena	0.15	0.33	0.52	0.77	0.7	0.6
Alfalfa	0.4	1.2	1.2	1.15	1.15	

Fuente: Allen (2006)

2.3.3. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ aj}$)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ aj}$) 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 ET_c debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y básicamente 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 ET_c . En la Ecuación 2 se muestran las variables que intervienen en su cálculo (Allen, 2006).

$$ET_{c\ aj} = K_c \cdot K_s \cdot ET_o \dots (2)$$

Coefficiente de estrés hídrico (K_s)

Los efectos del estrés hídrico sobre el valor la ET del cultivo se reflejan mediante la reducción del valor del coeficiente del cultivo. Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral (Figura 3), se dice que el cultivo se encuentra estresado. Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico, K_s . Cuando se producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo, $K_s < 1$. (Allen, 2006)

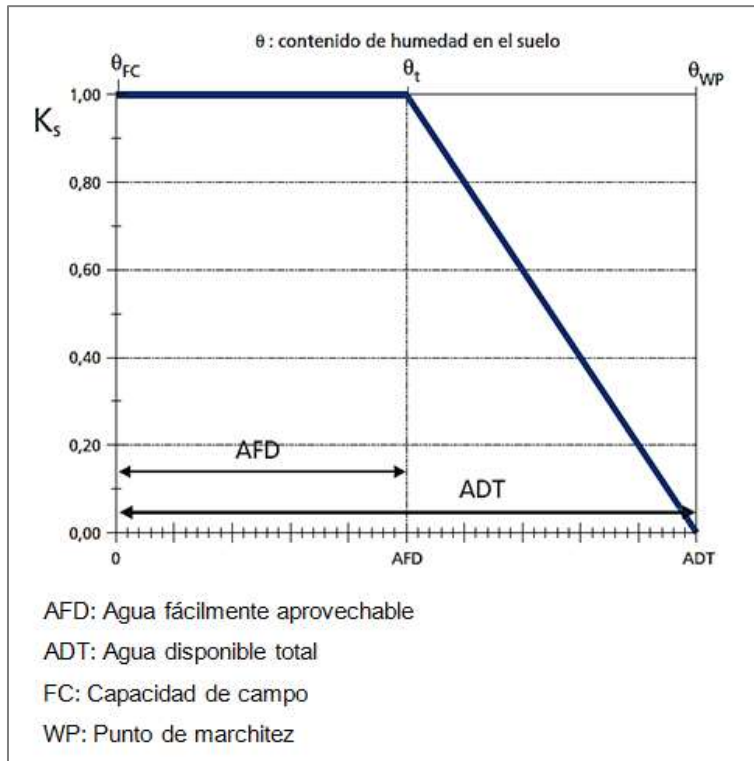


Figura 3: Coeficiente de estrés Hídrico (K_s) (Allen, 2006)

2.4. ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Evapotranspiración del cultivo se puede determinar por mediciones y estimaciones. En general, las mediciones se llevan a cabo en las estaciones agrometeorológicas y sitios experimentales con la finalidad de ser utilizados para evaluar los procedimientos de estimación y para calibrar los parámetros de los métodos de estimación. (Immerzeel, 2008)

2.4.1. Lisímetro

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. 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 de investigación (Abtey y Obeysekera, 1995).

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. En lisímetros de drenaje (Figura 4), 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 (Canales, 2009).

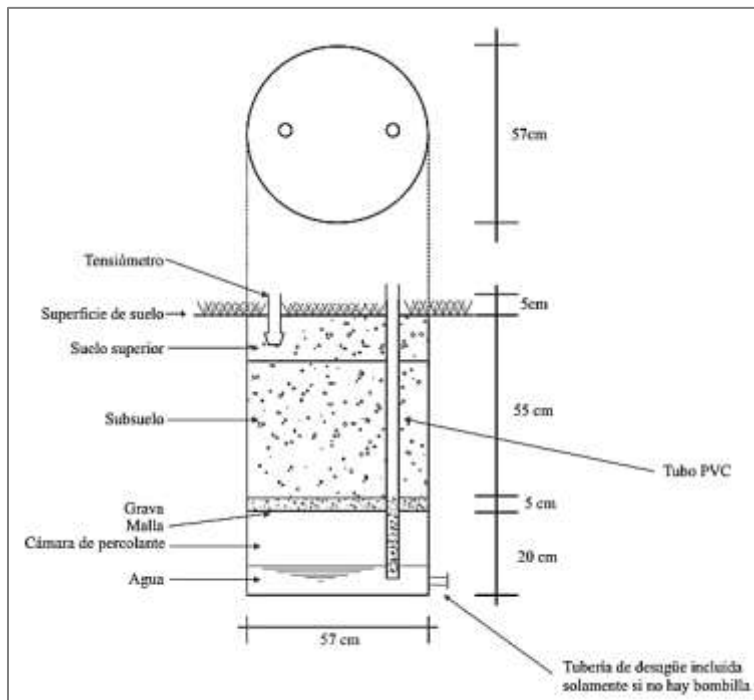


Figura 4: Lisímetro simple de drenaje (Canales, 2009).

2.4.2. Tanque evaporímetro tipo A

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 ido 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 ET_o . (Allen, 2006)

2.4.3. Penman – Monteith

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, la 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. Numerosos investigadores han analizado el funcionamiento de 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 (Ecuación 3) se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración 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 . (Allen, 2006)

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método conocido como combinado fue desarrollado posteriormente por muchos investigadores y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia (Allen *et al.*, 1989).

El método Penman-Monteith 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 sm-1 y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. El método reduce las imprecisiones del método anterior de FAO Penman y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos (Irmak y Haman, 2003).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \dots (3)$$

- ET_o : evapotranspiración de referencia (mm día-1)
- R_n : radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m-2 día-1)
- G : flujo del calor de suelo (MJ m-2 día-1)
- T : temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
- u₂ : velocidad del viento a 2 m de altura (m s-1)
- e_s : presión de vapor de saturación (kPa)
- e_a : presión real de vapor (kPa)
- e_s - e_a : déficit de presión de vapor (kPa)
- Δ : pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C-1)
- γ : constante psicrométrica (kPa °C-1)

2.5. USO DE LA TELEDETECCIÓN PARA ESTIMAR ET

La evapotranspiración es una variable clave en el cálculo del balance de energía superficial, en el balance hídrico, en la detección de estrés hídrico vegetal y también en la estimación de los rendimientos agrícolas. No obstante su medición o, en su defecto, su estimación es muy difícil dada la diversidad y complejidad de los factores que intervienen en el proceso (meteorológico, fisiológico, edafológicos).

Uno de los principales defectos de los métodos clásicos de cálculo de la evapotranspiración es la dificultad de ofrecer una estimación fidedigna para cada área de la superficie estudiada, producto del carácter y validez puntual de la información de entrada y del resultado que entregan. La dificultad anterior se intenta superar en algunas aplicaciones con la interpolación y/o extrapolación de mediciones de las variables climáticas (estaciones meteorológicas) o de las estimaciones a toda la zona estudiada. Dadas estas limitaciones surgieron algoritmos basados en el concepto de balance de energía, los cuales haciendo uso de la percepción remota permite estimar ET en mayores extensiones, teniendo en cuenta la variabilidad espacial de las variables asociadas, como son cobertura, suelo, manejo, clima, etc.

Actualmente existen distintos algoritmos para estimar evapotranspiración mediante el sensores remotos, los cuales surgieron a partir de SEBAL, estos son el método METRIC (Mapping Evapotranspiration at high resolution with Internalized Calibration), SEBS (Surface Energy Balance System) y ETLook similar a SEBAL pero basado en datos de satélite de microondas (Droogers *et al.*, 2009). Sin embargo, SEBAL sigue siendo el principal método para estimar ET, debido a la antigüedad y al soporte de investigación que lo respalda (Allen *et al.*, 2011). No obstante, es importante tener en consideración que para conseguir una operatividad adecuada de los métodos que utilizan información satelital y la validación de sus resultados, es necesaria información registrada en la superficie. (Martínez, 2002)

Monitorear evapotranspiración a grandes escalas es importante para evaluar el clima y los efectos antropogénicos en los ecosistemas naturales y agrícolas. Los resultados de los modelos climáticos indican que los cambios en la humedad disponible liberados a la atmósfera pueden tener efectos de retroalimentación importantes en la formación de nubes, que a su vez afecta en gran medida el balance de radiación y campos de precipitación a escala mundial y continental. (Kustas y Norman, 1996)

2.5.1. Teledetección en la agricultura

La teledetección satelital es una tecnología que permite diseñar métodos de inferencia de parámetros de la superficie de la tierra mediante la medición de la radiación

electromagnética de la superficie. La teledetección, con mayor o menor precisión, ha sido capaz de proporcionar información sobre el uso de la Tierra, la superficie de regadío, el tipo de cultivo, el desarrollo de la biomasa, el rendimiento del cultivo, las necesidades de agua de los cultivos, la evapotranspiración del cultivo, la salinidad, el anegamiento y la escorrentía de los ríos. Esta información cuando se presenta en el contexto de la gestión puede ser muy valiosa para la planificación y evaluación. (Bastiaanssen *et al.*, 2000)

La teledetección tiene varias ventajas con respecto a las mediciones de campo. En primer lugar, las medidas derivadas de la teledetección son objetivas; no se basan en opiniones. En segundo lugar, la información se recopila de manera sistemática que permite series de tiempo y la comparación entre los regímenes. En tercer lugar, la teledetección cubre un área amplia como las cuencas fluviales enteras. Los estudios de suelos a menudo se limitan a una pequeña área piloto debido a los gastos y las limitaciones logísticas. En cuarto lugar, la información puede ser agregada para dar una representación mayor, o desglosados a escalas muy finas para proporcionar información más detallada y explicativa relacionada con la uniformidad espacial. En quinto lugar, la información se puede representar espacialmente a través de sistemas de información geográfica, revelando información que a menudo no es evidente cuando la información se presenta en forma de tabla. (Bastiaanssen *et al.*, 2000)

La teledetección tiene la posibilidad de ofrecer información relacionada con recursos de agua importante para las políticas responsables, gerentes, consultores, investigadores y al público en general. Esta información es potencialmente útil en la legislación, la planificación, la asignación del agua, evaluación del desempeño, evaluación de impacto, la investigación, y en la salud y campos relacionados con el medio ambiente, en la Figura 5, se muestra la secuencia de procedimientos necesarios para interpretar las mediciones espectrales de satélite para su uso en la gestión práctica de agua.

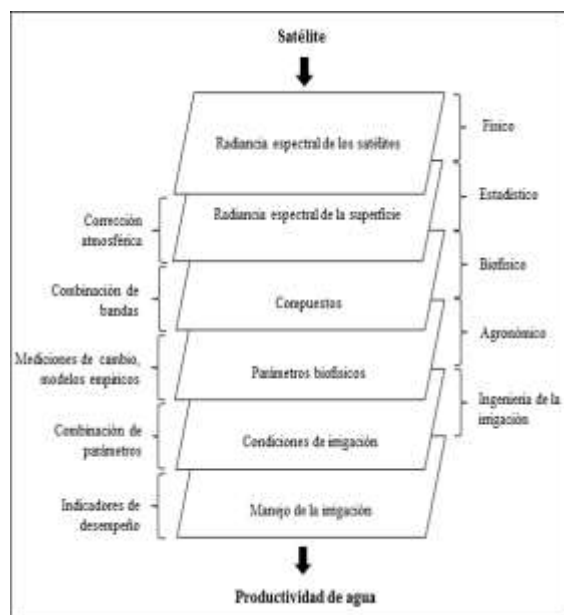


Figura 5: Disciplinas y secuencia de procedimientos necesarios para interpretar las mediciones espectrales de satélite para su uso en la gestión práctica de agua. Modificado de Bastiaanssen *et al.* (2000)

2.5.2. Imágenes satelitales para la estimación de ET

Entre los sensores o satélites que proporcionan imágenes adecuadas para la estimación de evapotranspiración mediante el balance de energía se muestran en el Cuadro 3, (Bastiaanssen *et al.*, 2000).

Cuadro 3: Resolución espacial y temporal de las Imágenes Satelitales

Satélite	Sensor	Propiedad	Inicio - Fin	Resolución espacial (m)	Resolución temporal (días)
Landsat 5	TM	NASA/USGS	1984 - 2011	30, 120	16
Landsat 7	ETM+	NASA/USGS	1999 - 2003	30, 60	16
Landsat 8	OLI	NASA/USGS	2013 - presente	30	16
Terra	ASTER	NASA/JAXA	2000 - presente	15	5
Terra/Aqua	MODIS	NASA	2000 - presente	250	1
NOAA	AVHRR	USGS	1998 - presente	1000	1

Elaboración propia

En relación con el procesamiento de Balance de Energía, se utilizan el espectro visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR) y canales térmicos infrarrojos (TIR) para estimar los parámetros de superficie primarias como albedo de la superficie, temperatura de la superficie, la temperatura del aire, rugosidad de la superficie, cobertura del suelo, y el uso de la tierra pueden ser proporcionados por teledetección. (Arasteh, 2005)

Landsat 5 TM

La serie de satélites Landsat ofrece la colección continua más larga de observaciones satelitales. Por lo tanto, Landsat es un valioso recurso para el seguimiento del cambio mundial y es la fuente principal de observaciones de resolución espacial media de la Tierra usada en la toma de decisiones. (Chander *et al.*, 2009)

La segunda generación de satélites Landsat marcó un avance significativo en la teledetección mediante la incorporación de un sensor más sofisticado (TM), el cual mejora la adquisición y transmisión de datos, además y procesamiento de datos más rápida a una instalación de procesamiento altamente automatizado. (Chander *et al.*, 2009)

El sensor TM es un avanzado sensor de barrido multi-espectral, concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación con el sensor MSS. Opera simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal, tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 metros en la banda del infrarrojo termal (Cuadro 4). La escena terrestre registrada por este sensor es también de 185 km. (Ramos *et al.*, 2005)

Cuadro 4: Características de las imágenes Landsat 5 TM

Banda		Resolución espacial (m)
1	Azul - Visible	30
2	Verde - Visible	30
3	Rojo - Visible	30
4	IR cercano	30
5	IR medio	30
6	IR termal	120
7	IR medio	30

Fuente: USGS

El desarrollo de capacidades para detectar y cuantificar los cambios en el medio ambiente de la Tierra y en el balance energético global requiere de satélites que puede proporcionar las mediciones cuantitativas de características de la superficie de la Tierra. El TM es un sistema de exploración de siete bandas espectrales diseñado para adquirir imágenes repetitivas de la superficie de la Tierra, cuenta con todo para la búsqueda de recursos y funciones de gestión ambiental. El TM tiene fuentes de radiación a bordo que sirven como calibradores en órbita (Cuadro 5). (Wukelic *et al.*, 1989)

Cuadro 5: Rango espectral TM, post-calibración rangos dinámicos, y la media de la irradiación solar exo-atmosférica ($ESUN_{\lambda}$)

Banda	Intervalo espectral (μm)	$L_{\text{MIN}\lambda}$ W/(m ² sr μm)	$L_{\text{MAX}\lambda}$ W/(m ² sr μm)	G_{rescale} (W/m ² sr μm)/DN	B_{rescale} W/(m ² sr μm)	$ESUN_{\lambda}$ W/(m ² sr μm)
1	0.45 - 0.51	-1.52	193	0.77	-2.29	1983
2	0.53 - 0.59	-2.84	365	1.45	-4.29	1796
3	0.64 - 0.67	-1.17	264	1.04	-2.21	1536
4	0.85 - 0.88	-1.5	221	0.88	-2.38	1031
5	1.57 - 1.65	-0.37	30	0.12	-0.49	220
6	10.6 - 11.19	1.238	15.303	0.06	1.18	N/A
7	2.11 - 2.29	-0.15	16.5	0.07	-0.22	83.44

Fuente: (Chander y Markham, 2003)

El sensor TM incluye un sistema de calibración a bordo llamado el IC. El IC consta de un indicador de obturación negro, tres lámparas, una cavidad de cuerpo negro, y los componentes ópticos necesarios para conseguir la lámpara y el resplandor de cuerpo negro hasta el plano focal. Las lámparas se utilizan para calibrar las bandas reflectantes, y el cuerpo negro se utiliza para calibrar la banda térmica. (Chander *et al.*, 2009)

2.6. MÉTODO DEL BALANCE DE ENERGÍA

La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en 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 (Ecuación 4). La energía que llega a la superficie debe ser igual 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 para una superficie de evaporación se puede escribir como:

$$R_n = G + \lambda ET + H \dots (4)$$

Donde R_n es la radiación neta, H es el calor sensible, G es el flujo de calor del suelo, y λET es el 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. En la ecuación 4 solamente se consideran flujos verticales y se ignora la tasa neta de energía que se transfiere horizontalmente por advección. Por lo tanto, la ecuación se aplica solamente a superficies grandes y extensas de vegetación homogénea. 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 (Bastiaanssen *et al.*, 1998a).

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. (Allen, 2006)

Método del balance de energía SEBAL

Los procesos en la superficie de la tierra son de suma importancia para la redistribución de la humedad y el calor en el suelo y la atmósfera. Los intercambios de flujos radiativos, calor y humedad afectan el desarrollo de la biosfera y de las condiciones materiales de vida en la tierra. En el balance de energía en la superficie de la tierra (Figura 6) se manifiesta el equilibrio termodinámico entre los procesos de transporte de turbulencia en la atmósfera y los procesos laminares en la sub-superficie (Bastiaanssen *et al.*, 1998a).

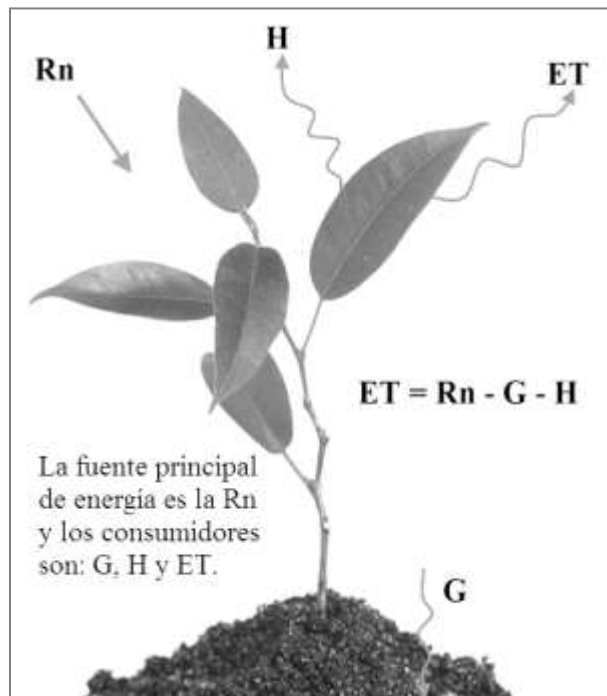


Figura 6: Balance de energía para estimar evapotranspiración – Elaboración propia

En la Figura 7, se muestra la descripción general de funcionamiento del algoritmo SEBAL el cual utiliza datos de entrada que se obtienen de modelos de elevación digital (DEM), y datos recogidos en una imagen satelital Landsat u otro satélite. Con estos antecedentes se calcula la radiancia y reflectancia de cada píxel de la imagen, y se establece el balance de radiación en la superficie, y con ello se obtiene la radiación neta, (R_n), primera variable que ingresa en la ecuación del balance de energía. (Núñez Juliá, 2009)

A partir de la imagen satelital, se obtienen las variables de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la temperatura superficial (T_o), y la altura de aspereza superficial (z_{om}). Posteriormente con NDVI y R_n , se obtiene una aproximación del flujo de calor del suelo (G_o), indicada como la segunda variable que ingresa al balance de energía. Finalmente, utilizando las variables T_o y z_{om} , junto con la velocidad del viento, medida cerca de la superficie en la zona de estudio (u_x), y la identificación de puntos con evaporaciones máximas y mínimas, se obtiene la tercera variable para el balance de energía superficial; el flujo de calor sensible (H). Estas tres variables, ingresan a la ecuación de balance de energía, y de ella se obtiene la evapotranspiración por diferencia para cada píxel. (Núñez Juliá, 2009)

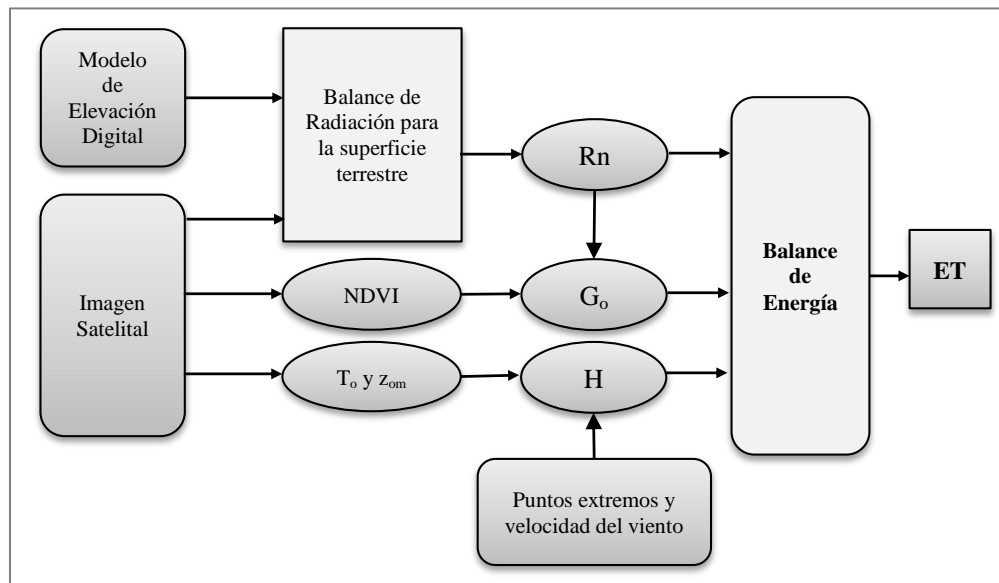


Figura 7: Descripción general de funcionamiento del algoritmo SEBAL. Modificado de Núñez Juliá (2009)

2.6.1. Radiación Neta (Rn)

EL flujo de la radiación neta (Rn) en la superficie representa la energía de radiación disponible en la superficie. Este es calculado mediante la diferencia entre los flujos de radiación salientes y los flujos de radiación entrantes. Esto se observa en la Figura 8 del balance de radiación en la superficie de la tierra.

$$Rn = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) * R_{L\downarrow} \dots (5)$$

En la Ecuación 5, la cantidad de radiación de onda corta ($R_S \downarrow$) que queda disponible en la superficie es una función del albedo de la superficie (α). Albedo de la superficie es un coeficiente de reflexión, se define como la relación entre el flujo radiante reflejada para el flujo radiante incidente sobre el espectro solar. Se determina utilizando la información de cada banda de las imágenes satelitales, excepto la banda térmica.

La radiación de onda corta entrante ($R_{S\downarrow}$) se define utilizando la constante solar, el ángulo de incidencia solar, una distancia relativa Tierra-Sol, y una transmisividad atmosférica calculada. La radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$) se estima utilizando una ecuación de Stefan-Boltzmann modificado con transmisividad atmosférica y una temperatura de referencia de la superficie seleccionada. Radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$) es calculada utilizando la ecuación de Stefan-Boltzmann con una emisividad (ϵ_0) de la superficie y la temperatura de la superficie estimada. Las temperaturas de superficie se determinan a partir de información de imágenes satelitales en la banda térmica. (Allen et al., 2002a)

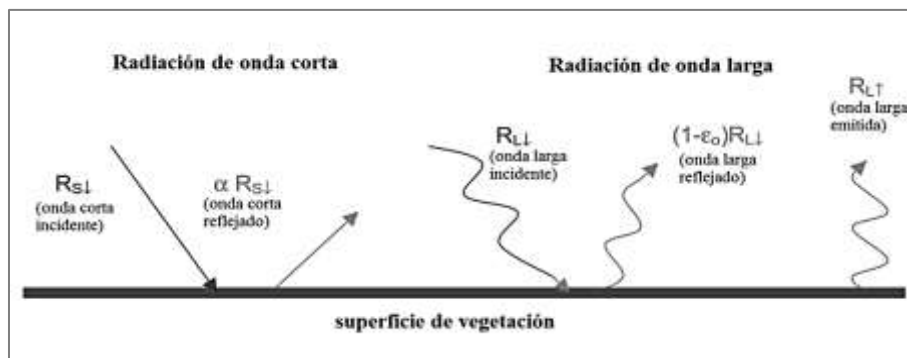


Figura 8: Balance de radiación en la superficie – modificado de (Allen et al., 2002a)

2.6.2. Flujo de Calor del Suelo (G_o)

La magnitud del flujo de calor almacenado o liberado por el suelo es relativamente pequeña en relación al resto de flujos. Cuando se considera un ciclo temporal diario, al darse un proceso de calentamiento y enfriamiento, no se considera su contribución al balance de energía. Si se considera intervalos horarios o distintos a un día completo su aportación puede ser significativa, y deberían ser incluidos. (Gordillo Salinas, 2013)

En la aplicación de SEBAL para la obtención de G_o (Ecuación 6), depende de la radiación neta (R_n), el Índice de la Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI), la temperatura de la superficie (T_o) y el albedo (α_o). (Allen *et al.*, 2002a)

$$G_o = \left[\frac{T_o}{\alpha} (0.0038 * \alpha + 0.007 \alpha^2) (1 - 0.98 * NDVI^4) \right] * R_n \dots (6)$$

Además, Allen *et al.* (2002a) asigna un valor constante de G_o/R_n igual a 0.5 para el agua debido a la absorción de radiación de onda corta más cerca de la superficie del agua, los cuerpos de agua se distinguen por tener un NDVI inferior a cero y un elevado albedo superficial.

2.6.3. Flujo de Calor Sensible (H)

Flujo de calor sensible es la tasa de pérdida de calor al aire por convección y conducción, debido a una diferencia de temperatura. Se calcula utilizando la Ecuación 7 para el transporte de calor:

$$H = \frac{\rho_{air} \cdot C_{p_{air}} \cdot dT}{rah} \dots (7)$$

Donde; ρ es la densidad del aire (kg/m^3), C_p es el calor específico del aire ($1,004J/kg/K$), dT (K) es la diferencia de temperatura ($T_1 - T_2$) entre dos alturas (z_1 y z_2), y rah es la resistencia aerodinámica al transporte de calor (s/m) mostrado en la Figura 9.

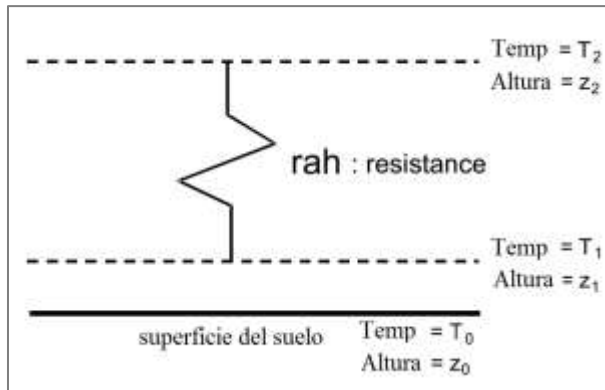


Figura 9: Bosquejo de la transferencia de calor aerodinámico (Bastiaanssen, 2000).

El flujo de calor sensible (H) es una función del gradiente de temperatura (Figura 10), rugosidad de la superficie y velocidad del viento. La ecuación anterior es difícil de resolver porque hay dos incógnitas, rah y dT . Para facilitar este cálculo, utilizamos los dos píxeles "extremos" (donde los valores fiables para H se pueden predecir y estimar un dT) y la velocidad del viento a una altura determinada. (Allen *et al.*, 2002a)

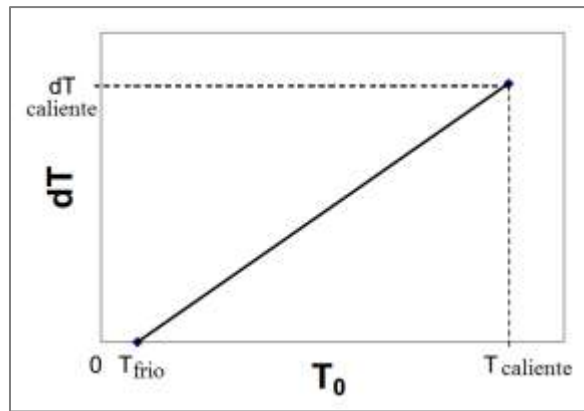


Figura 10: Concepto de dT (diferencia de temperatura entre la superficie y el aire) la predicción en SEBAL (Morse *et al.*, 2000).

La resistencia aerodinámica al transporte de calor (rah) se determina mediante la Ecuación 8, donde, z_1 y z_2 son alturas en metros sobre el desplazamiento del plano cero de la vegetación, u^* es la velocidad de fricción (m/s) que cuantifica las fluctuaciones de velocidad turbulenta en el aire, y k (0.41) es la constante de von Karman. (Allen *et al.*, 2002a)

$$rah = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^* \cdot k} \dots (8)$$

La velocidad de fricción (u^*) se define utilizando la ley de viento logarítmico para las condiciones atmosféricas neutrales con la Ecuación 9, donde, k es la constante de von Karman, u_x es la velocidad del viento (m/s) a la altura de z_x y z_{om} es la longitud de rugosidad. La variable z_{om} es una medida de la resistencia aerodinámica del rozamiento de la capa de aire que interactúa con la superficie (Allen *et al.*, 2002a).

$$u^* = \frac{k \cdot u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{om}}\right)} \dots (9)$$

Para el cálculo del flujo de calor sensible se requiere realizar un proceso de iteraciones para calcular los valores finales de u^* , rah , dT y el flujo de calor sensible.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. AREA DE ESTUDIO

El valle del Mantaro (Figura 11) ubicado en el departamento de Junín, está formado por el río del mismo nombre, se encuentra entre los paralelos $11^{\circ}40'$ y $12^{\circ}10'$ sur y los meridianos $75^{\circ}10'$ y $75^{\circ}35'$ oeste en la sierra central del Perú. Tiene una longitud de 70 km desde los alrededores de la ciudad de Jauja (al norte) hasta las localidades de Pucará y Huacrapuquio al extremo sur, su ancho es variable con rangos entre 2 y 8 km, presenta altitudes entre 3100 y 3400 msnm aproximadamente. (Cruz *et al.*, 2010)

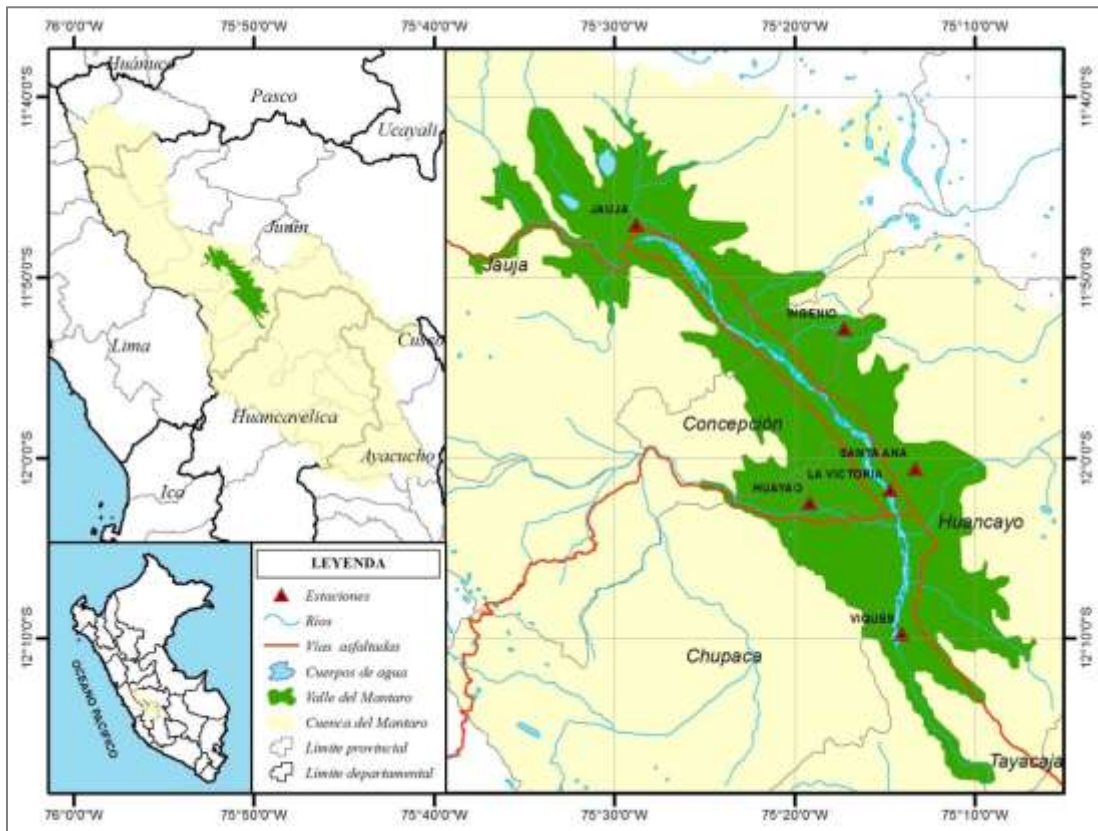


Figura 11: Área de estudio: Valle del Mantaro

El Valle del Mantaro se ubica en los Andes centrales del Perú, abarca las provincias de Jauja, Huancayo, Concepción y Chupaca. Este valle es una de las principales

zonas de cultivo de la sierra Peruana, con aproximadamente 100,000 hectáreas de tierras agrícolas, de las cuales apenas el 29% están bajo riego, siendo el resto tierras de secano.

3.2. MATERIALES

3.2.1. Información espacial

La información espacial fue descargada de forma libre de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (United State Geological Survey - USGS) <http://earthexplorer.usgs.gov>.

a. Imágenes Satelitales

Se descargaron seis imágenes satelitales Landsat 5 TM de 30 por 30 metros de resolución espacial correspondientes al año 2008 y a los meses de abril, mayo, junio, julio y agosto de acuerdo al siguiente detalle. Se seleccionó el año 2008, debido a que fue el único año en el que se encontraron imágenes correspondientes al mes de abril, mes en el que se encuentra la mayor extensión de cultivos sembrados, campaña grande (siembra en secano).

Cuadro 6: Detalle de las Imágenes satelitales Landsat 5TM descargadas

Imágenes Landsat 5 TM descargadas			
Path		006	
Row		068	
Imagen Satelital	Día Juliano	Fecha	Campaña de cultivo
LT50060682008099CUB00	099	8-Apr-08	Campaña grande (siembra en época de lluvias)
LT50060682008115COA00	115	24-Apr-08	
LT50060682008147CUB00	147	26-May-08	Final de campaña grande y transición a campaña chica (época de cosecha)
LT50060682008179CUB00	179	27-Jun-08	
LT50060682008195CUB00	195	13-Jul-08	Campaña chica (siembra con irrigación)
LT50060682008227CUB00	227	14-Aug-08	

b. Modelo de elevación Digital

En la Figura 12, se muestra el mapa de elevación para el valle del Mantaro, producto de la descarga de un archivo ASTER GDEM versión 2, de 30 por 30 metros de resolución espacial actualizadas al 2011 de la página de la USGS <http://earthexplorer.usgs.gov>.

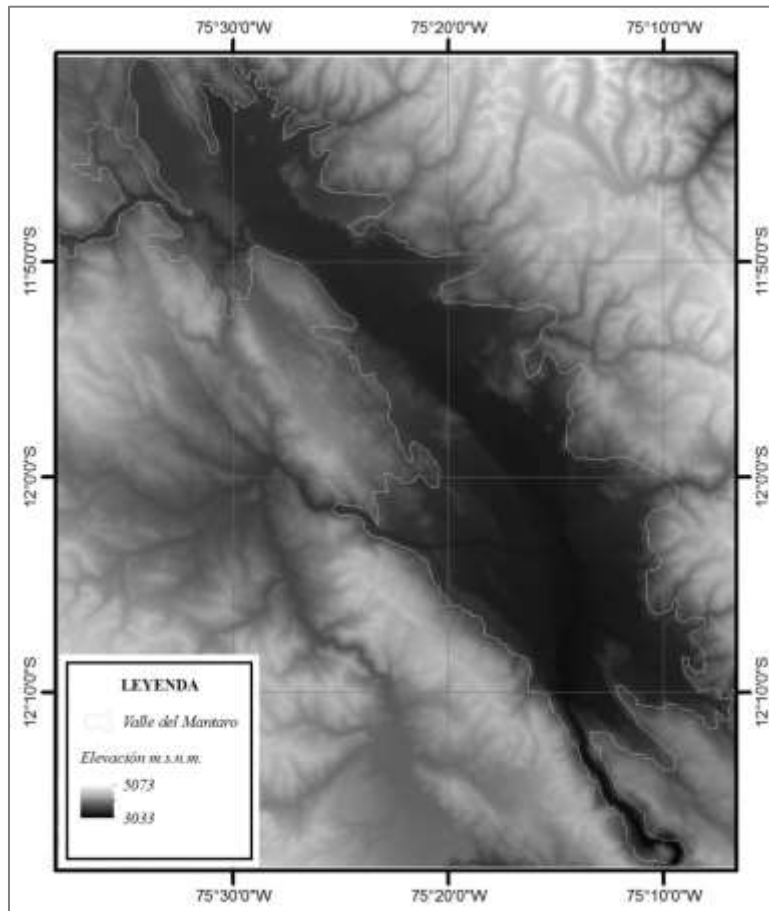


Figura 12: Modelo de elevación digital del Valle del Mantaro

3.2.2. Datos meteorológicos

La información meteorológica utilizada fue proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el Centro Internacional de la Papa (CIP), según se detalla en el Cuadro 7. Estos datos meteorológicos fueron necesarios para realiza los procesos de: implementación del modelo SEBAL y validación y comparación de resultados.

Cabe resaltar que la información horaria es indispensable para poder hacer la implementación y validación de las variables de Temperatura del aire y Radiación solar debido a que los productos estimados por SEBAL son los correspondientes a la hora a la que fue capturada la imagen, a excepción de la Evapotranspiración, el cual es un valor diario.

Cuadro 7: Estaciones meteorológicas utilizadas

Estación	Latitud	Longitud	Elevación	Institución	Datos
Huayao	12° 02' 30" S	75° 19' 10" W	3311	SENAMHI - IGP	$T_{\max}, T_{\min} H_r$ (Diario)
Santa Ana	12° 00' 34" S	75° 13' 19" W	3296	SENAMHI	$T_{\max}, T_{\min} H_r$ (Diario)
Ingenio	11° 52' 50" S	75° 17' 16" W	3430	SENAMHI	$T_{\max}, T_{\min} H_r$ (Diario)
Jauja	11° 47' 04" S	75° 28' 48" W	3361	SENAMHI	$T_{\max}, T_{\min} H_r$ (Diario)
Viques	12° 09' 45" S	75° 14' 03" W	3172	SENAMHI	$T_{\max}, T_{\min} H_r$ (Diario)
La Victoria	12° 01' 46" S	75° 14' 43" W	3207	CIP	$T_{\max}, T_{\min}, H_r, R_s$, Velocidad del viento (Horario)

Implementar el modelo:

- Velocidad del viento horario (m/s), este dato es indispensable para el procedimiento SEBAL, ya que funciona como input para estimar el flujo de calor sensible (H). También se requiere la altura (h) a la que fue tomada esa velocidad del viento sobre la superficie del terreno.

Validación y comparación de resultados:

- Radiación Solar horario (W/m^2), este dato es requerido para la validación.
- Temperatura del aire horario ($^{\circ}C$), este dato es requerido para la validación.
- Datos de T_{max} , T_{min} , T_{med} , humedad relativa (H_r), horas de sol (n), para estimar Evapotranspiración de referencia (ET_o) por el método de Penman-Monteith, asimismo obtener datos de ET_o estimados por el método de tanque evaporímetro tipo A.

3.2.3. Datos de campo

Para tomar estos datos de campo se identificaron cinco áreas en el valle del Mantaro correspondientes a parcelas cercanas a las estaciones Huayao, Santa Ana, Ingenio y Jauja del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la estación La Victoria del Centro Internacional de la Papa (CIP); estas zonas fueron elegidas debido a que contaban con información meteorológica necesaria para estimar la evapotranspiración de referencia usando el método de Penman - Monteith y en el caso de la estación Huayao y Santa Ana, también se contó con información de tanque evaporímetro Tipo A.

Una vez identificadas las zonas (terrenos agrícolas) adyacentes a las estaciones mencionadas se realizó un viaje con la finalidad de visitar el área de estudio y obtener la información, los datos tomados fueron: tipo de cultivo que normalmente se siembra en esa época como papa, maíz u otro cultivo y fecha de siembra aproximada (Cuadro 8).

Debido a la antigüedad de las imágenes satelitales (2008), las alturas de vegetación (utilizadas para estimar la rugosidad de la superficie " z_{om} ") consideradas en cada una de las zonas y para cada fecha de la imagen, fueron referenciales de acuerdo a dos tesis que se realizaron en el año 2008 en el marco del Subproyecto "Pronóstico estacional de lluvias y temperaturas en la cuenca del río Mantaro para su aplicación en la agricultura 2007-2010" (Instituto Geofísico del Perú, 2010). Para otros cultivos distintos a la papa y maíz, se hizo una revisión de literatura.

Zonas monitoreadas

Los terrenos de cultivo fueron identificados teniendo como referencia el Índice de vegetación de diferencia Normalizada (NDVI) proveniente de las imágenes satelitales descargadas, esto con la finalidad de asegurarnos que los terrenos agrícolas con cultivo coincidan con las fechas de las imágenes satelitales descargadas (2008).

Cuadro 8: Cultivos identificados en el Valle del Mantaro para el año 2008

Estación	Cultivo Identificado	Fecha de siembra	Periodo vegetativo
Huayao	Papa	Marzo 2008	150 - 170 días
	Avena forrajera	Enero 2008	150 - 210 días
Santa Ana	Maíz	Diciembre 2007	150 - 180 días
	Tarwi - Chocho	Diciembre 2007	145 -325 días
	Arveja Verde	Enero 2008	150 - 210 días
Ingenio	Alfalfa	No definido	3+ años
	Maíz	Diciembre 2007	150 - 180 días
Jauja	Pasto	No definido	3+ años
La Victoria	Maíz Lote1	Noviembre 2007	150 - 180 días
	Maíz Lote2	Noviembre 2007	150 - 180 días

a. Estación Santa Ana

Se visitó la estación experimental agrícola de Santa Ana perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), el cual cuenta con varios lotes de cultivo orientados a viabilizar soluciones para un desarrollo sostenible de la agricultura. En esta zona, se definieron tres terrenos de cultivo, cuyo tipo de cultivo fue identificado con apoyo del jefe de campo del INIA.

b. Estación Huayao

Se visitó el Observatorio de Huancayo, donde se encuentra ubicada la estación climatológica de Huayao perteneciente al Instituto Geofísico del Perú (IGP). En esta zona se definieron dos terrenos agrícolas, cuyo tipo de cultivo fue identificado con apoyo de los pobladores de la zona.

c. Estación La Victoria

Se visitó el campo experimental La Victoria del Centro Internacional de la Papa (CIP), en esta zona se definieron dos terrenos agrícolas, cuyo tipo de cultivo fueron identificados con apoyo del jefe de campo de la estación experimental.

d. Estación Ingenio

Se visitó el centro poblado de Quichuay, debido a que este pueblo se encuentra cerca de la estación meteorológica de Ingenio. En esta zona se definieron dos terrenos agrícolas, cuyo tipo de cultivo fue identificado con apoyo de los habitantes del centro poblado de Quichuay.

e. Estación Jauja

En esta zona no se encontró ningún terreno con cultivo que coincida con las fechas de las imágenes satelitales descargadas, pero con la finalidad de utilizar la información meteorológica disponible, se definió como área de evaluación al pasto permanente que se encuentra en el estadio de Jauja.

Determinación del coeficiente de cultivo (K_c)

A partir de estos datos de campo, el cual nos permitió conocer la fecha de siembra y el tipo de cultivo, se hizo la revisión de literatura, principalmente se consultó un estudio realizado por el INIA de Huancayo (Canales, 2009), en el que se encontraron disponibles

estos valores de K_c para cada cultivo de acuerdo a su periodo vegetativo. Finalmente se obtuvieron los valores de K_c para cada cultivo y en la fecha correspondiente, como se mostró en el Cuadro 9.

Cuadro 9: Valores de “ K_c ” para los cultivos identificados en el Valle del Mantaro

Estación	Cultivo Identificado	Valores de " K_c "					
		8-Abr	24-Abr	26-May	27-Jun	13-Jul	14-Ago
Huayao	Papa	0.23	0.35	0.84	0.99	0.97	0.50
	Avena forrajera	0.75	0.77	0.70	0.60	0.33	0.15
Santa Ana	Maíz	0.91	1.01	0.95	0.75	0.62	0.30
	Tarwi - Chocho	0.95	0.91	0.72	0.58	0.45	0.34
	Arveja Verde	0.97	0.94	0.70	0.48	0.40	0.30
Ingenio	Alfalfa	1.20	1.20	1.20	1.15	1.15	1.15
	Maíz	1.02	1.00	0.90	0.80	0.75	0.70
Jauja	Pasto	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
La Victoria	Maíz Lote1	0.93	0.80	0.50	0.26	0.00	0.00
	Maíz Lote2	0.96	0.84	0.54	0.30	0.00	0.00

3.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN SEBAL

En la implementación del modelo, se utilizó el software ArcGIS v.10.2, ya que este cuenta con una herramienta para la construcción de modelos (Model Builder), en el cual se programaron todos los algoritmos que utiliza SEBAL para estimar la evapotranspiración. El lenguaje de programación que utiliza esta herramienta es Phyton v. 2.7.

3.3.1. Coseno del ángulo de incidencia

En la definición del coseno de ángulo de incidencia que interviene en el pre-procesamiento de la imagen, específicamente en el cálculo de la reflectancia, intervienen siete

variables mostradas en el flujograma de la Figura 13, las cuales fueron obtenidas a partir del modelo de elevación digital (DEM) y el archivo MTL de la imagen satelital descargada (Morse *et al.*, 2000).

La ecuación para estimar el coseno del ángulo de incidencia $\text{Cos}(\theta)$, fue propuesta por Duffie y Beckman (1980), la cual es aplicada en zonas montañosas para el cálculo de la radiación de onda corta entrante. Los principios que utiliza esta ecuación son las correcciones por pendiente y aspecto (orientación de la normal de la pendiente) para cada pixel de la imagen ya que la cantidad de radiación recibida por una superficie está determinado por la geometría del terreno y la posición del sol (Allen *et al.*, 2006).

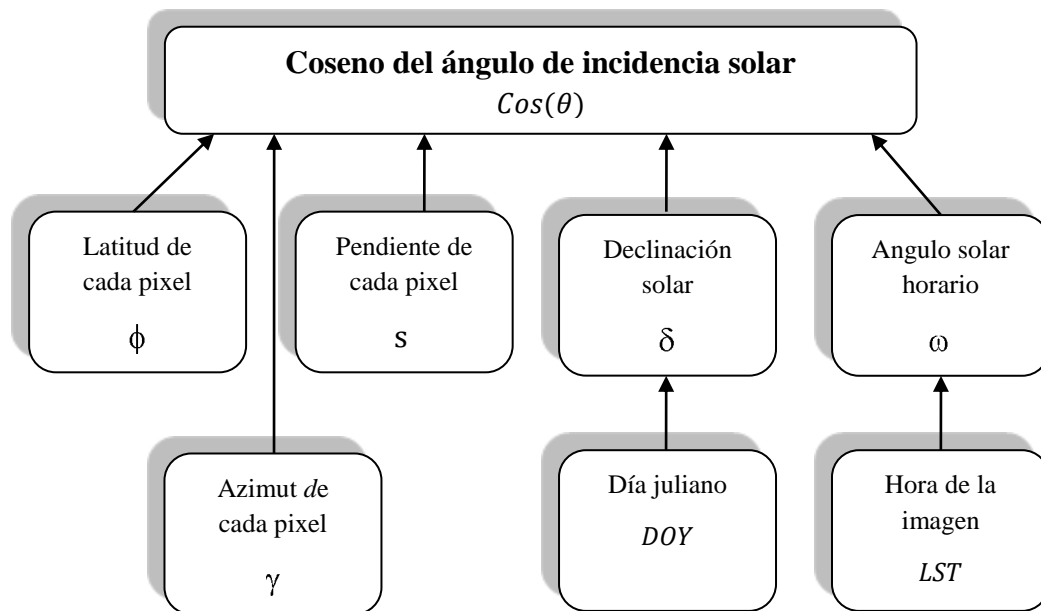


Figura 13: Flujograma para la estimación del coseno del ángulo de incidencia

3.3.2. Radiación Neta

En este proceso intervienen un gran número de variables, mostrados en la Figura 14, los cuales fueron definidos a partir del DEM, las bandas de las imágenes satelitales descargadas ($b_1 - b_7$) y el archivo MTL de cada imagen. Dentro del pre-procesamiento de los datos de los satélites, los números digitales de cada una de las bandas (i) fueron convertidas a radiancias (L_i) y reflectancias (r_i) a excepción de la banda térmica (b_6), estas variables se

calculan mediante coeficientes calibrados que varían con cada imagen y se encuentran en respectivo archivo MTL de cada imagen, posteriormente a este pre proceso, se estimó el albedo superficial (α) (Morse *et al.*, 2000).

Como segundo paso se estimó el NDVI, para el cual SEBAL utiliza las reflectancias obtenidas en las regiones del visible – rojo (b_4) y el infrarrojo cercano (b_3) (Morse *et al.*, 2000). Este índice de vegetación es la variable principal para estimar la emisividad de la superficie utilizando un modelo teórico propuesto por Caselles y Sobrino (1989) en el que se estima la emisividad (ϵ_0) en una superficie heterogénea y que posteriormente se utilizó para estimar la temperatura superficial (T_0). (Valor y Caselles, 1996)

En el cálculo de la temperatura superficial se utilizó la banda térmica (b_6) de la imagen Landsat 5TM, luego del cálculo de esta última variable se procedió en la estimación de la Radiación neta, el cual requiere de un balance de radiación en la superficie entre las radiaciones de onda corta y larga entrantes ($R_{S\downarrow}$, $R_{L\downarrow}$) y las radiaciones de onda corta y larga salientes ($R_{S\uparrow}$, $R_{L\uparrow}$). Para la radiación de onda corta entrante se utilizó el coseno del ángulo de incidencia estimado inicialmente.(Allen *et al.*, 2002a)

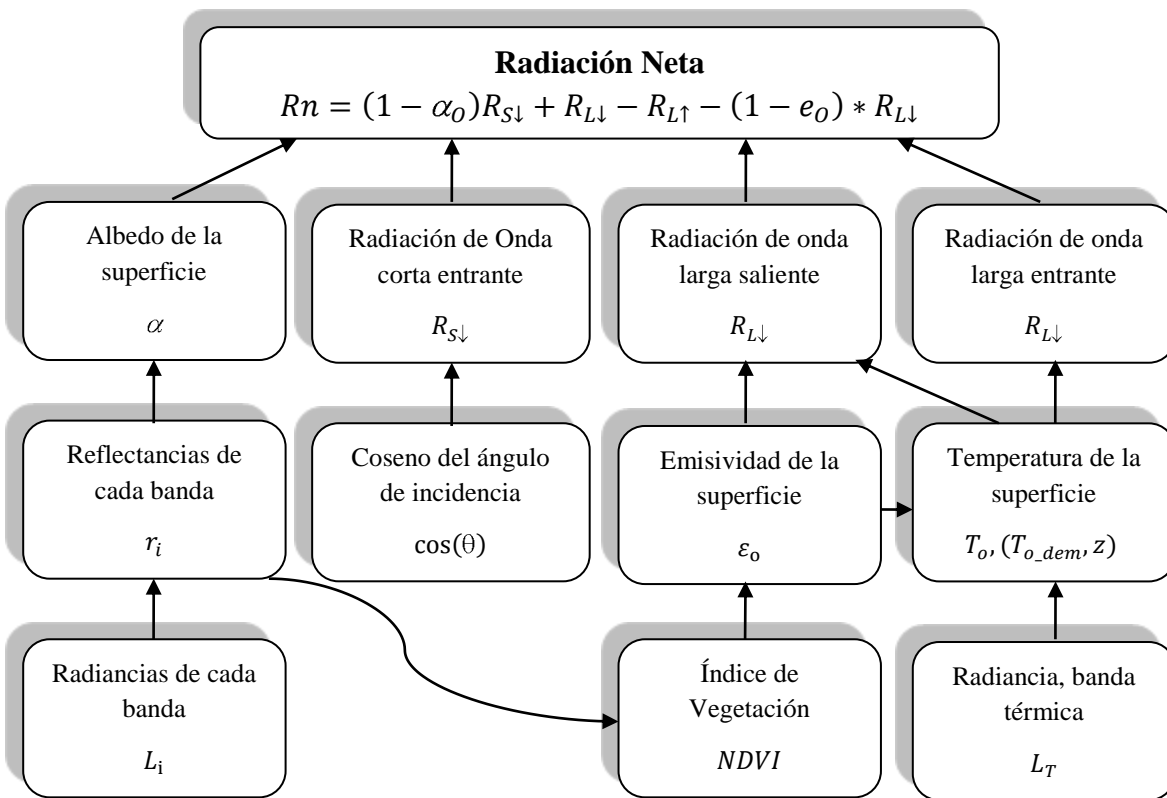


Figura 14: Flujograma para la estimación de la Radiación Neta

3.3.3. Flujo de Calor del Suelo

En la definición del Flujo de calor del suelo (G_o) se utilizó una ecuación empírica desarrollada por Bastiaanssen (2000), en la que interviene la radiación neta (R_n), la temperatura de la superficie, el albedo superficial y el NDVI, como se muestra en el siguiente esquema (Figura 15). Para estimar G_o en cuerpos de agua, se utilizó una relación también propuesta por Bastiaanssen (2000), donde G_o equivale al cincuenta por ciento de R_n previamente estimada.

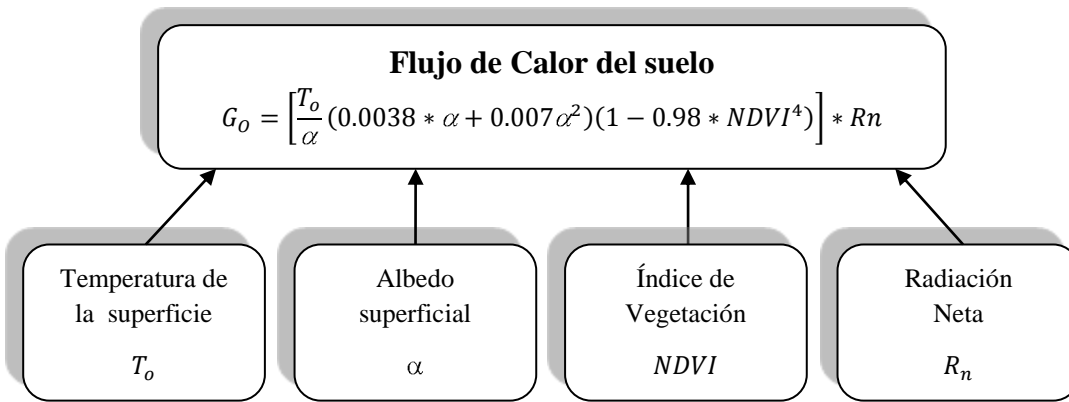


Figura 15: Flujograma para la estimación del Flujo de calor del suelo

3.3.4. Flujo de Calor Sensible

El flujo de calor sensible (H) fue estimado utilizando la ecuación para el transporte de calor, H está en función del gradiente de temperatura (dT) que varía entre el suelo y aire, la rugosidad de la superficie (z_{om}), la resistencia aerodinámica al transporte de calor (rah), la velocidad del viento la temperatura del suelo corregida por la altura (T_{o_dem}).

Como se muestra en el esquema de la Figura 16, para el cálculo de H, inicialmente se utilizaron datos de campo (alturas de vegetación) para estimar el z_{om} a nivel espacial a partir del coeficiente de rugosidad para el transporte de momento propuesto por Moran (1990), mediante una relación logarítmica con el NDVI (Bastiaanssen *et al.*, 1998a). Posteriormente se utilizó la velocidad del viento proveniente de la estación meteorológica La Victoria del Centro Internacional de la Papa para estimar la velocidad del viento a 200 metros de altura (u_{200}) y con ello estimar la velocidad de fricción distribuida espacialmente (u^*).

La resistencia aerodinámica (rah), fue determinada mediante la definición de dos alturas, $z_1=0.01m$ y $z_2=2m$, en las que se produciría el transporte de calor del suelo al aire (Paul *et al.*, 2014).

Debido a que dT y rah son variables desconocidas y difíciles de estimar, se utilizó el método de los pixeles extremos propuesto por Bastiaanssen (1998) mostradas en el Cuadro 10, este método consiste en la elección de dos pixeles que contengan valores extremos de temperatura (T_{max} y T_{min}) que son de utilidad para estimar dT y las constantes (a, b) ya que Bastiaanssen (1998) asume que existe una relación lineal entre la Temperatura y su gradiente (Allen *et al.*, 2002a).

Cuadro 10: Algoritmo para elección de pixeles extremos

Temperatura máxima (Pixel caliente)	Temperatura mínima (Pixel frio)
$LE = 0$	$LE = Rn - Go$
$H = Rn - Go$	$H = 0$
$dT = dT_{max}$	$dT = 0$

Una vez estimados los valores iniciales de u^* y rah , estos fueron sometidos a un proceso de iteración hasta obtener valores estables de H, en el proceso de iteración intervienen las condiciones de estabilidad dadas por el Largo de Monin-Obukhov (Businger y Yaglom, 1971), las correcciones para el momento y transporte de calor (Ψ_h y Ψ_m) y los pixeles extremos descritos en el párrafo anterior.

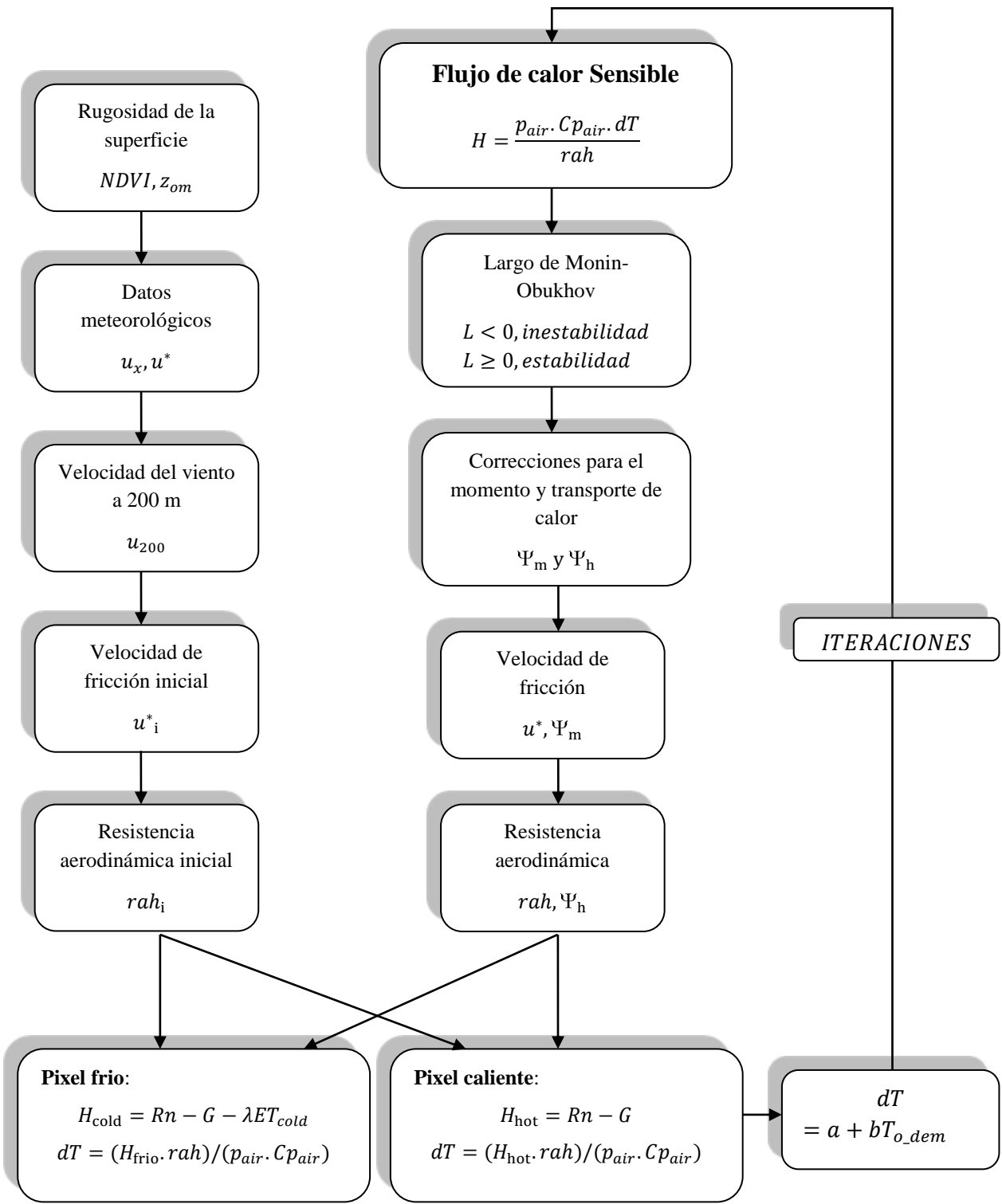


Figura 16: Flujograma para la estimación del Flujo de calor sensible

3.3.5. Evapotranspiración diaria

Una vez calculadas las variables mencionadas anteriormente, se procedió con el último paso para la estimación de la evapotranspiración diaria (ET_{24}), mostrada en el esquema de la Figura 17.

En esta última etapa, se utilizaron las ecuaciones propuestas en el algoritmo SEBAL para estimar el calor latente de vaporización (λ), la radiación neta diaria promedio de las 24 horas (Rn_{24}) en el que se hizo uso del integral de la ecuación del coseno de ángulo de incidencia (θ) con respecto al ángulo solar horario desde la salida hasta la puesta del sol ($\omega_2 - \omega_1$); por último la estimación de la fracción evaporativa (Δ), en el que intervienen las variables calculadas anteriormente (Rn , G_o , H), esta última variable es muy importante ya que SEBAL asume que la fracción evaporativa permanece constante durante el día. (Bastiaanssen *et al.*, 2005)

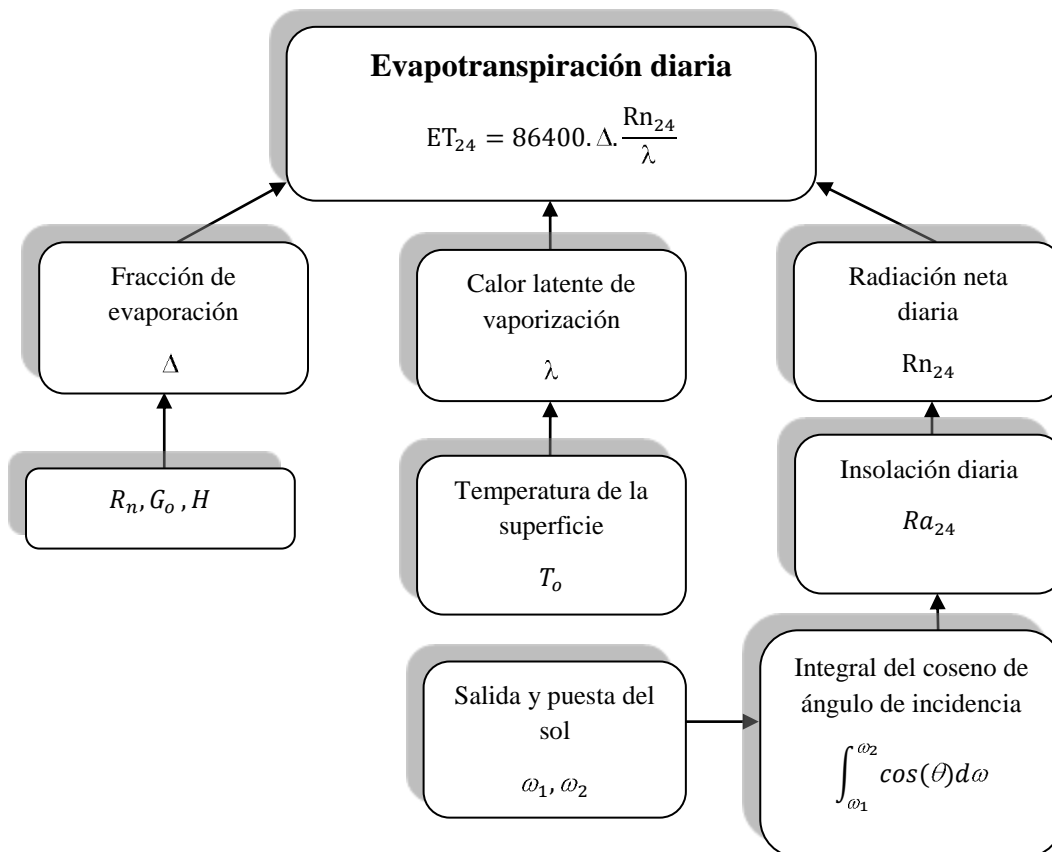


Figura 17: Flujograma para la determinación de la evapotranspiración diaria

3.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CALIBRACIÓN DEL MODELO SEBAL APLICADO EN EL VALLE DEL MANTARO

Una vez construido el modelo SEBAL, se procedió a ejecutar el modelo y obtener resultados para poder compararlos con los valores de referencia (valores reales), y de esta manera ajustar los resultados para que se asemejen lo mejor posible a los valores de referencia. Como mencionaron los autores, el algoritmo SEBAL depende de dos valores extremos, los cuales son el pixel frío (temperatura mínima) y el pixel caliente (temperatura máxima).

Dicho lo anterior, los autores Bastiaanssen *et al.* (1998a) y Allen *et al.* (2002a) afirman que los resultados de SEBAL, dependen básicamente de la estimación del flujo de calor sensible (H), y este a su vez depende de la elección del pixel caliente, el cual está asociado a la temperatura máxima del suelo, los autores sugieren que la elección de esta zona tiene que ser en un terreno o área agrícola plana y sin vegetación y no en otro tipo de coberturas como ciudad, rocas, montaña. Por esta razón, tomando en cuenta que la elección de este pixel tiene una gran influencia en la estimación de la ET, se realizó un análisis de sensibilidad que permitió conocer de qué manera varían los resultados dependiendo de la elección del pixel caliente (temperatura máxima).

3.4.1. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad fue desarrollado específicamente para la elección del “pixel caliente” (temperatura máxima), el cual interviene en la estimación del flujo de calor sensible (H). El objetivo de este análisis fue encontrar la relación existente entre la elección del pixel caliente y la estimación del flujo de calor sensible y con ello determinar de qué manera afecta esta elección del pixel caliente en la estimación de Evapotranspiración.

3.4.2. Calibración

Una vez hecho el análisis de sensibilidad, se determinó de qué manera influye el valor escogido para la temperatura máxima en la obtención de los resultados, posteriormente

se procedió con la calibración y validación para la obtención de resultados más cercanos a los valores de referencia (valores reales). Llamamos valores de referencia a la ET del cultivo estimada por el método de Penman-Monteith ya que este método está validado por la FAO (Allen, 2006) como el mejor método empírico para estimar ET del cultivo. Cabe resaltar que los valores de referencia fueron tomados específicamente de los cultivos identificados en la estación La Victoria ET_c (en la parcela de maíz Lt1 y Lt2), ya que estos cultivos, por pertenecer a un centro de investigación, cuentan con un buen manejo y no están sometidos a ningún tipo de estrés.

3.5. VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

3.5.1. Validación de la Radiación Solar

Al igual que la temperatura, la radiación solar estimada mediante el algoritmo SEBAL, es una radiación a la hora que se tomó la imagen, para esta validación, se consideraron únicamente las mediciones de la estación La Victoria del CIP ya que en esta estación se disponían de mediciones horarias, mientras que las otras estaciones de SENAMHI no contaban con registro alguno de Radiación Solar.

3.5.2. Validación y comparación de la Temperatura del Aire

La temperatura del aire estimada por el algoritmo SEBAL, es una temperatura a una hora determinada de acuerdo a la hora de toma de la imagen satelital, la que para el presente estudio es aproximadamente las 10:00 am.

Por esta razón, para el proceso de validación, se utilizaron únicamente los valores de Temperatura de aire provenientes de la estación La Victoria ya que esta estación contaba con información horaria, y esto permitió conocer el valor observado de Temperatura a las 10:00 am.

Asimismo, con la finalidad de utilizar los valores de temperatura de las demás estaciones (Huayao, Santa Ana, Ingenio, Jauja y Viques), y tomando en cuenta que la temperatura estimada por el modelo SEBAL (10:00 am) no puede ser comparado con valores diarios (máximos, mínimos ni medios) se utilizaron los valores de temperatura de la estación La Victoria para generar una ecuación empírica simple. Los valores utilizados para generar una regresión lineal (Figura 18) comprendieron las temperaturas diarias desde Abril a Julio del año 2008 (más de 100 datos) entre la temperatura de las 10:00 AM y la temperatura media del mismo día., obteniéndose un coeficiente de determinación $R^2 = 0.6591$.

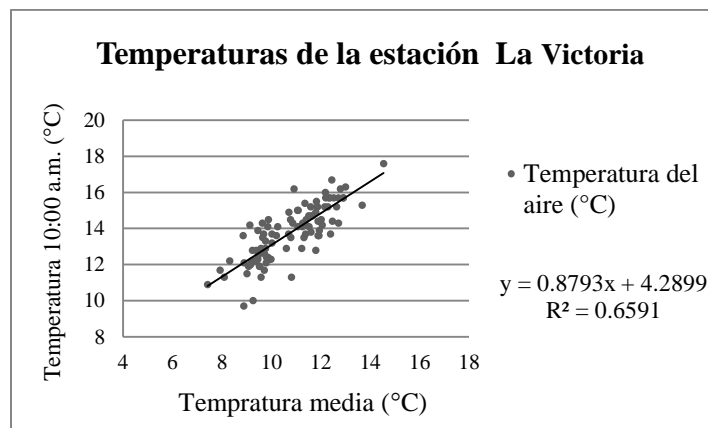


Figura 18: Relación lineal para obtener una ecuación de temperaturas

Con el uso de la Ecuación 10, se determinó un valor aproximado de temperatura del aire para las siguientes estaciones: Santa Ana, Huayao, Jauja, Ingenio y Viques. Una vez obtenidos los valores aproximado de temperatura del aire, se procedió con la comparación de resultados.

$$T_{10:00AM} = 0.8793.T_{media} + 4.2899 \dots (10)$$

3.5.3. Comparación de resultados de Evapotranspiración

Dada la información disponible y el muestreo realizado, se procedió a comparar los resultados obtenidos por el modelo SEBAL con los métodos de Penman – Monteith y del tanque evaporímetro tipo A, métodos ampliamente utilizados y aceptados por la FAO.

Para estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) mediante los métodos empíricos mencionados, se hizo uso del coeficiente de cultivo (K_c) a partir de la visita a campo realizado al Valle del Mantaro y la revisión bibliográfica. Principalmente se consultó un estudio realizado por el INIA de Huancayo (Canales, 2009), en el que se encontraron disponibles estos valores de K_c para cada cultivo de acuerdo a su periodo vegetativo. Finalmente se obtuvieron los valores de K_c para cada cultivo y en la fecha correspondiente, como se mostró en el Cuadro 9.

a. Comparación con el método de Penman - Monteith

Se utilizaron las estaciones meteorológicas de Santa Ana, Huayao, Ingenio, Jauja y La Victoria para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o), cuyo valor multiplicado por su respectivo K_c da como resultado la evapotranspiración de cultivo (ET_c). Este valor de ET_c es el que se utilizó como validador (Estación la Victoria) y comparador con respecto a las estimaciones de SEBAL.

Como primer proceso, se hizo una comparación temporal teniendo seis valores de ET_c correspondiente a cada fecha de la imagen para una sola estación, posteriormente se realizó la comparación espacial, donde, para cada imagen se muestran los valores de ET_c correspondiente a los cultivos identificados en cada parcela. Finalmente se realizó una comparación espacio-temporal, en el que se mostró la comparación de todos los valores obtenidos mediante la estimación del modelo SEBAL y los valores de ET_c estimados con Penman-Monteith.

La estimación del ET_c por el método de Penman-Monteith se basa en la estimación de una evapotranspiración de referencia (ET_o) y un coeficiente de cultivo (K_c) descrito anteriormente, sin embargo, para el cultivo identificado en la estación Jauja (pasto), se planteó un escenario de estrés hídrico, el cual además del K_c , también utiliza un coeficiente de estrés hídrico (K_s), esto se realizó debido a que estos pastos no cuentan con una programación de riego, dependiendo básicamente de la temporada de lluvias (mes Abril) por lo que en época de ausencia de precipitación (Mayo - Agosto) la planta ya no cuenta con una dotación de agua, sufriendo un estrés hídrico.

b. Comparación con el Tanque evaporímetro tipo A

El Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología (SENAMHI), además de proporcionar los datos meteorológicos de distintas estaciones, también proporcionó valores de ET de referencia estimada mediante el tanque evaporímetro tipo A, pero estos datos se encontraron disponibles solamente para la estación de Huayao y Santa Ana.

Al igual que con el método de Penman – Monteith, se utilizó el coeficiente de cultivo (K_c) para obtener las evapotranspiraciones de cultivo (ET_c) ET obtenidos mediante el algoritmo SEBAL, en una comparación espacial, temporal y Espacio-Temporal.

3.5.4. Estadística para la validación y comparación de resultados

a. Error Medio Cuadrático (RMSE)

El error medio cuadrático (RMSE) permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores estimados respecto a los observados. Para el cálculo de la precisión se utiliza la siguiente ecuación según Pielke (1984) como:

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{s,i} - ET_{o,i})^2}{n}} \dots (11)$$

Donde:

$ET_{s,i}$: Evapotranspiración estimada por SEBAL

$ET_{o,i}$: Evapotranspiración observada

n : Número de datos

b. Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación (R^2), es una medida descriptiva que sirve para evaluar la bondad de ajuste del modelo a los datos, ya que mide la capacidad predictiva del

modelo ajustado. Se define como el cociente entre la variabilidad explicada por la regresión y la variabilidad total (Ecuación 13).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{o,i} - \overline{ET_o})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{s,i} - ET_{o,i})^2} \dots (12)$$

Donde:

$ET_{s,i}$: Evapotranspiración estimada por SEBAL

$ET_{o,i}$: Evapotranspiración observada

n : Número de datos

c. La eficiencia de Nash-Sutcliffe

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ecuación 12), mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por el modelo de estimación (Cabrera y Eng).

$$EF_{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{s,i} - ET_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{o,i} - \overline{ET_o})^2} \dots (13)$$

Donde:

$ET_{s,i}$: Evapotranspiración estimada por SEBAL

$ET_{o,i}$: Evapotranspiración observada

n : Número de datos

Cuadro 11: Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

Eficiencia	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

En la Figura 21, se muestra el submodelo para estimar la Radiación neta y el Flujo de calor del suelo, los cuales se implementaron a partir de los diagramas mostrados en las Figuras 14 y 15 correspondientemente, donde principalmente intervienen las siguientes variables: Las 5 bandas de la imagen satelital, para estimar los principales variables e índices (NDVI, albedo, emisividad, entre otros), la banda térmica para estimar la temperatura de la superficie y el DEM.

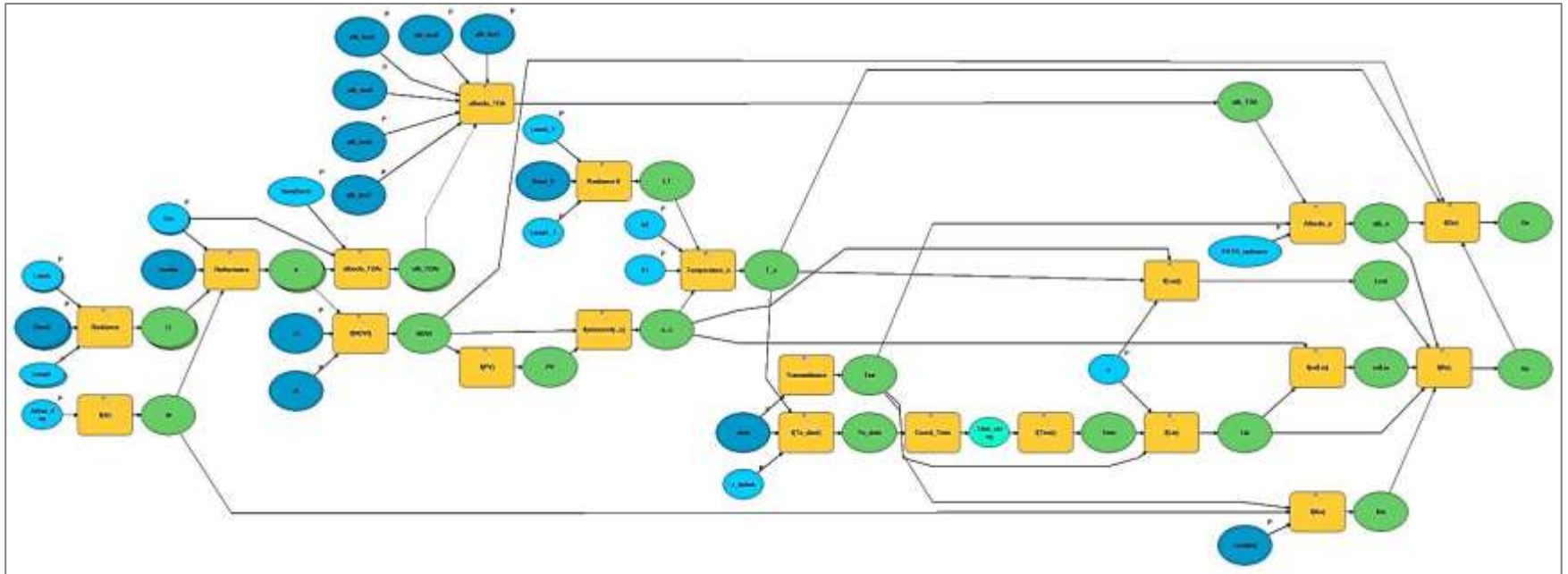


Figura 21: Submodelo para estimar la Radiación neta y el Flujo de calor del suelo

En la Figura 22, se muestra el submodelo para estimar el Flujo de calor sensible – valor inicial, el cual se implementó a partir del diagrama presentado en la Figura 16, donde principalmente intervienen las siguientes variables: Rugosidad de la superficie, NDVI y las variables estimadas anteriormente.

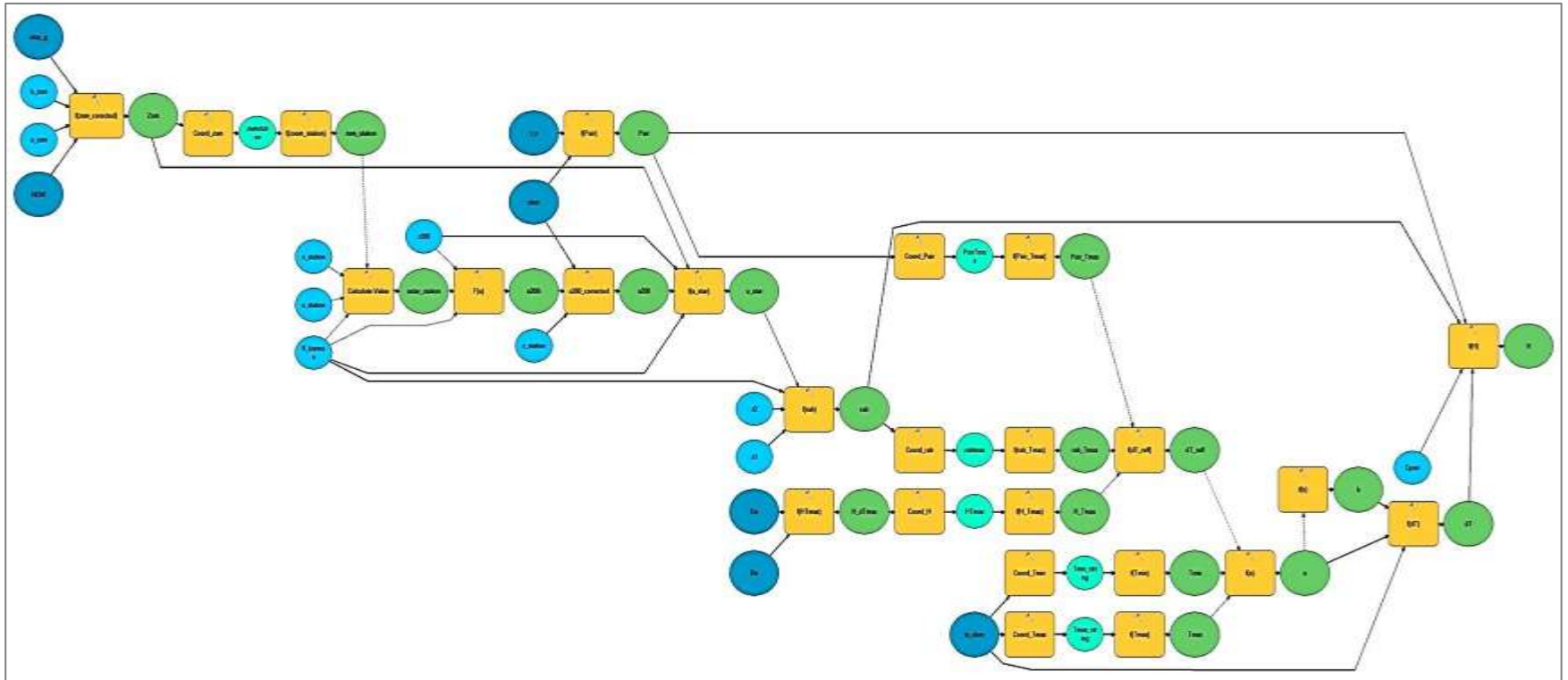


Figura 22: Submodelo para estimar el Flujo de calor sensible – valor inicial

En la Figura 23, se muestra el submodelo para estimar el Flujo de calor sensible – proceso de iteración, el cual se implementó a partir del diagrama mostrado en la Figura 16, donde principalmente intervienen las siguientes variables: Largo de Monin-Obukhov (L), la elección de dos pixeles de valores extremos de temperatura y las variables estimadas anteriormente.

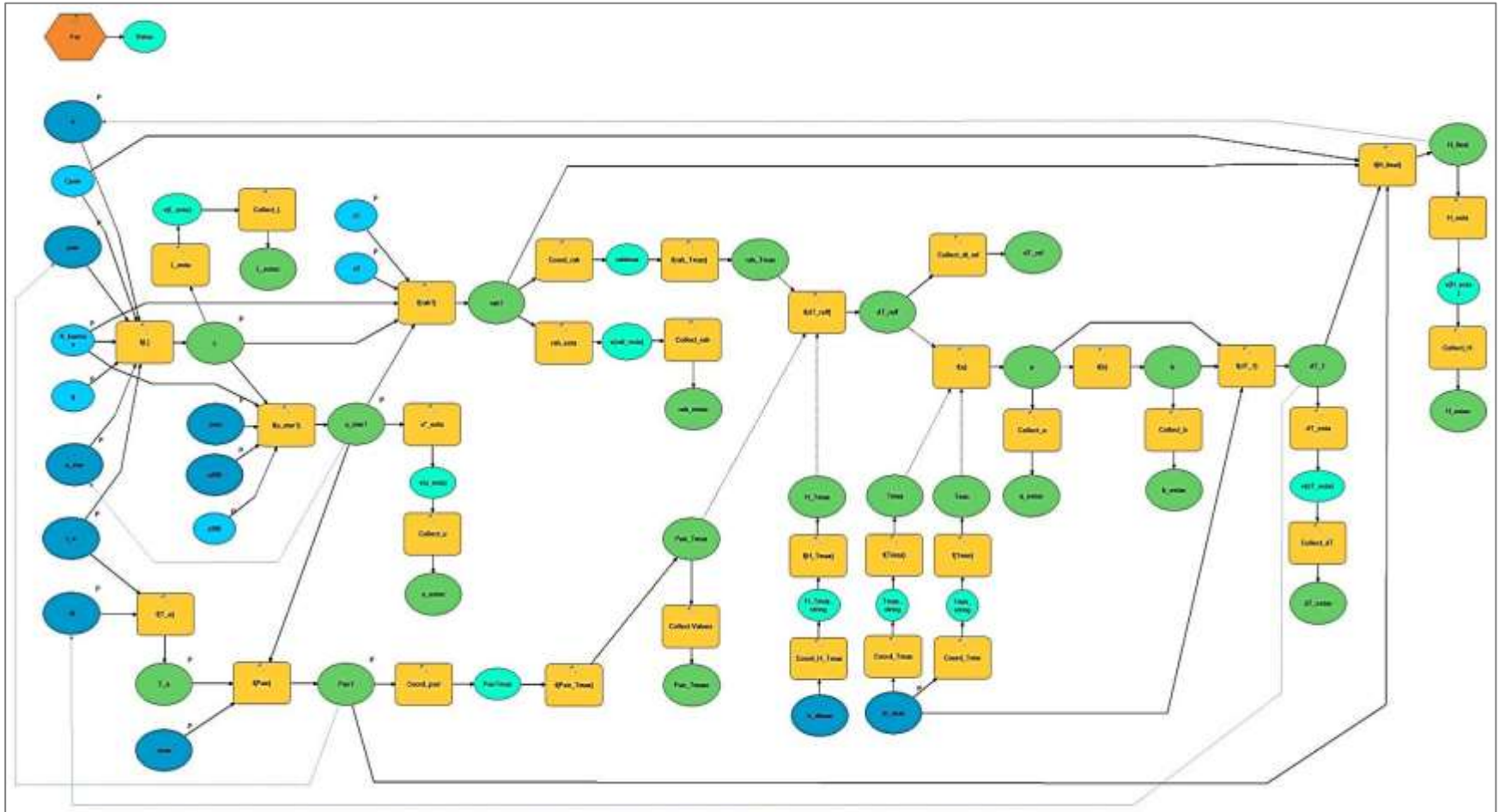


Figura 23: Submodelo para estimar el Flujo de calor sensible – proceso de iteración

En la Figura 24, se muestra el submodelo para estimar el integral del coseno del ángulo de incidencia, el cual se implementó a partir del diagrama presentado en la Figura 17, donde principalmente intervienen las siguientes variables: la hora de salida y puesta del sol, latitud, pendiente y el día juliano correspondiente.

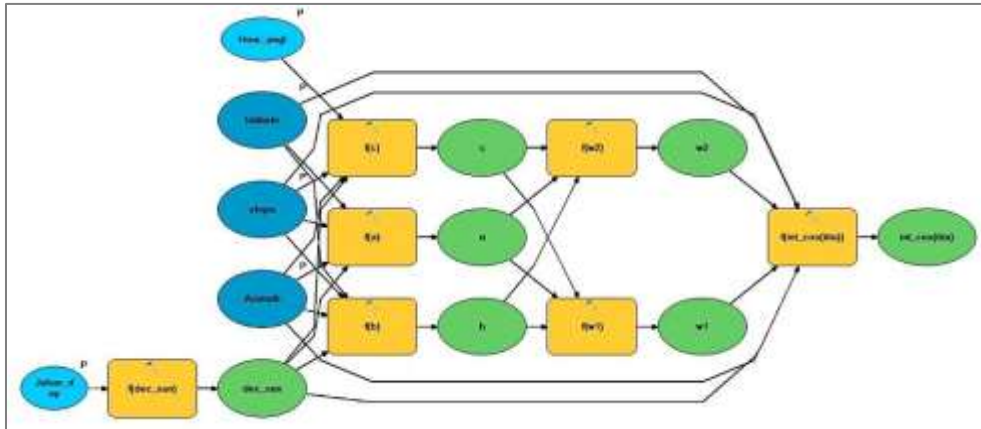


Figura 24: Submodelo para estimar el integral del coseno del ángulo de incidencia

En la Figura 25, se muestra el submodelo para estimar la Evapotranspiración, el cual se implementó a partir del diagrama presentado en la Figura 17, donde principalmente intervienen todas las siguientes variables estimadas anteriormente.

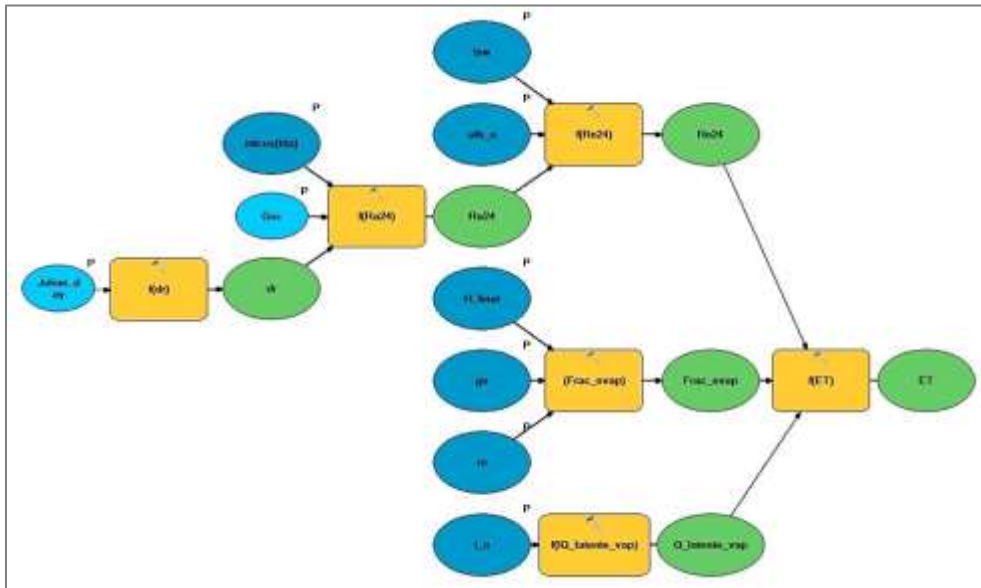


Figura 25: Submodelo para estimar la Evapotranspiración

4.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Como se dijo anteriormente, la estimación de evapotranspiración por el método SEBAL, depende de la selección de la temperatura máxima (pixel caliente) el cual está estrechamente relacionado a la estimación del flujo de calor sensible (H) (Allen *et al.*, 2002b).

Se presenta el análisis de sensibilidad desarrollado a la imagen del 8 de abril del 2008 (internamente se desarrolló el mismo proceso a todas las imágenes), donde escogieron 5 parcelas sin presencia de vegetación como se muestra en el mapa de temperaturas de la Figura 26, de los cuales se extrajo el valor de temperatura del suelo estimado por el modelo SEBAL. Siendo estas temperaturas T1 = 301.88 °K, T2 = 303.98 °K, T3 = 306.07 °K, T4 = 308.13 °K y T5 = 309.93 °K, con estos valores de temperatura máxima, se crearon 5 escenarios de Evapotranspiración, los cuales fueron sometidos a una validación visual (con respecto al uso de la tierra) y una validación de los valores de ET estimados por SEBAL en comparación de con las estimaciones de Penman-Ponteith.

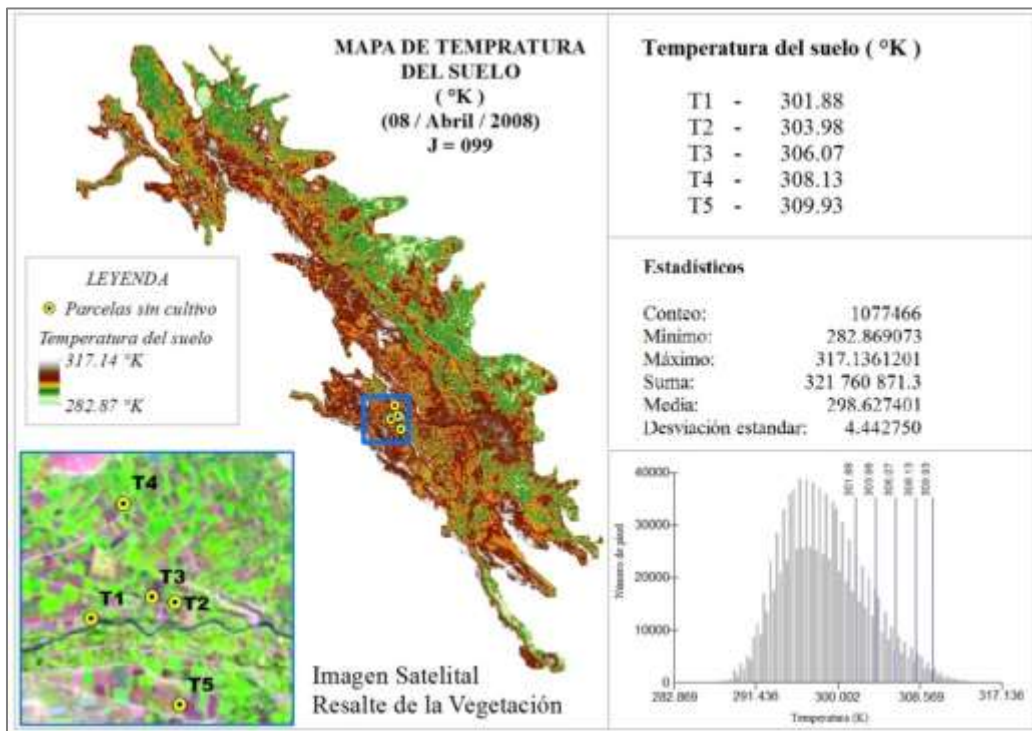


Figura 26: Mapa de Temperaturas del suelo para el análisis de sensibilidad

Asimismo, con las temperaturas máximas escogidas se determinó de qué manera influye este valor en la estimación del flujo de calor sensible, observándose los resultados en la Figura 27, obteniéndose una relación inversamente proporcional donde el flujo de calor sensible (H) disminuye a medida que aumenta el valor de la temperatura máxima. Esta relación inversamente proporcional, concuerda con algunos trabajos de investigación realizado con la finalidad de saber cuál es la variable más sensible en el modelo SEBAL, dando como resultado que los valores estimados con SEBAL, tienen una gran dependencia la elección de la Temperatura máxima. (Long *et al.*, 2011)

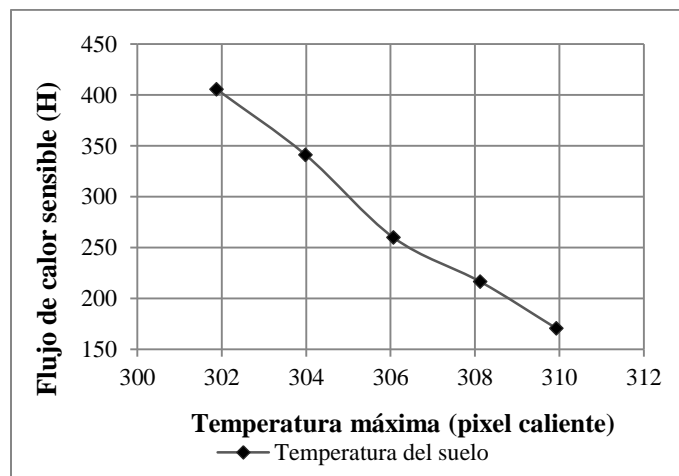


Figura 27: Análisis de sensibilidad para el flujo de calor sensible

En la Figura 28, se muestran los cinco escenarios de evapotranspiración a partir de las cinco temperaturas máximas escogidas, asimismo se presenta la imagen con resalte de vegetación (Figura 28a) para la verificación visual del uso de la tierra. Para la Figura 28b (T1) se obtienen valores bastante bajos, además se observa que hay áreas con vegetación pero la evapotranspiración estimada con SEBAL muestra valores de cero, por lo tanto esta primera aproximación es descartada. En la Figura 28c (T2) se observan evapotranspiraciones bajas, aunque más coherentes a la superficie de vegetación, mientras que para la Figura 28d (T3) se muestran mejores resultados más coherentes a la superficie de la tierra. En la Figuras 28e (T4) se observan evapotranspiraciones altas, encontrándose evapotranspiración incluso en zonas sin presencia de vegetación (suelos desnudos), por ultimo para las estimaciones con una Figura (T5) se observa que las evapotranspiraciones son excesivamente altas que no van acorde a la superficie de la tierra.

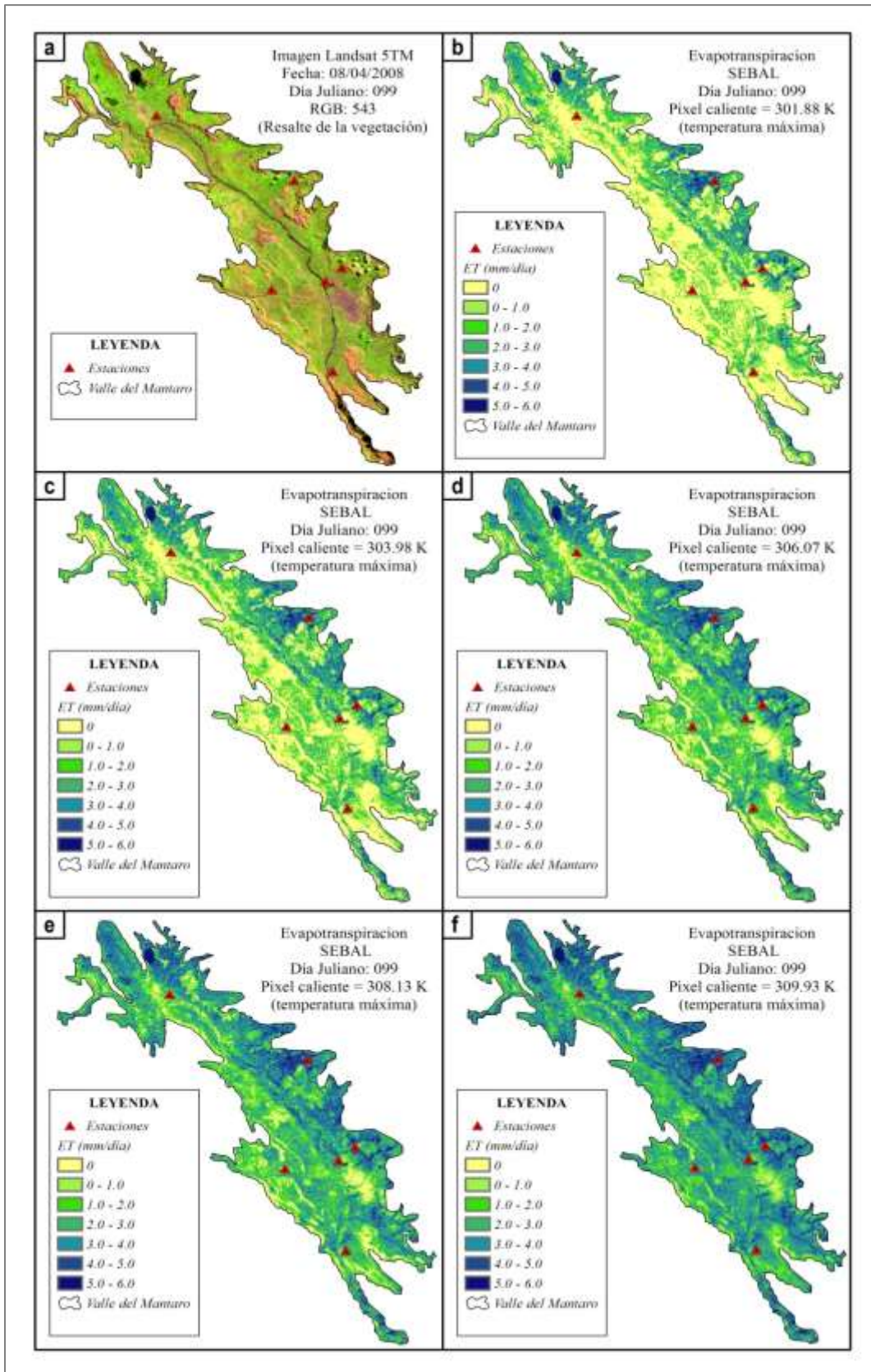


Figura 28: Resultados de evapotranspiración SEBAL para el análisis de sensibilidad

En el primer proceso visual de las estimaciones de evapotranspiración de cada uno de los cinco escenarios respecto a su coherencia con la superficie de la tierra, se determinó que la Figuras 28d (T3) es las que más coherencia tiene con la superficie de la tierra. Asimismo para seguir verificando cual es la mejor opción de temperatura máxima 2, se muestran las 5 estimaciones de evapotranspiración para cada cultivo identificado en el valle (Figura 29), tomando en cuenta los 5 escenarios descritos anteriormente, además se hace la comparación con la estimación de Penman-Monteith (P.M.), notándose que estos valores se asemejan más a los resultados obtenidos con la T3, determinándose que la T3 es la adecuada para correr el modelo SEBAL.

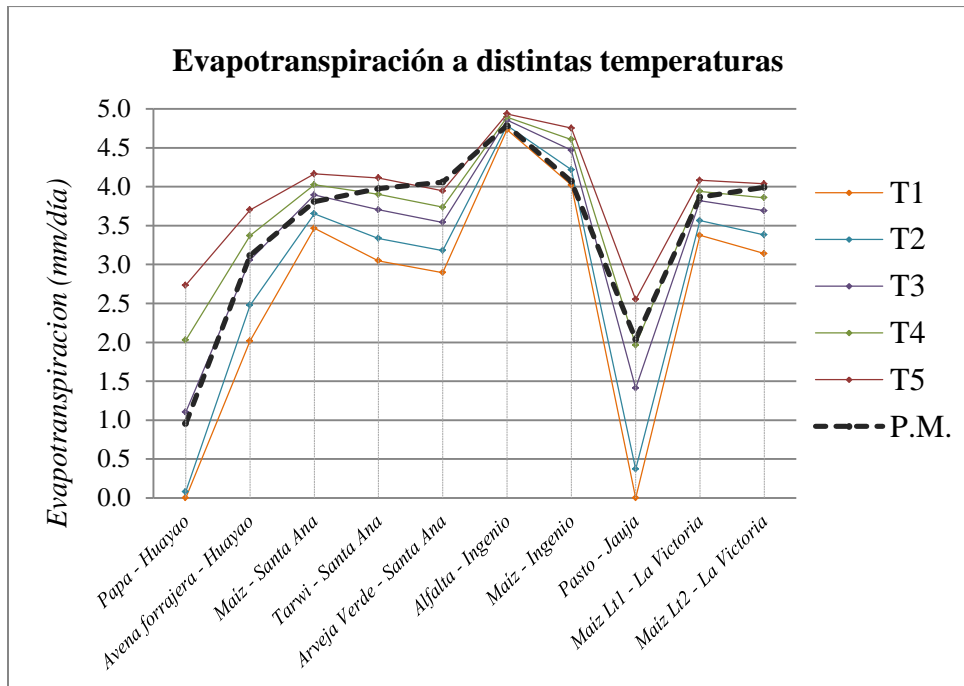


Figura 29: Evapotranspiración estimada a distintas temperaturas máximas para el análisis de sensibilidad.

Cabe resaltar que este análisis de sensibilidad fue desarrollado para la imagen correspondiente al 8 de abril con la finalidad de entender de qué manera varían los resultados y cuál es el criterio de ajuste para la calibración de valores. El mismo proceso fue desarrollado, para las imágenes correspondientes a las fechas del 24 de Abril, 26 de Mayo, 27 de Junio, 13 de Julio y 14 de Agosto del 2008.

4.3. VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE RADIACIÓN SOLAR

En la Figura 30, se muestra la relación lineal entre los valores de radiación solar, obteniéndose un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9688, el cual muestra que el 96.88 por ciento de los valores es explicado por el modelo, siendo este un valor muy bueno.

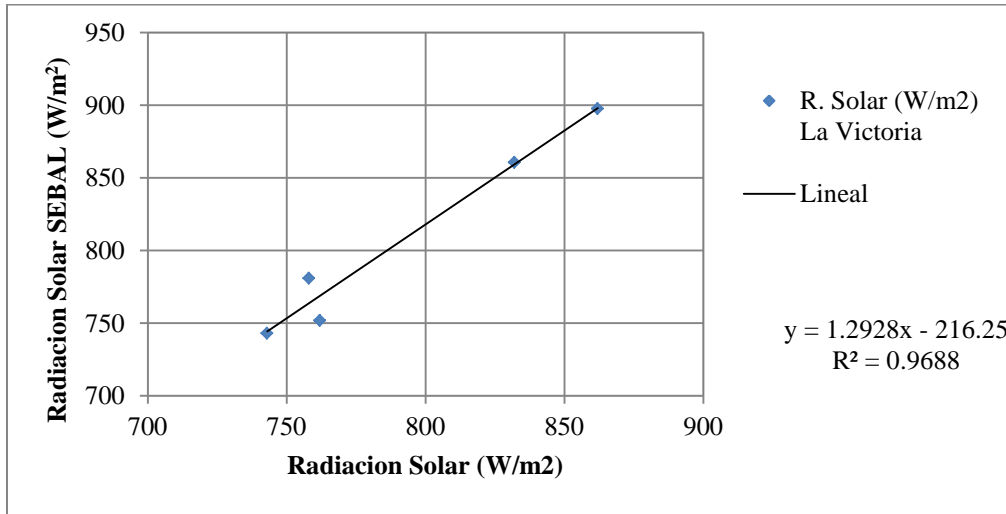


Figura 30: Diagrama de dispersión para comparar los valores de Radiación Solar

En el Cuadro 12, se muestra el resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar los valores, muy buenos resultados sobre todo en la eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS) cuyo valor de 0.751 es un valor muy bueno.

Cuadro 12: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar los valores de radiación solar para la estación La victoria

Método estadístico	Resultado
Error Medio Cuadrático (RMSE) W/m^2	23.380
Coeficiente de determinación (R^2)	0.969
La eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.751

4.4. VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE TEMPERATURA DEL AIRE

4.4.1. Validación de Temperatura de aire

La temperatura del aire estimada con el modelo SEBAL, es una temperatura a la hora que el satélite capturo la imagen (10:00 a.m.), esta validación se realizó utilizando las temperaturas reales obtenidas de la estación meteorológica La Victoria debido a que esta fue la única estación que contaba con datos horarios. En la Figura 31, se muestra la relación lineal entre los valores de Temperatura del aire, obteniéndose un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9124, un error medio cuadrático de 0.694 °C y una eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS) de 0.227 mostrados en el cuadro 13.

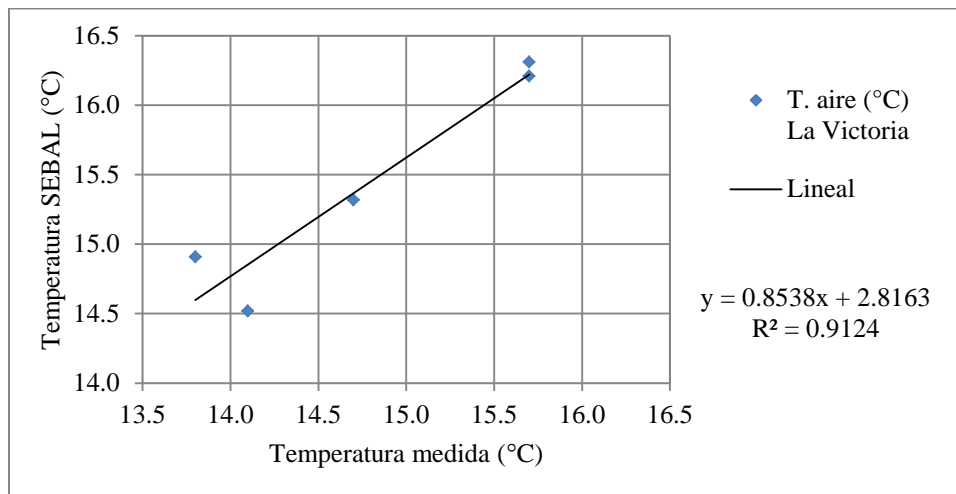


Figura 31: Diagrama de dispersión para comparar los valores de Temperatura del aire de la estación La Victoria

Cuadro 13: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar los valores de Temperatura del aire para la estación La victoria

Método estadístico	Resultado
Error Medio Cuadrático (RMSE) °C	0.694
Coeficiente de determinación (R^2)	0.912
La eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.227

4.4.2. Comparación Espacio – Temporal de los valores de T_{aire}

Utilizando la Ecuación 10 (ecuación empírica a partir de datos de la estación La Victoria) se hizo una regresión lineal (Figura 32) de las temperaturas del aire estimado por el modelo SEBAL (10:00 a.m.) y las temperaturas de las estaciones de Huayao, Santa Ana, Ingenio, Jauja, Viques y La Victoria, donde se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 de 0.5602.

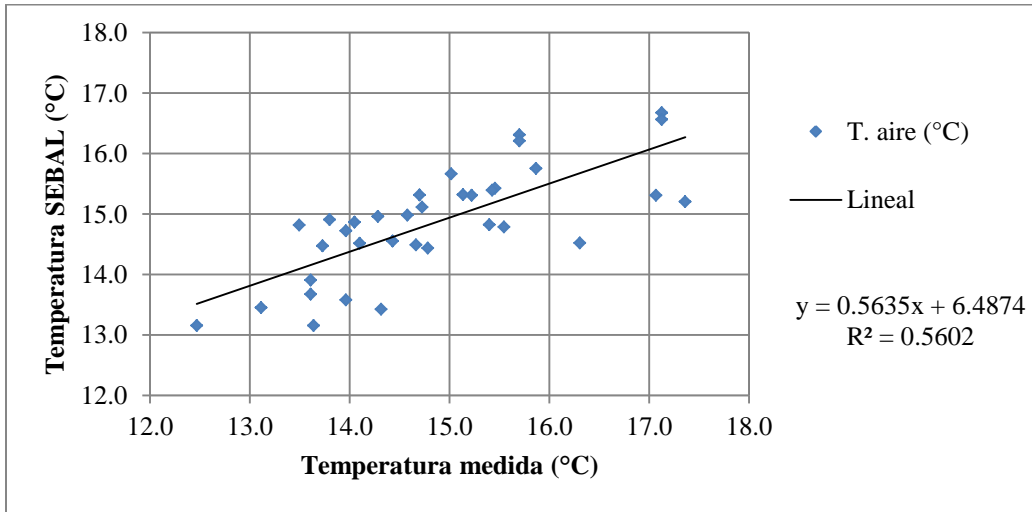


Figura 32: Diagrama de dispersión para comparar todos los valores de temperatura del aire

En el Cuadro 14, se muestra un resumen de los métodos estadísticos utilizados para analizar los datos de temperatura del aire, los cuales muestran valores aceptables en cuanto a la correlación; cabe resaltar que esta temperatura fue validada utilizando la Ecuación 10 para estimar la temperatura a las 10 de la mañana a partir de la temperatura media.

Cuadro 14: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar todos los valores de temperatura del aire

Método estadístico	Resultado
Error Medio Cuadrático (RMSE) °C	0.786
Coefficiente de determinación (R^2)	0.560
La eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.560

4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

Para la validación de resultados, no se encontraron disponibles valores reales o medidos con lisímetros (método altamente confiable para medir evapotranspiración), por lo tanto se consideró como valor “real” (observado) a la evapotranspiración estimada con el método de Penman-Monteith (estación La Victoria, lotes de maíz) por ser un método universal para la estimación de ET de referencia validado por la FAO. Además se tuvieron disponibles mediciones de dos estaciones de tanque evaporímetro tipo A para hacer las comparaciones con las estimaciones obtenidas por el algoritmo SEBAL.

4.5.1. Comparación de resultados de ET distribuido temporalmente

a. Estación Huayao

En la Figura 33, se muestra gráficamente el comportamiento de la ET a nivel diario para los cultivos identificados en la zona de la estación Huayao, observándose una muy buena correlación entre las estimaciones de SEBAL y Penman-Monteith (PM), con un error cuadrático medio (RMSE) igual a 0.339 mm/día, un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.878 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS) de 0.867. Asimismo, se compararon los resultados obtenidos con el Tanque evaporímetro tipo A (TEA) notándose que los valores de ET estimados con este método son bastante elevados en comparación con las del modelo SEBAL, resultado una baja correlación entre ambos métodos, con un RMSE de 1.424 mm/día, un R^2 igual a 0.667 y un bajo resultado de ENS con un valor de 0.011, siendo este Insuficiente.

Cabe resaltar que los valores de ET obtenidos por el método del TEA no son confiables, debido a la técnica de medición que se empleaba en dicha estación, la cual según el propio personal encargado indicó, en la visita de campo, que esta medición se realizaba haciendo girar un tornillo y dependiendo de cuantas vueltas se le dé estos serán contados para estimar los milímetros de agua que disminuyeron. Adicionalmente, el Ingeniero a cargo de la estación Huayao, informó que el tanque de esta estación actualmente ha sido remplazado por uno nuevo, debido a la antigüedad y algunas fallas que presentó.

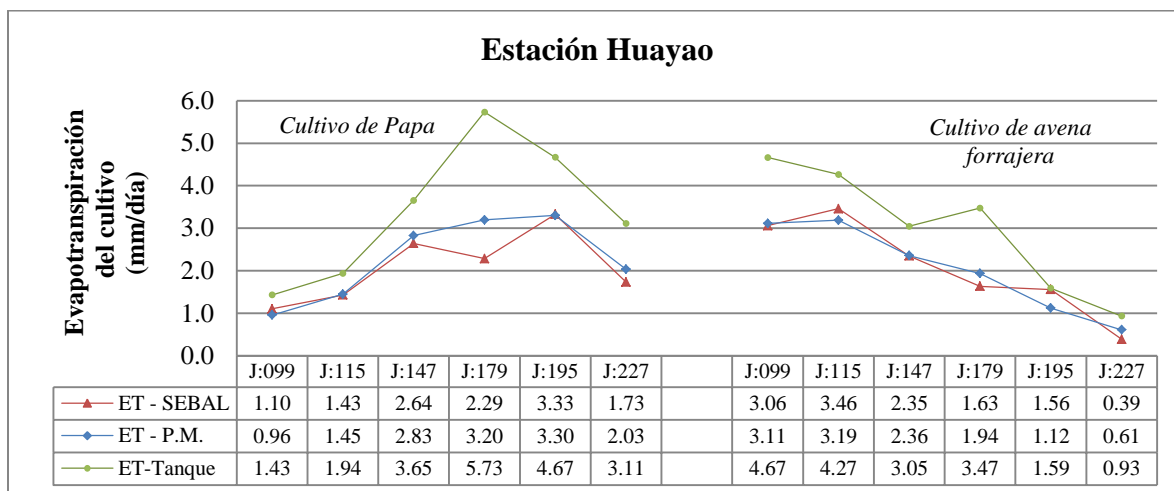


Figura 33: Diagrama de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la estación Huayao

b. Estación Santa Ana

En la Figura 34, se muestra gráficamente el comportamiento de la ET a nivel diario para los cultivos identificados en la zona de la estación Santa Ana, parcelas correspondientes a la estación experimental del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), observándose una muy buena correlación entre ambas estimaciones, SEBAL y Penman-Monteith, donde los métodos estadísticos dan como resultado un RMSE igual a 0.338 mm/día, un R^2 igual a 0.909 y una ENS de 0.900.

Adicionalmente, se compararon los resultados de ET obtenidos con el método del TEA, es cual, a diferencia que la estación Huayao, muestra una mejor correlación entre ambas estimaciones, con un RMSE de 0.461 mm/día, un R^2 0.868 y una ENS de 0.576, el cual es un valor catalogado según el Cuadro 11 como bueno.

Cabe resaltar que el INIA, por ser un centro de investigación, mantiene buenas prácticas en el manejo de cultivo, tratando de evitar cualquier escenario de estrés hídrico.

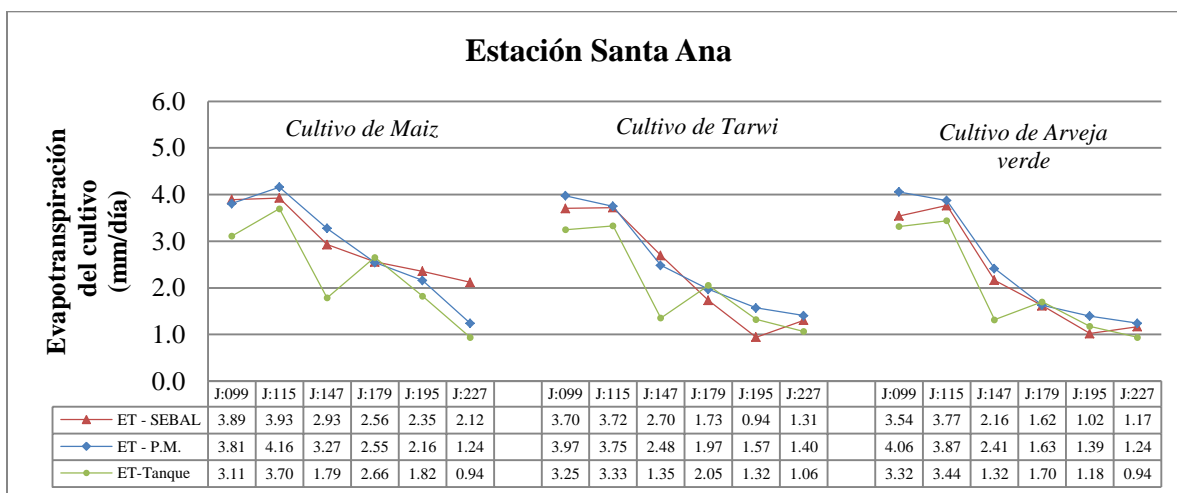


Figura 34: Diagrama de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la estación Santa Ana

c. Estación Ingenio

En la Figura 35, se muestra gráficamente el contraste entre los métodos de SEBAL y PM para estimar ET para la zona de la estación Ingenio, con dos cultivos identificados, observándose claramente una sobreestimación de valores por parte del modelo SEBAL, esto debido a que la zona de Ingenio cuenta con pequeñas parcelas cercadas con grandes arbustos que generan sombras, provocando una variación en los valores del ND, además por tener una resolución espacial de 30m, se genera una combinación de valores del ND entre las parcelas agrícolas y los arbustos, predominando los arbustos en cada pixel y dando la apariencia de ser una zona forestal con altos valores de ET.

Todos estos problemas encontrados se reflejan en los resultados de los métodos estadísticos, encontrándose un RMSE de 1.060 mm/día, un R^2 igual a 0.610 y una ENS igual a -0.764 siendo este valor insuficiente.

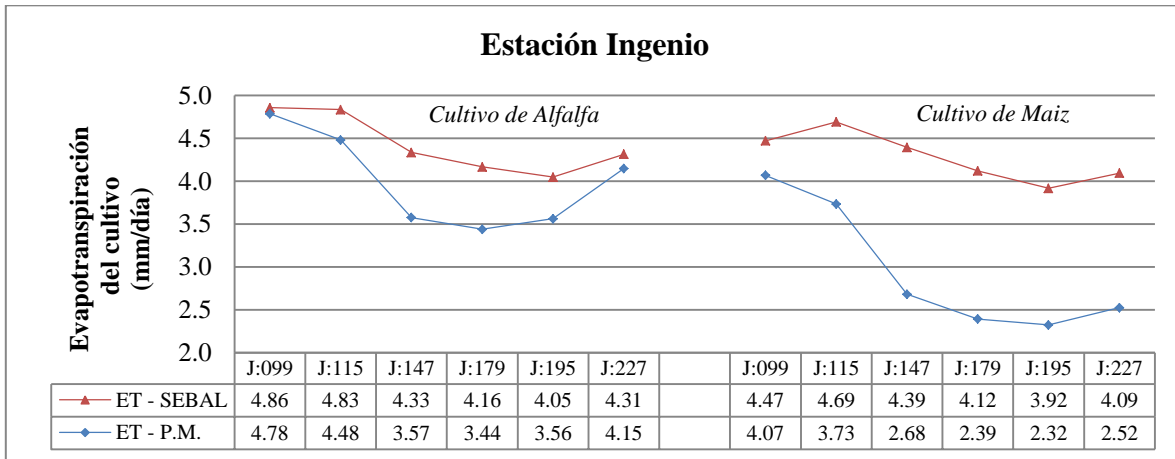


Figura 35: Diagrama de ET estimada con SEBAL y Penman-Monteith para la estación Ingenio

d. Estación Jauja

En los resultados obtenidos para esta estación, se observa una subestimación por parte del método de SEBAL, lo cual sugiere hacer una mayor revisión. Cabe resaltar que según Ramos *et al.* (2005), quien realizó un trabajo de investigación, indica que generalmente los valores de ET estimados por el método de Penman-Monteith sobrestiman a los de método SEBAL, debido a que las parcelas presentan una baja densidad de cultivo, sin embargo, en esta parcela se observa más allá que una simple subestimación por parte de SEBAL, se observa una posible presencia de estrés hídrico ya que estas bajas estimaciones coincidentemente se dan en las épocas de sequía (Junio, Julio y Agosto),

En la Figura 36, se muestran los resultados para la estación Jauja sin considerar el posible escenario de estrés Hídrico, cuyo cultivo de referencia es el pasto localizado en el estadio deportivo de Jauja, este diagrama permite contrastar los valores obtenidos por ambos métodos para la estimación de ET, observándose una gran diferencia entre las estimaciones para los meses de junio, julio y agosto (meses sin presencia de lluvias), reflejándose en los resultados de los métodos estadísticos que muestran un RMSE de 1.017mm/día y un R^2 igual a 0.230.

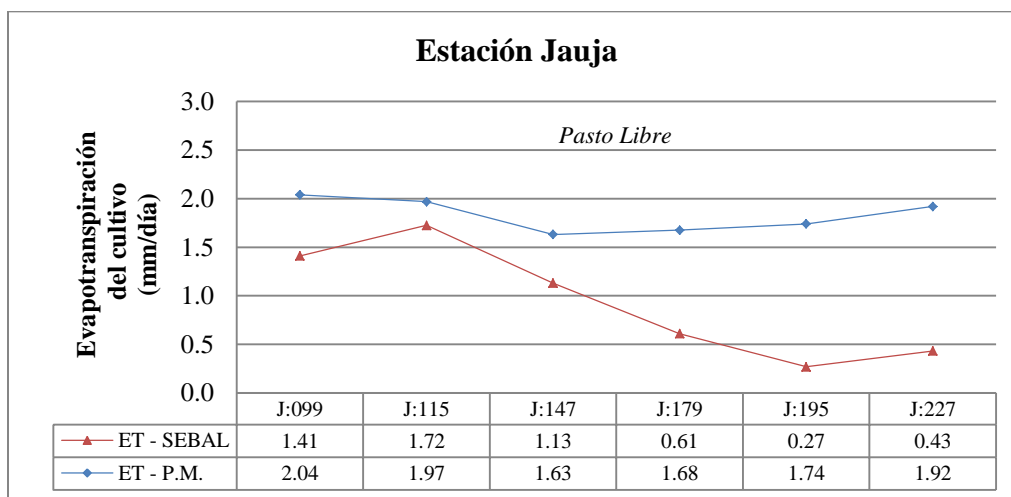


Figura 36: Diagrama en línea de la evapotranspiración estimada con SEBAL y Penman-Monteith para la estación Jauja

Adicionalmente, se tiene conocimiento que los pastos de campos deportivos en zonas rurales no cuentan con un régimen de riego establecido, valiéndose únicamente de las temporadas de lluvias, por esto se asume la presencia de estrés hídrico para estos últimos meses planteándose un segundo escenario, en el que se utiliza un coeficiente de cultivo de acuerdo a una posible presencia de estrés hídrico (K_s).

En la Figura 37, se muestran los resultados de ET utilizando un K_{caj} el cual toma en cuenta un coeficiente de estrés hídrico K_s y el respectivo K_c del cultivo para la estimación de la ET_c , cabe resaltar que este método ha sido propuesto por la FAO, y en él se explica que a medida que la planta no cuenta con la dotación de agua suficiente para su desarrollo, este sufre de un estrés hídrico. Finalmente, se considera válido este escenario de estrés hídrico en el proceso de cálculo para la zona de Jauja, obteniéndose un RMSE de 0.395 m/día, un R^2 de 0.928 y un ENS igual a 0.459.

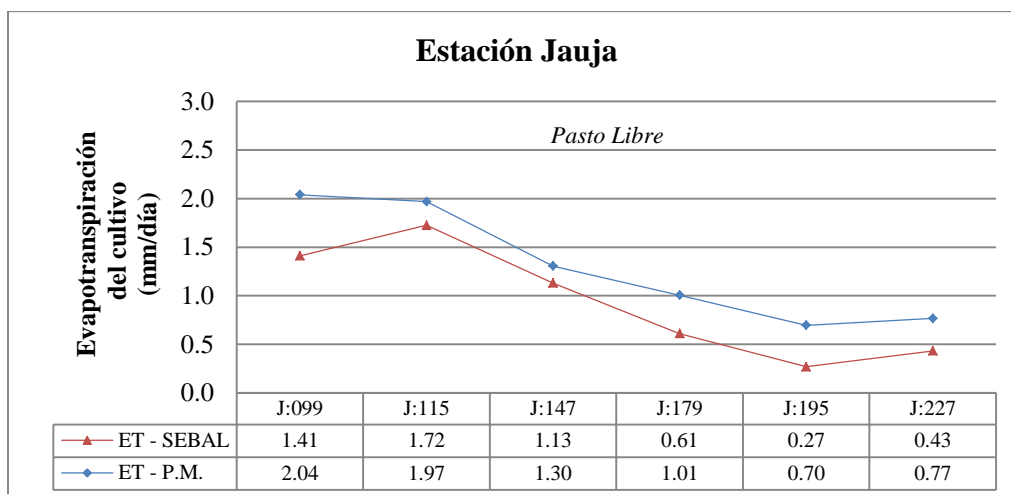


Figura 37: Diagrama en línea de la evapotranspiración estimada con SEBAL y Penman-Monteith para la estación Jauja – Escenario estrés hídrico

e. Estación La Victoria

Continuando con los resultados obtenidos para cada estación, en la Figura 38, se muestra los valores estimados para la zona de la estación La Victoria cuyo cultivo identificado fue el maíz, sembrado en dos lotes de la estación experimental del Centro Internacional de la Papa (CIP), para esta estación, se observa una buena correlación entre ambos métodos, viéndose reflejado en los resultados de los métodos estadísticos utilizados, los cuales muestran un RMSE de 0.203 y un coeficiente de determinación R^2 igual a 0.984 y una ENS de 0.981.

Cabe resaltar que por ser el CIP un centro de investigación, los cultivos están muy bien manejados, tratando de llegar a las condiciones óptimas evitando cualquier escenario de estrés hídrico. Por esta razón, este cultivo fue considerado principal al momento de calibrar el modelo.

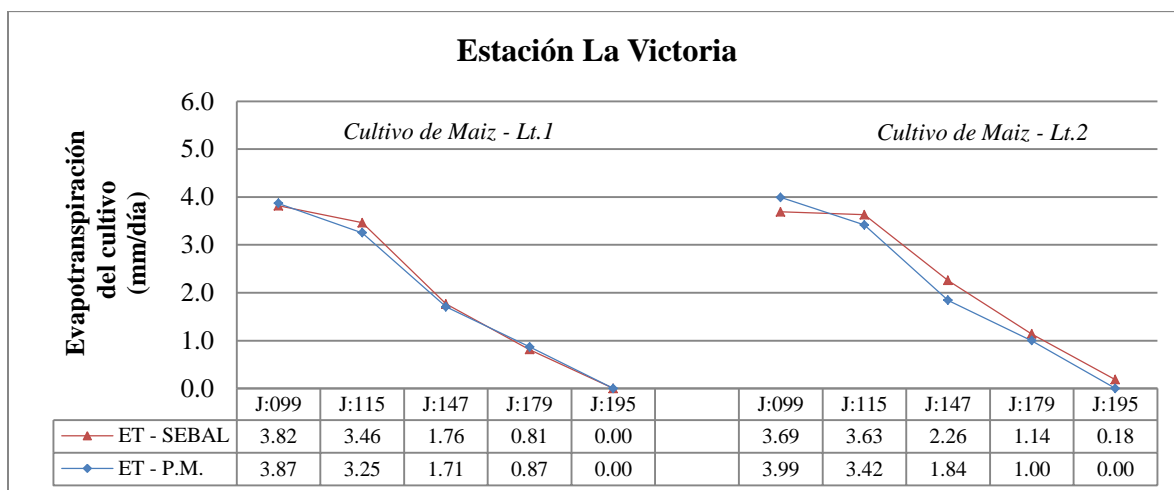


Figura 38: Diagrama en línea de la evapotranspiración estimada con SEBAL y Penman-Monteith para la estación La Victoria

En el Cuadro 15 se muestra un cuadro resumen de todos los resultados de los métodos estadísticos utilizados para evaluar los valores de ET estimados por el algoritmo SEBAL y el método de Penman-Monteith.

Cuadro 15: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y Penman-Monteith distribuidos temporalmente

Método estadístico	Huayao	Santa Ana	Ingenio	Jauja	La Victoria
Error Medio Cuadrático (RMSE) mm/día	0.339	0.338	1.060	0.395	0.203
Coefficiente de determinación (R ²)	0.878	0.909	0.610	0.928	0.984
La eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.867	0.900	-0.764	0.459	0.981

Asimismo, en el Cuadro 16, se muestra el resumen de los resultados estadísticos para las dos estaciones Huayao y Santa Ana, siendo las únicas que contaban con mediciones de tanque evaporímetro tipo A. Teniendo como resultado que hay una mejor correlación para la estación Santa Ana cuya eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.576 indica que el ajuste entre ambas estimaciones es buena (Cuadro 11). Por el contrario, para la estación Huayao se observa una baja correlación debido a que los valores estimados con el tanque evaporímetro tipo A, exceden a los del modelo SEBAL.

Cuadro 16: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y El tanque evaporímetro tipo A distribuidos temporalmente

Método estadístico	Huayao	Santa Ana
Error Medio Cuadrático (RMSE) mm/día	1.424	0.627
Coefficiente de determinación (R ²)	0.667	0.772
La eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.011	0.576

4.5.2. Comparación de resultados de ET distribuido espacialmente

En las siguientes figuras, se muestran los diagramas de líneas que muestran el contraste de todos los valores obtenidos mediante los métodos de estimación SEBAL, PM y TEA, cabe recordar que solo se contaron con mediciones de TEA para las estaciones de Huayao y Santa Ana, mientras que para la estimación con el método de PM, se contaron con datos meteorológicos que permitieron el proceso de cálculo para todas las estaciones.

a. Imagen correspondiente al 8 de Abril del 2008

En la Figura 39, se contrastan los resultados de evapotranspiración en una distribución espacial obtenidos con los tres métodos mencionados anteriormente. En la comparación de estimaciones de ET por el método de PM y SEBAL, se obtuvo una buena correlación entre ambos métodos obteniéndose un RMSE de 0.321 mm/día, un R² 0.932 y una ENS de 0.912. Cabe resaltar que en esta temporada no se presenta escases de agua, por lo tanto los cultivo no presentan indicios de estrés hídrico. Sin embargo para los datos provenientes de la zona de la estación Ingenio, se muestran valores ligeramente sobreestimados con respecto a los obtenidos por el método de Penman-Monteith.

Adicionalmente, se contrastan los resultados de ET estimados con el método de TEA y SEBAL, obteniéndose valores bajos con un RMSE de 0.843 mm/día, un R² de 0.442 y una ENS de 0.328, sin embargo, se muestra en el grafico que los valores correspondientes a Santa Ana tienen una mejor correlación

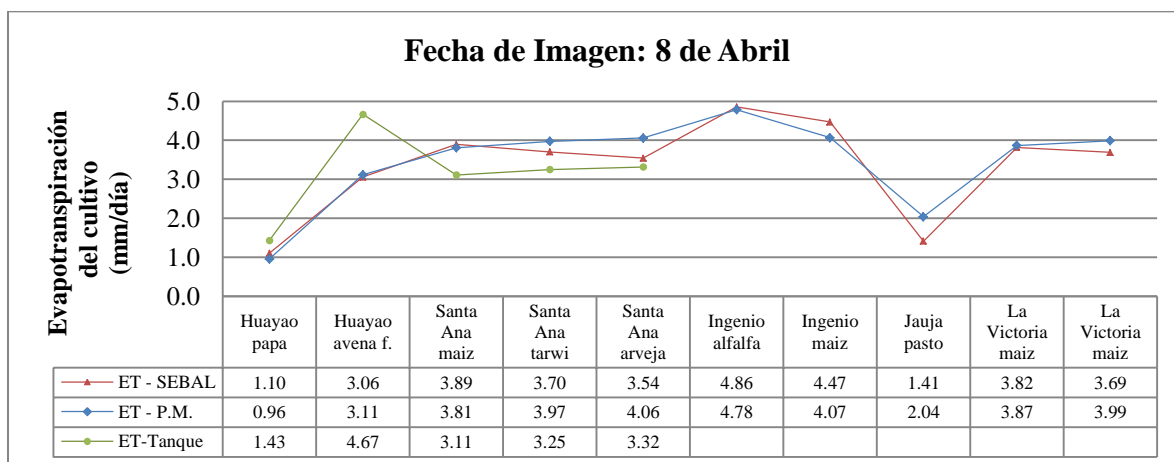


Figura 39: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la imagen de 8 de Abril.

b. Imagen correspondiente al 24 de Abril del 2008

En la Figura 40, se observa el diagrama en línea en el que se contrastan los resultados de ET estimados por los tres métodos en una distribución espacial. De estos resultados se visualiza una notoria sobreestimación por parte del modelo SEBAL con respecto al método de PM para la estación Ingenio, sin embargo todavía se obtiene una buena correlación entre ambos métodos obteniéndose un RMSE de 0.365 mm/día, un R^2 0.904 y una ENS de 0.835, siendo este un valor excelente.

Asimismo, en la comparación de resultados entre el método de TEA y SEBAL, se observan resultados relativamente buenos, obteniéndose un RMSE de 0.494 mm/día, un R^2 de 0.723 y una ENS igual a 0.588.

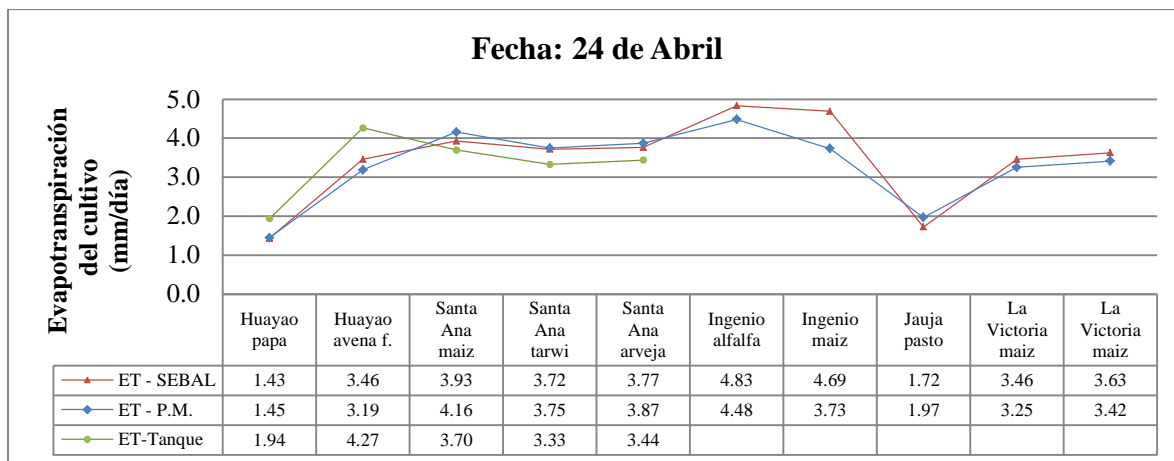


Figura 40: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la imagen de 24 de Abril.

c. Imagen correspondiente al 26 de Mayo del 2008

En la Figura 41, se presenta un diagrama que muestra el contraste entre los valores obtenidos por los tres métodos de estimación de ET, en este diagrama se observa una gran sobreestimación por parte del modelo SEBAL correspondiente a la zona de la estación Ingenio, sin embargo se tienen resultados aceptables con un RMSE igual a 0.631 mm/día, un R² igual a 0.650 y una ENS de 0.093, siendo este un valor insuficiente.

Asimismo, para el contraste de resultados entre el TEA y SEBAL, se encontraron resultados bajos, sin una buena correlación con un RMSE de 1.033 mm/día y un R² de 0.00 y una ENS de -0.188.

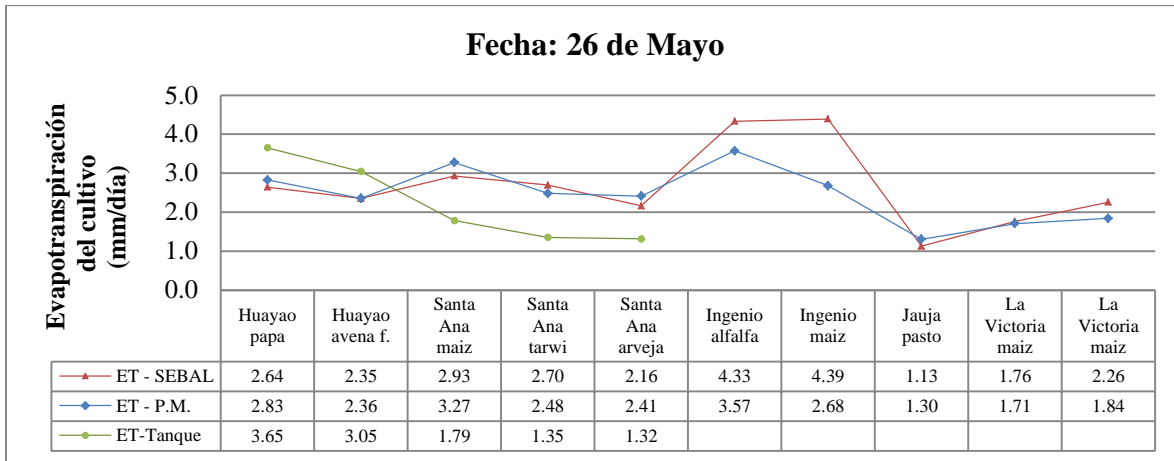


Figura 41: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la imagen de 26 de Mayo.

d. Imagen correspondiente al 27 de Junio del 2008

En la Figura 42 se muestran los el contraste entre los resultados de ET para los tres métodos de estimación, Observándose una gran sobreestimación de ET por parte del modelo SEBAL para la zona de la estación Ingenio, sin embargo, se observa que el método de PM tiene una mejor correlación con SEBAL que el método del TEA, obteniéndose un RMSE de 0.683 mm/día, un R^2 igual a 0.679 y una ENS igual a 0.366, asimismo, se observa que los valores estimados con el TEA para la zona de la estación Huayao son bastante elevados, dando como resultado una muy baja correlación respecto al modelo SEBAL obteniéndose un RMSE de 1.754 mm/día, R^2 de 0.185 y una ENS de -0.490, siendo este un valor insuficiente.

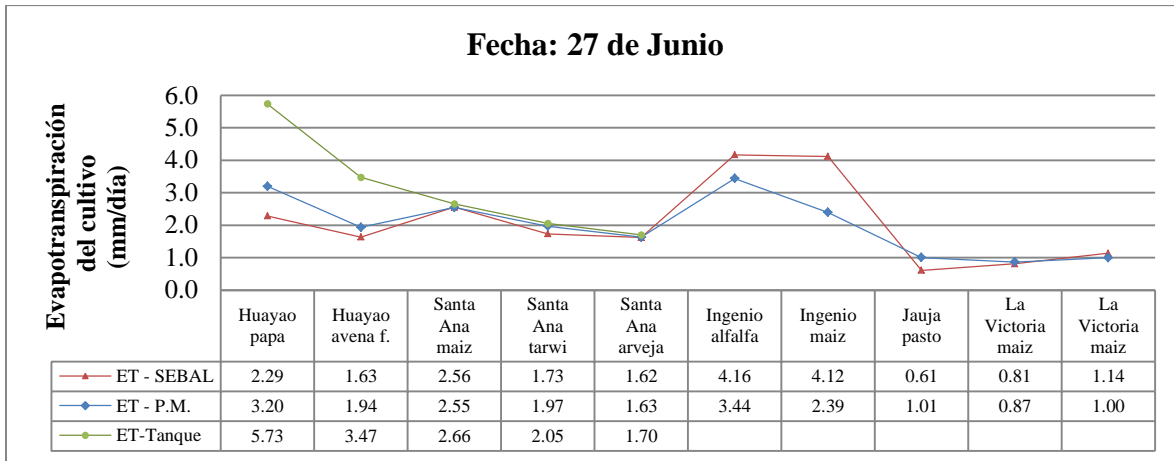


Figura 42: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para para la imagen de 27 de Junio.

e. Imagen correspondiente al 13 de Julio del 2008

En el diagrama de la Figura 43, se muestra el contraste entre los valores de los tres métodos de estimación de ET, observándose una clara sobreestimación para la zona de Ingenio por parte de SEBAL con respecto a PM encontrándose un RMSE igual a 0.612 mm/día, un R^2 de 0.854 y una ENS igual a 0.728, siendo este un valor muy bueno, asimismo la correlación entre SEBAL con respecto al TEA, muestran valores bajos pero aceptables con un RMSE igual a 0.670 mm/día, un R^2 de 0.822 y una ENS igual a 0.732 .

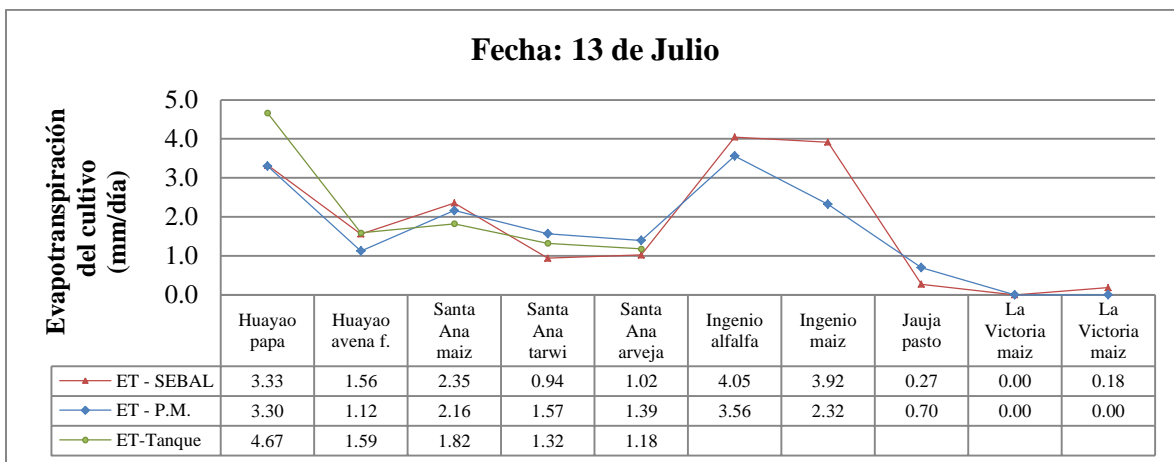


Figura 43: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la imagen del 13 de Julio.

f. D Imagen correspondiente al 14 de Agosto del 2008

Finalmente en el diagrama de la Figura 44, se muestra el contraste entre los valores de los tres métodos de estimación de ET, nuevamente observándose una sobreestimación por parte de SEBAL para la zona de la estación con respecto a la estimación por el método de PM, sin embargo comparando todos los datos de PM y SEBAL se obtiene una correlación aceptable con un RMSE de 0.664 mm/día, un R^2 de 0.820 y una ENS igual a 0.622 siendo este un valor muy bueno. Asimismo en la comparación de los métodos de SEBAL y el TEA, se obtuvieron nuevamente valores bastante bajos con un RMSE de 0.860 mm/día, un R^2 de 0.115 y una ENS igual a -0.005, el cual es un valor insuficiente.

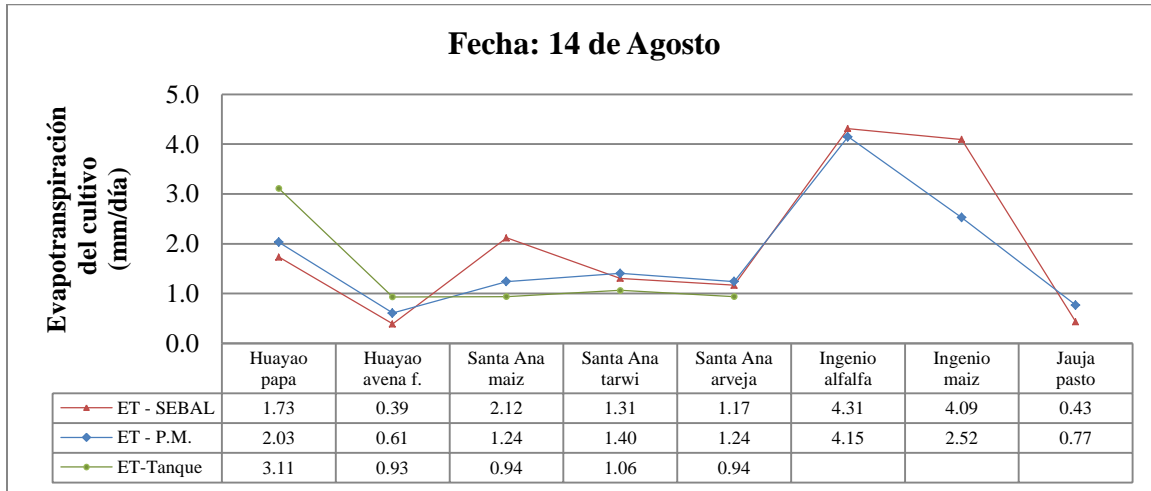


Figura 44: Diagrama en línea de la ET estimada con SEBAL, Penman-Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A para la imagen del 14 de Agosto.

En el Cuadro 17 se observa que para los resultados de ET correspondiente a las imágenes de los días 8 y 24 de Abril, son los que mejor correlación presentan, esto debido a que en esta temporada los cultivos no sufren ningún tipo de estrés ya que se cuenta con disponibilidad hídrica; por el contrario, los siguientes días juliano, correspondiente a los siguientes meses, se observa una disminución en esta correlación ya que estos meses pertenece a la época de estiaje, además en esta temporada se presentan variaciones en las temperaturas lo cual afecta al desarrollo de los cultivos, adicionalmente el hecho de tener

datos sobreestimados por parte de SEBAL para la zona de la estación Ingenio, influye en que la correlación para estos días sea menor.

Cuadro 17: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y Penman-Monteith distribuidos espacialmente

Método estadístico	8-Abril	24-Abril	26-Mayo	27-Junio	13-Julio	14-Agosto
Error Medio Cuadrático (RMSE) mm/día	0.321	0.365	0.631	0.683	0.612	0.664
Coefficiente de determinación (R^2)	0.932	0.904	0.650	0.679	0.854	0.820
La eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.912	0.835	0.093	0.366	0.728	0.622

En el Cuadro 18, se muestra un cuadro resumen de todos los métodos estadísticos utilizados para evaluar los valores de ET estimados por el método del TEA y SEBAL, mostrándose que para todos los días juliano, se presenta una correlación baja, inclusive, en algunos casos, se obtuvieron valores negativos. Cabe resaltar, como ya se mencionó anteriormente, que los valores de ET estimados con el método del TEA no son muy confiables, sobre todo para la estación Huayao, que en la mayoría de casos sobreestima los valores de ET.

Cuadro 18: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y El tanque evaporímetro tipo A distribuidos espacialmente

Método estadístico	8-Abril	24-Abril	26-Mayo	27-Junio	28-Julio	14-Agosto
Error Medio Cuadrático (RMSE) mm/día	0.843	0.494	1.033	1.754	0.670	0.860
Coefficiente de determinación (R^2)	0.442	0.723	0.000	0.185	0.822	0.115
La eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.328	0.588	-0.188	-0.490	0.732	-0.005

4.5.3. Comparación Espacio – Temporal los valores de ET

a. Comparación con el método de Penman-Monteith

En la Figura 45 se observa la relación lineal entre todos los valores de ET (58 pares de datos) estimado por el método de SEBAL y PM, observándose una buena correlación lineal. Asimismo en el Cuadro 19 se muestran los resultados de los métodos estadísticos obtenidos, los cuales son valores muy buenos.

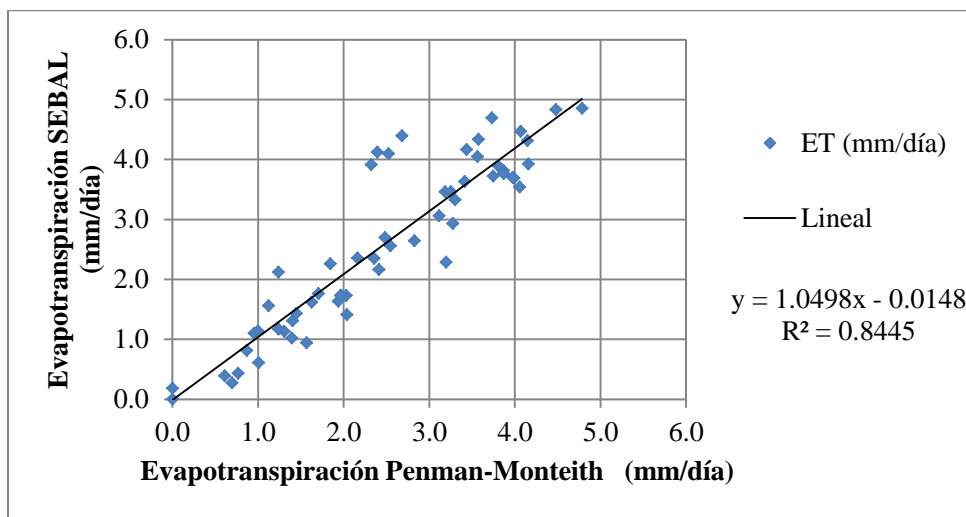


Figura 45: Diagrama de dispersión para comparar todos los valores de Evapotranspiración

Cuadro 19: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y Penman-Monteith

Método estadístico	Resultados
Error Medio Cuadrático (RMSE) mm/día	0.561
Coefficiente de determinación (R^2)	0.845
La eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.787

b. Comparación con el método del tanque evaporímetro tipo A

En la Figura 46, se muestra la relación lineal entre todos los valores obtenidos por el modelo SEBAL y por el método de tanque evaporímetro tipo A, observándose una correlación lineal baja. Asimismo en el Cuadro 20 se muestra un resumen de los resultados de los métodos estadísticos utilizados para evaluar los valores de ET, siendo estos resultados bajos pero aceptables.

Cuadro 20: Resultado de los métodos estadísticos utilizados para evaluar la ET estimada por SEBAL y El tanque evaporímetro tipo A

Método estadístico	Resultados
Error Medio Cuadrático (RMSE) mm/día	1.024
Coefficiente de determinación (R^2)	0.416
La eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.368

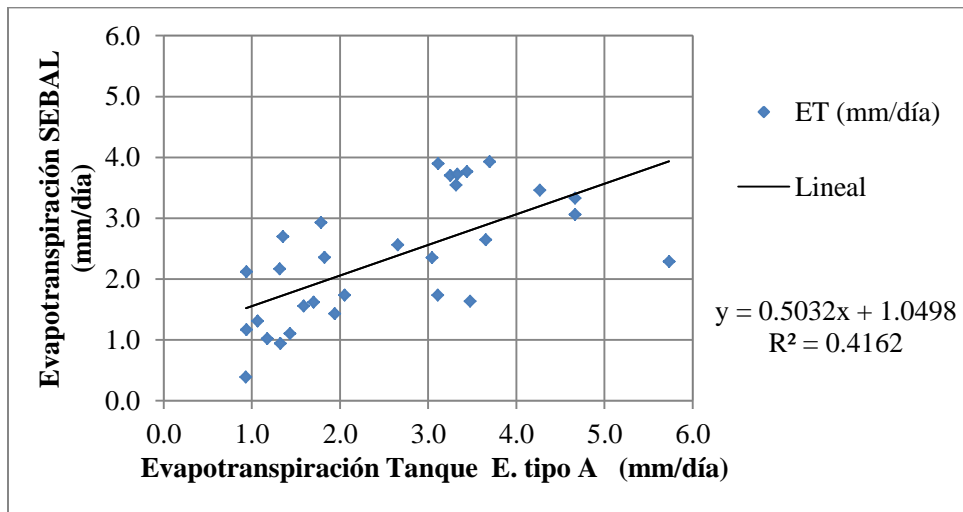


Figura 46: Diagrama de dispersión para comparar todos los valores de Evapotranspiración – Tanque tipo A

4.6. RESULTADOS DE LA TEMPERATURA DEL AIRE

En la Figura 47 se muestran los valores de temperatura del aire estimados con SEBAL para una hora determinada (hora a la que fue capturada la imagen satelital correspondiente a cada día juliano, 10 a.m. aproximadamente). Como se observa, las temperaturas del aire siguen una tendencia ya establecida en el mismo algoritmo que muestra una relación inversamente proporcional entre el valor de la temperatura del aire y la elevación, es decir, a medida que la elevación aumenta, la temperatura del aire disminuye.

La Figura 47, correspondiente a los mapas de temperatura de los días 8 y 24 de Abril, se muestra una mayor temperatura que en los siguientes días (de otros meses). Los valores de temperatura serán validados con el apoyo de las estaciones meteorológicas señaladas en el Cuadro 7.

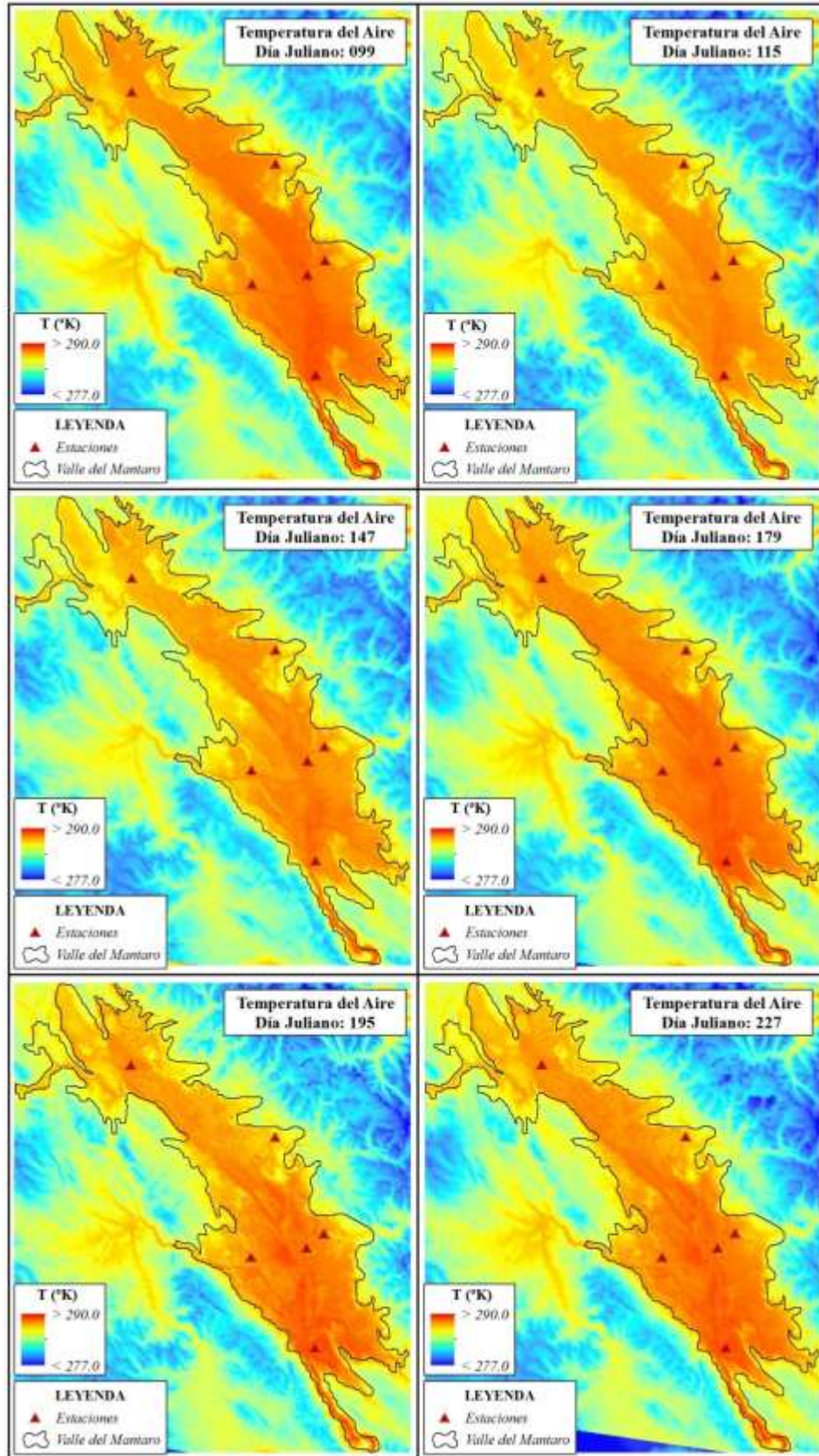


Figura 47: Temperatura del aire estimado con SEBAL

4.7. RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

4.7.1. Evapotranspiración para el día 8 de Abril

En la Figura 48, se observa la distribución espacial de la evapotranspiración diaria para la imagen del día juliano 099, correspondiente al 8 de abril del 2008, en esta primera estimación se presentan evapotranspiraciones cubriendo casi todo el área del valle, esto debido a que hasta el mes de abril se desarrolla la campaña grande (cultivos en secano) donde todos los terrenos agrícolas son sembrados aprovechando las lluvias de verano (Diciembre, Enero, Febrero, Marzo).

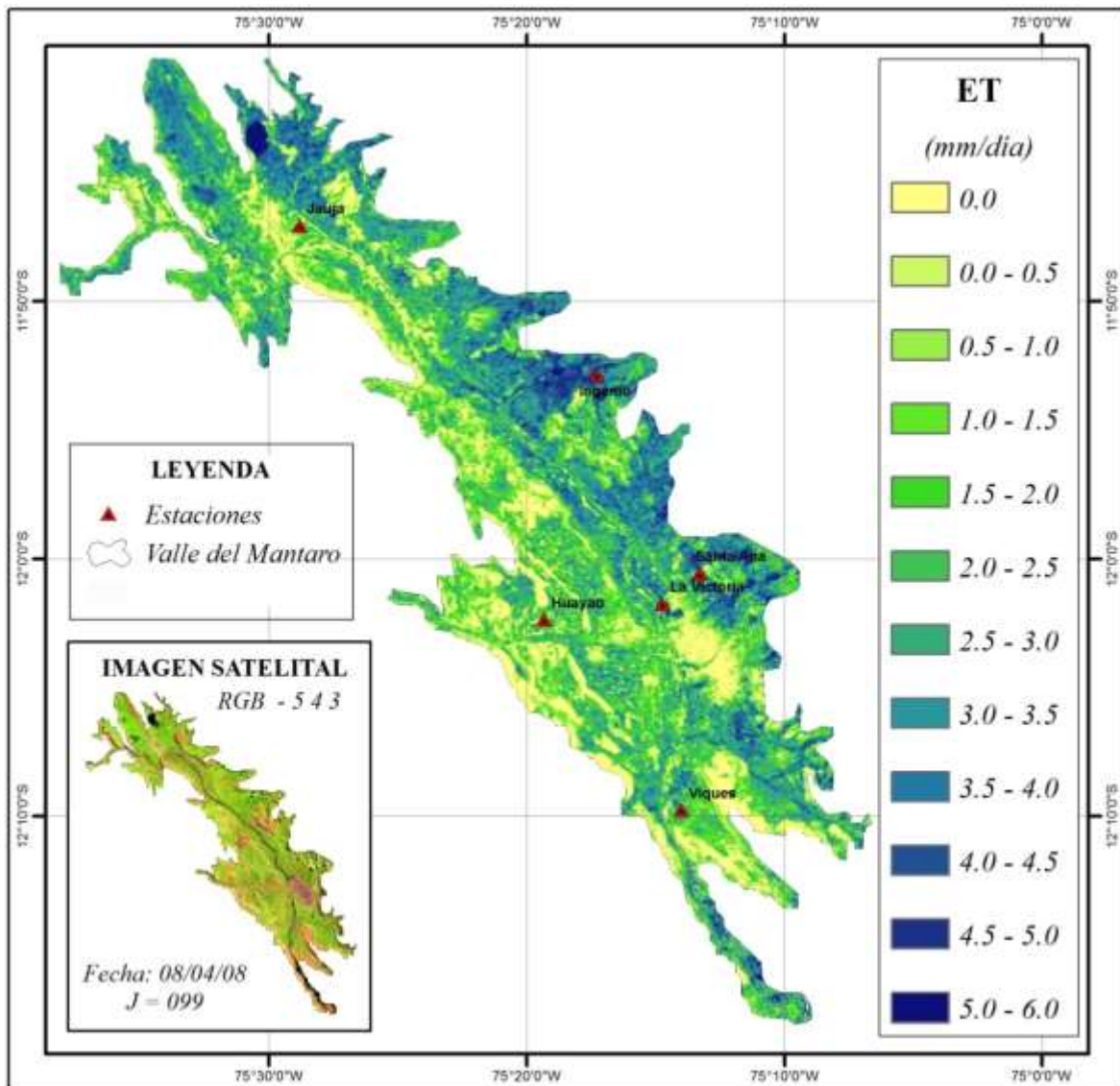


Figura 48: Evapotranspiración para el día 8 de Abril

Asimismo, se observan altos valores (4.0 – 5.0 mm/día) en la zona de Ingenio, esto debido a que esta zona cuenta con muchos árboles que bordean los terrenos agrícolas y dan la impresión de ser un área forestal, además estos arbustos generan sombras obteniéndose valores alterados en los niveles digitales (ND) de los píxeles. Por último se observa que los valores más elevados de ET (5.0 - 6.0 mm/día) se encuentran en los cuerpos de agua, y valores de cero para las zonas correspondientes a áreas urbanas (ciudad de Huancayo), suelos desnudos y terrenos rocosos, por lo que se demuestra una buena concordancia con respecto al uso de la tierra.

4.7.2. Evapotranspiración para el día 24 de Abril

En la Figura 49, se observa la distribución espacial de la evapotranspiración diaria para la imagen del día juliano 115, correspondiente al 24 de abril del 2008, y como se explicó en la figura anterior, se presentan evapotranspiraciones distribuidas en casi todo el valle debido a que hasta el mes de abril se desarrolla la campaña grande donde todos los terrenos agrícolas son sembrados aprovechando las lluvias, y al igual que la imagen anterior las zonas de mayor y menor ET corresponden a los cuerpos de agua y zonas urbanas respectivamente, y las zonas agrícolas con mayor ET y menor ET corresponde a la zona de Ingenio por la presencia de árboles y la zona de Jauja por la culminación del periodo vegetativo como se observa en la imagen. Particularmente en esta imagen se observa la presencia de nubes, las cuales fueron enmascaradas ya que el modelo SEBAL tiene deficiencias en estas zonas por presentar valores alterados del nivel digital.

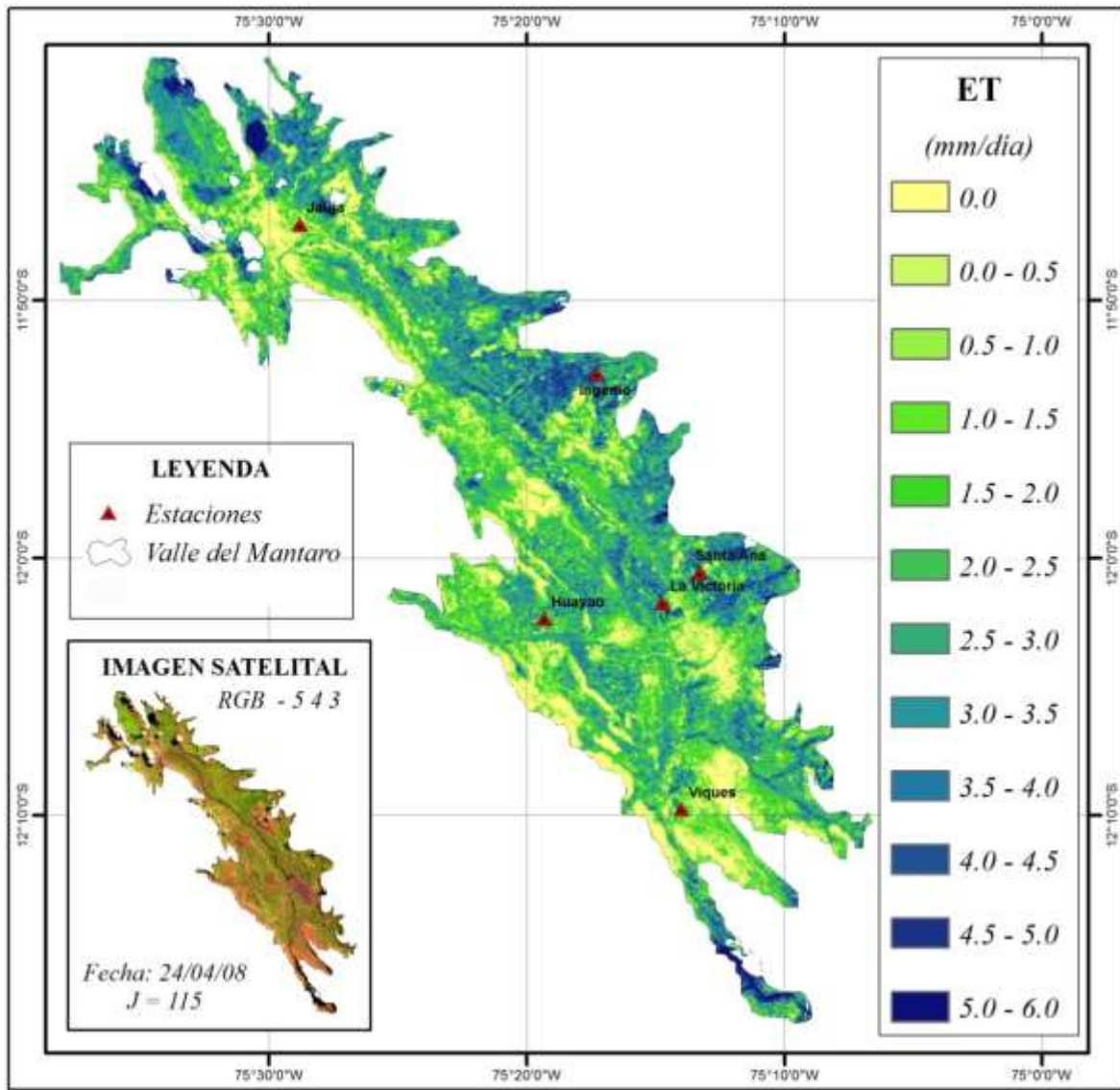


Figura 49: Evapotranspiración para el día 24 de Abril

4.7.3. Evapotranspiración para el día 26 de Mayo

En la Figura 50, se observan la distribución espacial de la evapotranspiración para la imagen del día juliano 147, correspondiente al 26 de mayo del 2008, con una notoria disminución en el área agrícola, esto debido a que los cultivos ya han sido cosechados y otros son barbechados para la siembra de la siguiente campaña (cultivos con irrigación), sin embargo se sigue observando que la zona Ingenio presenta altos valores de ET con respecto a las otras zonas. Finalmente los cuerpos de agua son las zonas con el máximo valor de ET.

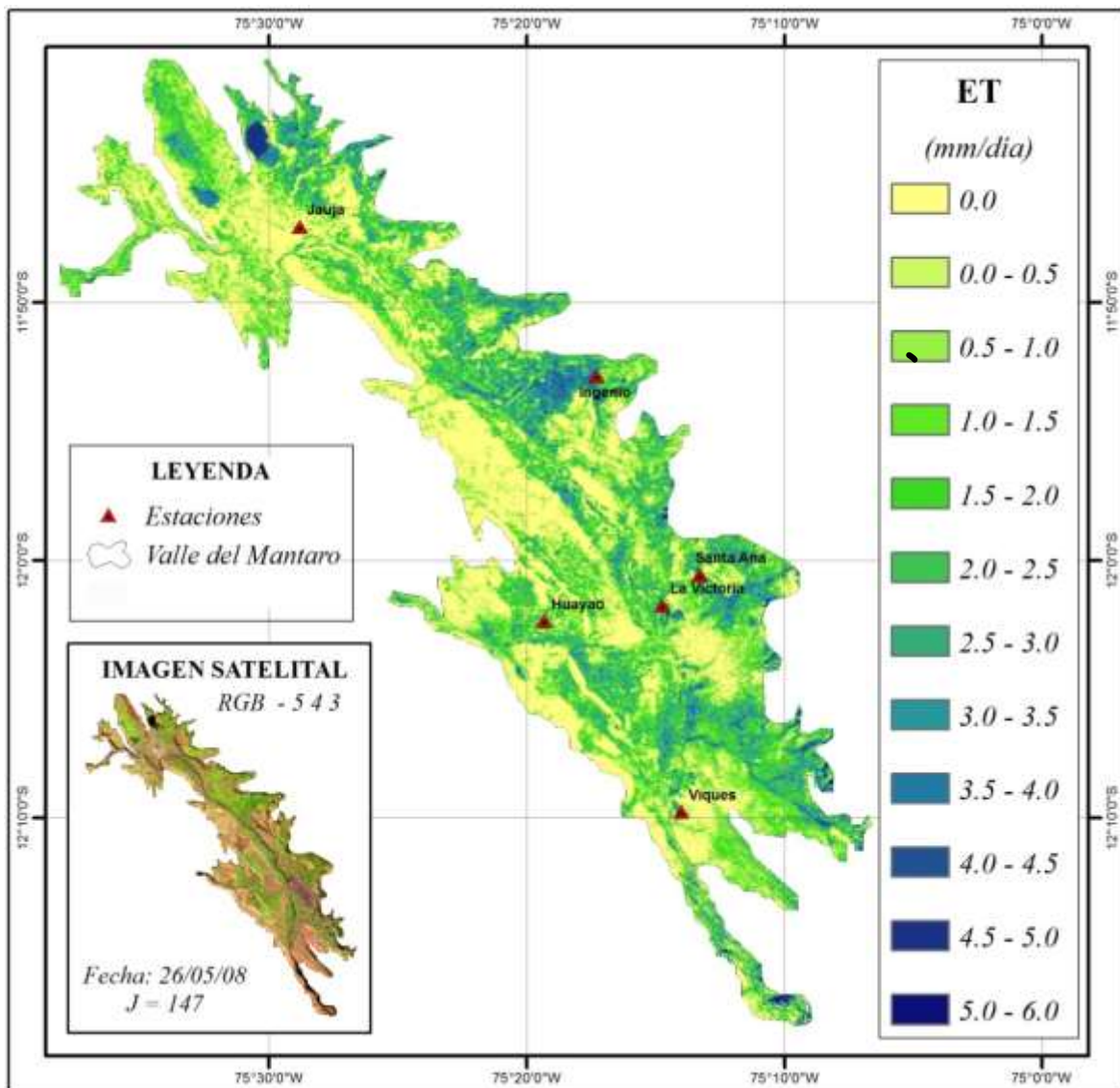


Figura 50: Evapotranspiración para el día 26 de Mayo

4.7.4. Evapotranspiración para el día 27 de Junio

En la Figura 51, se observa la distribución espacial de la evapotranspiración para la imagen del día juliano 179, correspondiente al 27 de junio del 2008, con una notoria disminución de los valores de ET, esto debido a que los terrenos correspondientes a la segunda campaña de siembra aún están en germinación y los cultivos correspondientes al primer periodo de siembra se encuentran en cosecha y en otros casos sirven de pastoreo para los animales.

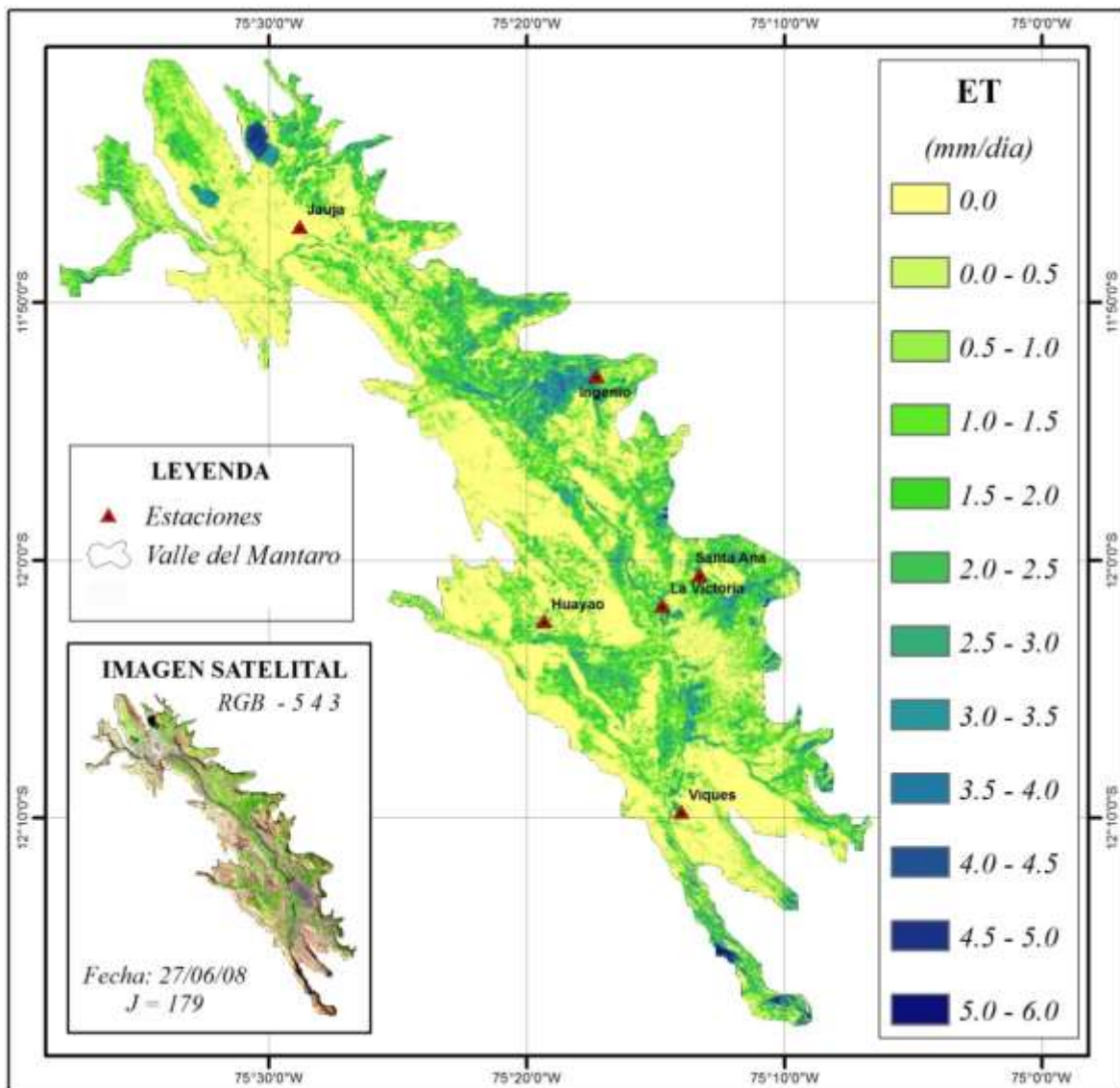


Figura 51: Evapotranspiración para el día 27 de Junio

4.7.5. Evapotranspiración para el día 13 de Julio

En la Figura 52, se observa la distribución espacial de la evapotranspiración para la imagen del día juliano 195, correspondiente al 13 de julio del 2008, el cual presenta cada vez menos área de cultivo y en otras zonas se observa un incremento de ET correspondiente a los cultivos de la segunda temporada de siembra que ya están en pleno desarrollo.

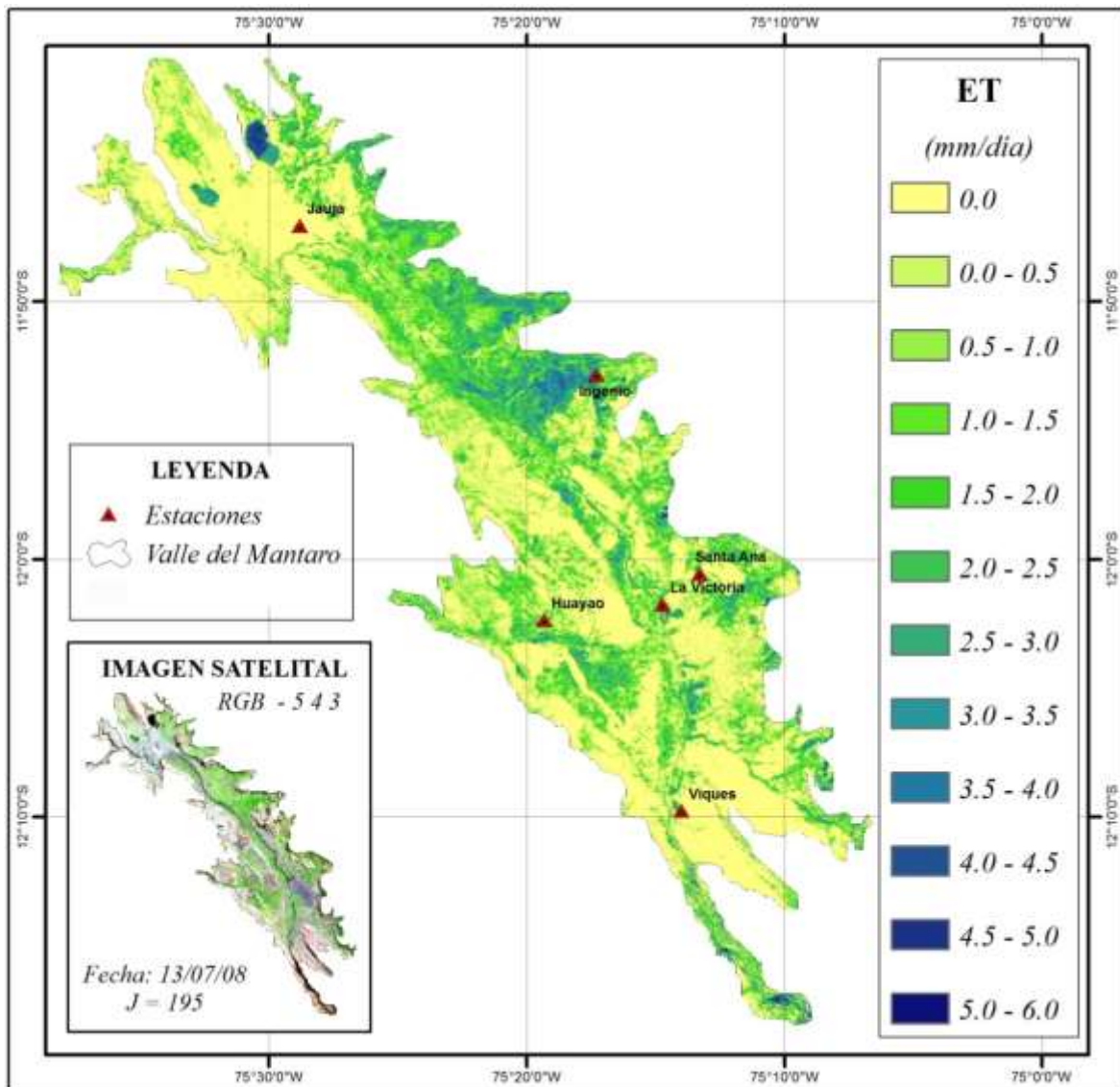


Figura 52: Evapotranspiración para el día 13 de Julio

4.7.6. Evapotranspiración para el día 14 de Agosto

En la Figura 53, se observa la distribución espacial de la evapotranspiración para la imagen del día juliano 227, correspondiente al 14 de agosto del 2008, con una menor área de cultivo, sin embargo es notorio que en la zona de Ingenio, sigue presentando problemas debido a su resolución espacial, dando la apariencia de presentar áreas con sembrío lo cual esta errado.

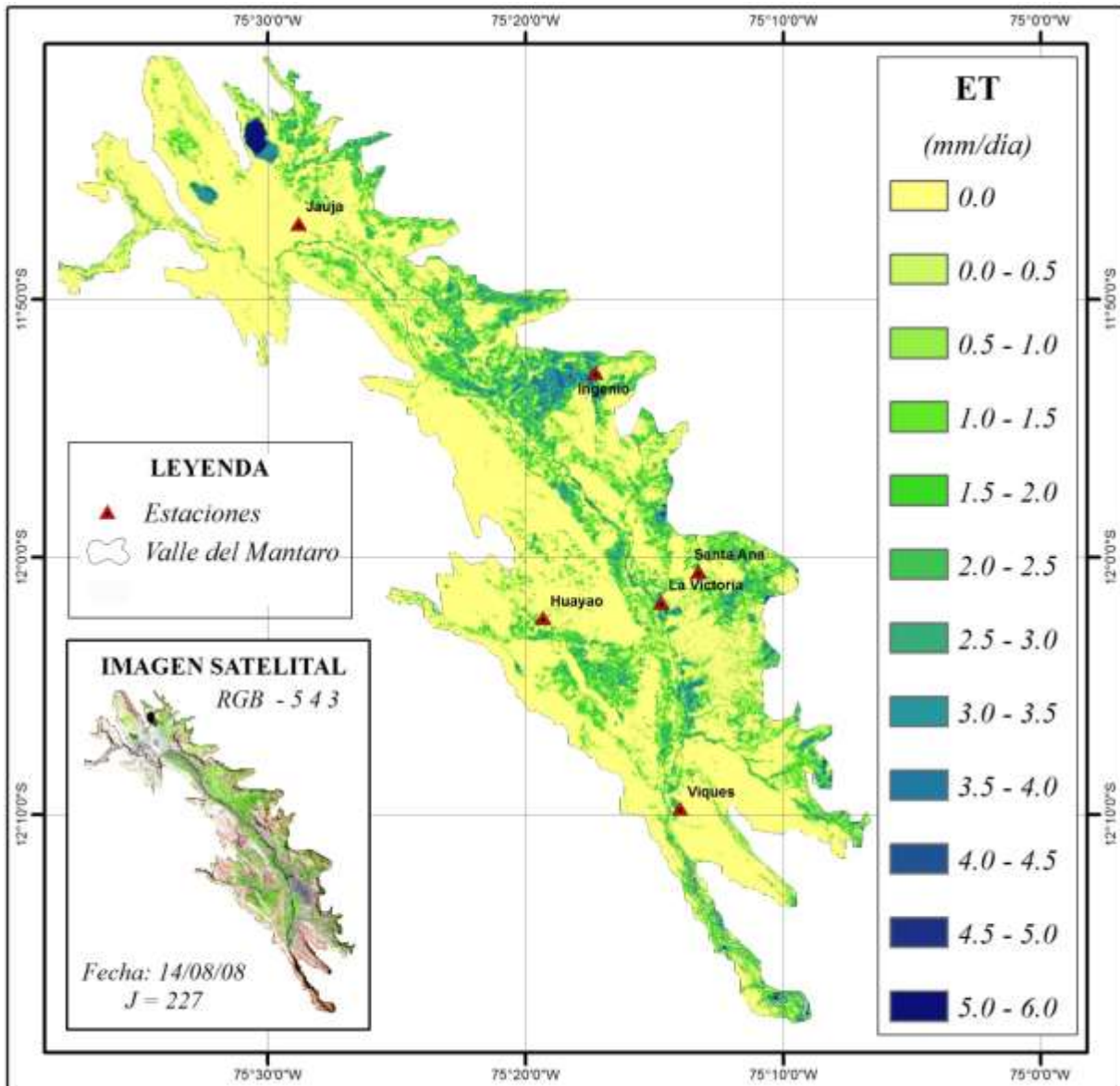


Figura 53: Evapotranspiración para el día 14 de Agosto

V. CONCLUSIONES

El modelo SEBAL, permitió estimar evapotranspiración espacial en zonas de altas elevaciones como fue el caso del Valle del Mantaro, observándose, en los mapas, valores con una buena coherencia respecto al uso de la tierra, y con la capacidad de detectar la presencia de estrés hídrico debido al cambio estacional como se observó en la zona de Jauja.

Se logró implementar el modelo SEBAL, utilizando el Model Builder del software ArcGIS v10.2, siendo este una herramienta adecuada que permitió realizar todas las operaciones que el algoritmo demanda.

Mediante el modelo SEBAL, se estimó Radiación solar y Temperatura del aire a la hora de la toma de la imagen (10 a.m.), las cuales fueron validadas con mediciones reales proporcionadas por la estación La Victoria, obteniéndose resultados satisfactorio para la estimación de Radiación solar con un error medio cuadrático (RMSE) de 23.38 W/m^2 , un coeficiente de determinación (R^2) de 0.969 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.751. Asimismo, se encontró una buena correlación en la validación de la temperatura del aire con un RMSE de $0.694 \text{ }^\circ\text{C}$, un R^2 de 0.912 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.227.

La evapotranspiración estimada con el modelo SEBAL, fue validada y comparada con el método de Penman-Monteit, obteniéndose resultados satisfactorios con un RMSE de 0.561 mm/día , un R^2 de 0.845 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.787. Mientras, que al comparar los valores de ET con los estimados por el método del tanque evaporímetro tipo A, se obtuvieron resultados bajos pero aceptables, con un RMSE de 1.024 mm/día , un R^2 de 0.416 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.368.

El uso de imágenes satelitales y el algoritmo SEBAL, permiten conocer el comportamiento espacial y temporal de la evapotranspiración, sirviendo este como herramienta para la toma de decisiones con la finalidad de mejorar la planeación y manejo de recursos hídricos.

VI. RECOMENDACIONES

Al momento de elegir una imagen satelital, se debe tener en cuenta que no tenga presencia de nubes, ya que los valores del nivel digital son alterados, siendo este un factor limitante en la aplicación de SEBAL.

Para elegir la imagen satelital a utilizar se debe considerar la resolución espacial. Así por ejemplo, de acuerdo a la uniformidad en el uso de la tierra de la zona; para extensas áreas de cultivo, no es necesario utilizar imágenes de alta resolución, sin embargo en zonas donde predominan pequeñas parcelas, como es el caso de las zonas alto-andinas, es recomendable utilizar imágenes con una mejor resolución espacial para obtener un mejor detalle en las estimaciones.

Para calibrar el modelo SEBAL, se debe contar con mediciones reales de evapotranspiración, como es el caso del uso de lisímetros, ya que se tendría una mejor certeza en cuanto a la validación de los resultados. Sin embargo, encontrar este tipo de información es muy complejo, por ello se solicitaría que el ministerio de Agricultura en un trabajo conjunto con los centros de investigación, pongan un mayor esfuerzo en la implementación de lisímetros para el desarrollo de distintos temas de investigación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABTEW, W. , OBEYSEKERA, J. (1995). Lysimeter study of evapotranspiration of cattails and comparison of three estimation methods. *Transactions of the ASAE* 38(1): 121-129.
- ALLEN, R., IRMAK, A., TREZZA, R., HENDRICKX, J. M., BASTIAANSEN, W. , KJAERGAARD, J. (2011). Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological processes* 25(26): 4011-4027.
- ALLEN, R., TASUMI, M., TREZZA, R., WATERS, R. , BASTIAANSEN, W. (2002a). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). *Advance Training and Users Manual–Idaho Implementation, version 1*.
- ALLEN, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Food & Agriculture Org*.
- ALLEN, R. G., JENSEN, M. E., WRIGHT, J. L. , BURMAN, R. D. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal* 81(4): 650-662.
- ALLEN, R. G., MORSE, A., TASUMI, M., TREZZA, R., BASTIAANSEN, W., WRIGHT, J. L. , KRAMBER, W. (2002b). Evapotranspiration from a satellite-based surface energy balance for the Snake Plain Aquifer in Idaho. *Proceedings of the 2002 USCID/EWRI Conference, San Luis Obispo*: 167-178.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. , SMITH, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome* 300: 6541.
- ALLEN, R. G., TREZZA, R. , TASUMI, M. (2006). Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. *Agricultural and Forest Meteorology* 139(1): 55-73.
- ARASTEH, P. D. (2005). Large Area Surface Energy Balance Estimation Using Satellite Imagery. *Water Encyclopedia*.

- BASTIAANSEN, W. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of hydrology* 229(1): 87-100.
- BASTIAANSEN, W., MENENTI, M., FEDDES, R. , HOLTSLAG, A. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology* 212: 198-212.
- BASTIAANSEN, W., NOORDMAN, E., PELGRUM, H., DAVIDS, G., THORESON, B. , ALLEN, R. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering* 131(1): 85-93.
- BASTIAANSEN, W., PELGRUM, H., WANG, J., MA, Y., MORENO, J., ROERINK, G. , VAN DER WAL, T. (1998b). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL).: Part 2: Validation. *Journal of hydrology* 212: 213-229.
- BASTIAANSEN, W. G., MOLDEN, D. J. , MAKIN, I. W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural water management* 46(2): 137-155.
- BUSINGER, J. , YAGLOM, A. (1971). Introduction to Obukhov's paper on 'Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature'. *Boundary-Layer Meteorology* 2(1): 3-6.
- CABRERA, J. , ENG, C. Calibración de Modelos Hidrológicos.
- CANALES, M. O. B. G. (2009). Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes Centrales Peruanos. *Instituto Nacional de Innovación Agraria - Instituto Geofísico del Perú*.
- CHANDER, G. , MARKHAM, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 41(11): 2674-2677.

- CHANDER, G., MARKHAM, B. L. , HELDER, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment* 113(5): 893-903.
- CRUZ, H., KRANZ, J., SORIANO DE MANZUETA, E., MITÉ, F., PIAGGIO PAREJA, G., THEUNISSEN, J., AZOFEIFA VILLALOBOS, A., CAMPOS, M. D., CHANCHAN NUÑEZ, J. , CASTRO MAGAÑA, M. (2010). Memoria del subproyecto" pronóstico estacional de lluvias y temperaturas en la cuenca del río Mantaro para su aplicación en la agricultura" 2007-2010. *Seminario Centroamericano. San Salvador (El Salvador). 13 Set 2005.*
- CUELLAR, J. , MEDINA, T. (2009). Agrobiodiversidad, género y cambio climático en la cuenca del río Mantaro. *Tecnología y Sociedad* 16(8): 83-99.
- DROOGERS, P., IMMERZEEL, W. , PERRY, C. (2009). Application of Remote Sensing in National Water Plans.
- ESRI (2013). ArcGIS Version 10.2. *Environmental Systems Research Institute*
- GANGOPADHYAYA, M. (1965). Evaporation - Its Measurement and Estimation. *Symposium; design of hydrological networks* 2: 507.
- GONG, L., XU, C.-Y., CHEN, D., HALLDIN, S. , CHEN, Y. D. (2006). Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of hydrology* 329(3): 620-629.
- GORDILLO SALINAS, V. M. (2013). Estimación de la evapotranspiración de un cultivo de vid con apoyo de imagen satelital y validación utilizando Eddy Covariance.
- IMMERZEEL, W. (2008). Spatial modelling of mountainous basins; An integrated analysis of the hydrological cycle, climate change and agriculture. *Utrecht University, Royal Dutch Geographical Society.*

- INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ, L. (2010). Memoria del subproyecto" pronóstico estacional de lluvias y temperaturas en la cuenca del río Mantaro para su aplicación en la agricultura" 2007-2010.
- IRMAK, S. , HAMAN, D. Z. (2003). Evapotranspiration: potential or reference. *IFAS Extension, ABE* 343.
- JENSEN, M. E., BURMAN, R. D. , ALLEN, R. G. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements. *NY: American Society of Civil Engineers Manual of Practice* No. 70.
- KIPTALA, J., MOHAMED, Y., MUL, M. , ZAAG, P. (2013). Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. *Water Resources Research*.
- KUSTAS, W. , NORMAN, J. (1996). Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal* 41(4): 495-516.
- LONG, D., SINGH, V. P. , LI, Z. L. (2011). How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)* 116(D21).
- MARTÍNEZ, M. S. (2002). Modelos y aproximaciones para la estimación de la evapotranspiración con información satelital. *Revista de Geografía Norte Grande* 29: 107-120.
- MELESSE, A. M., WENG, Q., THENKABAIL, P. S. , SENAY, G. B. (2007). Remote sensing sensors and applications in environmental resources mapping and modelling. *Sensors* 7(12): 3209-3241.
- MORSE, A., TASUMI, M., ALLEN, R. G. , KRAMBER, W. J. (2000). Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the Bear River Basin of Idaho through remote sensing. *Idaho Department of Water Resources–University of Idaho*.

- NÚÑEZ JULIÁ, C. M. (2009). Modelación del flujo de calor del suelo y aplicación de algoritmo de cálculo de evapotranspiración mediante teledetección.
- PAUL, G., GOWDA, P. H., VARA PRASAD, P., HOWELL, T. A., AIKEN, R. M. , NEALE, C. M. (2014). Investigating the influence of roughness length for heat transport (zoh) on the performance of SEBAL in semi-arid irrigated and dryland agricultural systems. *Journal of hydrology* 509: 231-244.
- PEREIRA, L. S., PERRIER, A., ALLEN, R. G. , ALVES, I. (1999). Evapotranspiration: concepts and future trends. *Journal of irrigation and drainage engineering* 125(2): 45-51.
- RAMOS, J. G., CRATCHLEY, C. R., KAY, J. A., CASTERAD SERAL, M. A., HERRERO ISERN, J. , MARTÍNEZ-COB, A. (2005). Comparison of the SEBAL and the traditional FAO procedure for water volume estimation in an irrigation district. *New strategies for European remote sensing*: 515-522.
- UNFCCC (2007). Climate change: Impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries - United Nations Framework Convention on Climate Change. *United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- VALOR, E. , CASELLES, V. (1996). Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote sensing of environment* 57(3): 167-184.
- VIDAL, Y. S. (2010). Memoria del subproyecto" pronóstico estacional de lluvias y temperaturas en la cuenca del río Mantaro para su aplicación en la agricultura" 2007-2010. *Instituto Geofísico del Perú, Lima*.
- WUKELIC, G., GIBBONS, D., MARTUCCI, L. , FOOTE, H. (1989). Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper thermal band. *Remote sensing of environment* 28: 339-347.

ANEXOS

ANEXO 1: Evapotranspiración con el método de Penman – Monteith y el Tanque evaporímetro tipo A

Cuadro 1: Secuencia de cálculo para la estimación de la Evapotranspiración de referencia (ET_o) por el método de Penman-Monteith

Fecha	Estación	Latitud (gr)	Longitud (gr)	Elevación (msnm)	T. max (°C)	T.min (°C)	H (%)	V.v (m/s)	P.A (kPa)
8-Apr-08	Huayao	-12.04	-75.32	3357	21.90	1.80	54.09	1.7	67.816
24-Apr-08	Huayao	-12.04	-75.32	3357	21.40	2.50	54.89	1.7	67.816
26-May-08	Huayao	-12.04	-75.32	3357	19.30	2.00	60.89	1.7	67.816
27-Jun-08	Huayao	-12.04	-75.32	3357	20.40	2.00	65.63	1.7	67.816
13-Jul-08	Huayao	-12.04	-75.32	3357	20.20	4.00	55.66	1.7	67.816
14-Aug-08	Huayao	-12.04	-75.32	3357	21.50	0.20	53.97	1.7	67.816
8-Apr-08	Ingenio	-11.88	-75.29	3426	21.80	3.00	77.39	1.7	66.806
24-Apr-08	Ingenio	-11.88	-75.29	3426	21.00	3.00	77.08	1.7	66.806
26-May-08	Ingenio	-11.88	-75.29	3426	19.00	2.10	76.98	1.7	66.806
27-Jun-08	Ingenio	-11.88	-75.29	3426	19.30	3.20	76.72	1.7	66.806
13-Jul-08	Ingenio	-11.88	-75.29	3426	18.80	2.50	72.69	1.7	66.806
14-Aug-08	Ingenio	-11.88	-75.29	3426	20.90	0.20	74.84	1.7	66.806
8-Apr-08	Jauja	-11.78	-75.48	3364	20.00	2.20	54.56	1.7	67.390
24-Apr-08	Jauja	-11.78	-75.48	3364	20.00	2.00	52.40	1.7	67.390
26-May-08	Jauja	-11.78	-75.48	3364	19.00	2.40	52.54	1.7	67.390
27-Jun-08	Jauja	-11.78	-75.48	3364	20.00	2.80	56.55	1.7	67.390
13-Jul-08	Jauja	-11.78	-75.48	3364	19.20	2.60	46.38	1.7	67.390
14-Aug-08	Jauja	-11.78	-75.48	3364	20.80	0.20	56.65	1.7	67.390
8-Apr-08	Santa Ana	-12.01	-75.22	3307	22.60	1.40	55.33	1.7	67.945
24-Apr-08	Santa Ana	-12.01	-75.22	3307	22.00	1.60	59.55	1.7	67.945
26-May-08	Santa Ana	-12.01	-75.22	3307	20.60	2.00	62.98	1.7	67.945
27-Jun-08	Santa Ana	-12.01	-75.22	3307	21.40	1.40	59.02	1.7	67.945
13-Jul-08	Santa Ana	-12.01	-75.22	3307	21.00	2.40	45.48	1.7	67.945
14-Aug-08	Santa Ana	-12.01	-75.22	3307	22.20	0.00	50.91	1.7	67.945
8-Apr-08	La Victoria	-12.03	-75.25	3307	23.10	2.90	63.58	1.7	68.709
24-Apr-08	La Victoria	-12.03	-75.25	3307	21.60	3.20	62.18	1.7	68.709
26-May-08	La Victoria	-12.03	-75.25	3307	20.60	3.30	63.06	1.7	68.709
27-Jun-08	La Victoria	-12.03	-75.25	3307	21.60	2.20	62.14	1.7	68.709
13-Jul-08	La Victoria	-12.03	-75.25	3307	21.40	3.70	61.53	1.7	68.709

Continuación Cuadro 1

Día Juliano	Ra (MJ m ⁻² día ⁻¹)	N	n	n/N	Rs (MJ m ⁻²)	Rns (MJ m ⁻²)	Rnl (MJ m ⁻²)	Rn (MJ m ⁻²)	ET
099	34.77	11.79	9.2	0.78	22.257	17.14	4.97	12.17	4.15
115	32.64	11.62	10.3	0.89	22.626	17.42	5.59	11.83	4.14
147	29.09	11.36	9.2	0.81	19.045	14.66	5.13	9.53	3.36
179	28.09	11.30	8.7	0.77	17.838	13.74	4.80	8.94	3.23
195	28.80	11.35	8.3	0.73	17.726	13.65	4.76	8.89	3.40
227	32.07	11.60	10.3	0.89	22.249	17.13	5.66	11.47	4.06
099	34.81	11.80	9.7	0.82	23.018	17.72	4.75	12.97	3.99
115	32.70	11.63	9.5	0.82	21.534	16.58	4.77	11.81	3.73
147	29.16	11.37	7.7	0.68	17.161	13.21	4.10	9.11	2.98
179	28.17	11.31	8.7	0.77	17.878	13.77	4.52	9.24	2.99
195	28.87	11.36	9.1	0.80	18.780	14.46	4.73	9.73	3.10
227	32.12	11.61	9.5	0.82	21.175	16.30	4.75	11.56	3.61
099	34.84	11.80	9.7	0.82	23.033	17.74	5.17	12.57	4.08
115	32.73	11.63	9.5	0.82	21.552	16.60	5.23	11.36	3.94
147	29.20	11.38	7.7	0.68	17.183	13.23	4.42	8.81	3.26
179	28.21	11.31	8.7	0.77	17.902	13.78	4.97	8.81	3.35
195	28.92	11.37	9.1	0.80	18.803	14.48	5.28	9.20	3.48
227	32.16	11.61	9.5	0.82	21.194	16.32	5.11	11.21	3.84
099	34.78	11.79	9.2	0.78	22.262	17.14	4.91	12.23	4.18
115	32.66	11.62	10.3	0.89	22.633	17.43	5.48	11.95	4.12
147	29.10	11.37	9.2	0.81	19.053	14.67	5.08	9.59	3.45
179	28.11	11.30	8.7	0.77	17.846	13.74	4.92	8.82	3.39
195	28.81	11.36	8.3	0.73	17.733	13.65	4.82	8.84	3.49
227	32.08	11.60	10.3	0.89	22.256	17.14	5.63	11.50	4.13
099	34.78	11.79	9.2	0.78	22.26	17.14	4.79	12.35	4.16
115	32.65	11.62	10.3	0.89	22.63	17.42	5.44	11.98	4.07
147	29.09	11.36	9.2	0.81	19.05	14.67	5.00	9.67	3.41
179	28.10	11.30	8.7	0.77	17.84	13.74	4.81	8.93	3.33
195	28.80	11.35	8.3	0.73	17.73	13.65	4.57	9.08	3.37

Cuadro 2: Evapotranspiración potencial por el método del tanque evaporímetro tipo A

Fecha	Estación	ET tanque (mm/día)
8-Apr-08	Huayao	6.22
24-Apr-08	Huayao	5.54
26-May-08	Huayao	4.35
27-Jun-08	Huayao	5.79
13-Jul-08	Huayao	4.81
14-Aug-08	Huayao	6.22
8-Apr-08	Santa Ana	3.42
24-Apr-08	Santa Ana	3.66
26-May-08	Santa Ana	1.88
27-Jun-08	Santa Ana	3.54
13-Jul-08	Santa Ana	2.94
14-Aug-08	Santa Ana	3.13

ANEXO 2: Panel Fotográfico de las zonas monitoreadas

1. Estación Huayao

Se obtuvo apoyo de los ingenieros trabajadores del Instituto Geofísico del Perú en Huancayo - estación Huayao, quienes permitieron el ingreso y explicaron el método de medición del tanque evaporímetro tipo A. Asimismo se contó con el apoyo de los pobladores del lugar.

Colaboradores:

- Ing. Luis Suarez
- Ing. Jacinto Arrollo

Cultivos Identificados:

- Papa
- Avena forrajera



Figura 1: Vista de la estación Huayao y el cultivo identificado para cada parcela



Figura 2: Tanque evaporímetro tipo A ubicado en la estación Huayao



Figura 3: Terrenos agrícolas que hasta el 2011 fueron de papa, ahora son de quinua

2. Estación Santa Ana

Se obtuvo apoyo de los ingenieros trabajadores del Instituto de Innovación Agraria (INIA) así como el Jefe de Campo, quienes permitieron el ingreso a sus instalaciones y brindaron la información de cultivo.

Colaboradores:

- Ing. Carola
- Rubén Untiveros Córdova (Jefe de Campo - INIA)

Cultivos Identificados:

- Maíz
- Tarwi
- Arveja Verde



Figura 4: Vista de la estación Santa Ana y el cultivo identificado para cada parcela



Figura 5: Estación Meteorológica Santa Ana – Tanque evaporímetro tipo A



Figura 6: Jefe de Campo - INIA

3. Estación Ingenio

Se obtuvo apoyo de los pobladores quienes brindaron la información de campo necesaria para identificar los cultivos.

Colaborador:

- Poblador de Quichuay: Juan Camarena Mayta

Cultivos Identificados:

- Maíz
- Alfalfa



Figura 7: Vista de la estación Ingenio y el cultivo identificado para cada parcela



Figura 8: Fotografía de la Zona de Ingenio, mostrando los altos arbustos que rodean las parcelas y las sombras que producen.



Figura 9: Poblador de la Localidad de Quichuay

4. Estación Jauja

Cultivo Identificado:

- Pasto



Figura 10: Vista del pasto identificado en la zona de la estación Jauja



Figura 11: Vista del panorámica del estadio de Jauja

5. Estación La Victoria

Se obtuvo apoyo de la ingeniera encargada del manejo de campo en La estación Huayao - Centro Internacional de la Papa (CIP), así como el Jefe de Campo, quienes permitieron el ingreso a sus instalaciones y brindaron la información de cultivo.

Colaboradores:

- Ing. Rebeca
- Jorge Cipriano Capcha (Jefe de Campo - CIP)

Cultivos Identificados:

- Maiz Lt1
- Maiz Lt2



Figura 12: Vista de la estación La Victoria y el cultivo identificado para cada parcela



Figura 13: Jefe de campo - CIP

ANEXO 3: Gráficos de la convergencia del flujo de calor sensible (H)

1.- Convergencia de resultados del flujo de calor sensible

