

UNIVERSIDAD DE CUENCA



CIENCIAS QUÍMICAS

INGENIERIA QUÍMICA

**“MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN NETA Y FLUJO DE CALOR EN  
EL SUELO EN UNA ZONA EXPERIMENTAL DEL PÁRAMO ANDINO”**

Tesis Previa a la Obtención del  
Título de Ingeniero Químico

AUTOR:

Juan Diego Zúñiga Loja

DIRECTOR:

Ing. Quím. Galo José Carrillo Rojas, M Sc.

TUTOR:

Ing. Mario Andrés Córdova Mora

CUENCA-ECUADOR

2015



## RESUMEN

Entender los diferentes procesos naturales es trascendental para precautelar la vida y ecosistemas, uno de los procesos menos estudiados en ecosistemas de páramo es el flujo de energía, específicamente la radiación neta y el flujo de calor del suelo. Por esta razón en esta investigación se evaluó el comportamiento de estas variables en un páramo al sur de Ecuador. Para este propósito los datos se obtuvieron del observatorio ecohidrológico de Zhuruca y con una frecuencia de muestreo de 5 minutos de radiación neta ( $R_n$ ), flujo de calor en el suelo ( $G$ ), y sus componentes. Se evaluaron 5 modelos de cálculo de  $R_n$  y 2 ecuaciones para el cálculo de  $G$ . Estos modelos se compararon con lecturas instrumentales en dos escalas temporales: horaria y diaria. Luego se evaluó su implicación en el cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) mediante la ecuación combinada de Penman-Monteith. Además se hizo el estudio comparativo entre dos parcelas gemelas contiguas de los componentes de  $R_n$  y  $G$ . En general se encontró que el modelo de la FAO 56 tiene el mejor comportamiento en las dos escalas temporales, aumentando la subestimación a medida que aumenta la escala temporal. Los resultados de las parcelas muestran variaciones en el albedo 6,015%, radiación neta 0,652%, radiación de onda corta saliente 6,655%, flujo de calor en el suelo 66,071%, temperatura del suelo 8,157% y humedad del suelo 2,315%, esto revela que a pesar de la aparente homogeneidad del suelo de las parcelas, hay una diferencia en la magnitud  $G$  y  $R_n$ .

**Palabras clave:** Radiación Solar, Energía, Evapotranspiración, Albedo, Páramo.



## ABSTRACT

To understand different natural processes is vital to forewarn life and ecosystems, a little studied process in the paramo ecosystem is energy flux, specifically net radiation and soil heat flux. For this reason, in this research we evaluated these variables in a paramo ecosystem located in southern Ecuador. For this purpose, data was obtained from the Zhurucay ecohydrological observatory with a sampling frequency of 5 minutes for net radiation ( $R_n$ ), soil heat flux ( $G$ ), and their components. 5 models of  $R_n$  were evaluated and 2 equations to calculate  $G$ . The results from these models were compared to instrumental observations in two timescales: hourly and daily. Then we evaluated their implication in reference crop evapotranspiration ( $ET_o$ ) calculations using Penman-Monteith equation. Additionally, we did a comparative study between two adjoining twin plots of the components of  $R_n$  and  $G$ . In general, we found that FAO 56 model performs the best in the two timescales, increasing underestimation with increasing timescale. The results of the plots showed variations in albedo 6,015%, net radiation 0,652%, outgoing short wave radiation 6,655%, soil heat flux 66,071%, soil temperature 8,157% and soil moisture 2,315%, these results show that despite the apparent homogeneity of the ground of the plots, there is a difference in the magnitude of  $G$  and  $R_n$ .

**Keywords:** Solar Radiation, Energy, Evapotranspiration, Albedo, Paramo.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	12
Antecedentes .....	12
Selección y justificación .....	13
Objetivos .....	14
General .....	14
Específicos .....	14
1 MARCO TEÓRICO .....	15
1.1 Características eco-sistémicas.....	15
1.2 Transmisión de calor .....	16
1.2.1 Radiación.....	16
1.2.2 Conducción.....	18
1.3 Evapotranspiración.....	19
1.3.1 Evaporación.....	19
1.3.2 Transpiración .....	20
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
2.1 Equipos utilizados .....	21
2.2 Unidades y simbología .....	21
2.3 Modelo de evapotranspiración .....	22
2.3.1 Modelo de evapotranspiración Penman-Monteith a nivel diario ...	22
2.3.2 Modelo de evapotranspiración Penman-Monteith a nivel horario .	22
2.4 Modelos de radiación neta .....	23
2.4.1 Observación ( $R_n$ -OBS) .....	23
2.4.2 Modelo ( $R_n$ -PM).....	24
2.4.3 Modelo ( $R_n$ -SF).....	25
2.4.4 Modelo ( $R_n$ -IR).....	26
2.4.5 Modelo ( $R_n$ -IR2).....	26
2.4.6 Modelo ( $R_n$ -LI) .....	26
2.5 Modelos de flujo de calor en el suelo (G).....	27
2.5.1 Observación (G-OBS).....	27
2.5.2 Estimación (G-PM) .....	28
2.5.3 Modelo (G-WB).....	28
2.6 Procesamiento de la información .....	30



2.6.1	Criterio de eliminación y corrección de datos .....	30
2.6.2	Tamaño de la muestra .....	30
2.6.3	Método de obtención de nuevos datos .....	31
2.7	Análisis de los modelos .....	32
2.8	Criterio de interpretación del desempeño para comparación ente observaciones y modelos.....	32
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	34
3.1	Estudio a nivel diario .....	34
3.1.1	Radiación neta escala diaria.....	34
3.1.2	Flujo de calor escala diaria .....	36
3.1.3	Evapotranspiración escala diaria .....	39
3.2	Estudio a nivel horario.....	42
3.2.1	Radiación neta escala horaria .....	42
3.2.2	Flujo de calor escala horaria.....	44
3.2.3	Evapotranspiración escala horaria.....	47
3.3	Análisis experimental de las parcelas .....	49
3.3.1	Estudio de la radiación neta y el flujo de calor.....	49
3.3.2	Radiación neta y sus componentes .....	50
3.3.3	Flujo de calor en el suelo y sus componentes .....	54
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
4.1	Conclusiones.....	57
4.2	Recomendaciones.....	59
	Referencias .....	60



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estación de Zhurucay.....	15
Figura 2 Componentes de la radiación neta.....	16
Figura 3 Radiómetro neto CNR4 in situ.....	23
Figura 4 Disposición in situ y teórica de platos de flujo y termopilas.....	28
Figura 5 Curva de flujo de calor con valores incorrectos por autocalibración, y procesados.....	32
Figura 6 Correlación entre valores de radiación neta CNR4 y modelos – Escala diaria. ....	35
Figura 7 Función de Wang. ....	36
Figura 8 Correlación entre valores de flujo de calor en el suelo HRP01SC y modelos – Escala diaria. ....	38
Figura 9 Correlación entre valores calculados de evapotranspiración con valores de $R_n$ y $G$ observados y calculados a partir de los modelos – Escala diaria. ....	40
Figura 10 Comportamiento de la radiación neta, flujo de calor en el suelo y evapotranspiración – Escala diaria.....	41
Figura 11 Correlación entre valores de radiación neta CNR4 y modelos – Escala horaria. ....	44
Figura 12 Función de Wang. ....	45
Figura 13 Correlación entre valores de flujo de calor en el suelo HRP01SC y modelos – Escala horaria. ....	46
Figura 14 Correlación entre valores de evapotranspiración – Escala horaria. .	48
Figura 15 Comportamiento de la Radiación neta y el Flujo de calor en el suelo en la parcela 1 - 2.....	50
Figura 16 Correlación entre parcelas experimentales, Radiación neta, Albedo y temperatura del aire. ....	50
Figura 17 Comportamiento de radiación neta y sus componentes.....	51
Figura 18 Comportamiento diario del albedo en las parcelas.....	52
Figura 19 Flujos de componentes de radiación – Parcela 1.....	53
Figura 20 Flujos de componentes de radiación – Parcela 2.....	53
Figura 21 Correlación entre parcelas experimentales, Flujo de calor en el suelo, Contenido de agua en el suelo, Temperatura en el suelo. ....	55
Figura 22 Comportamiento del flujo de calor en el suelo y sus componentes..	56



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Regiones del espectro electromagnético de la radiación solar.....	17
Tabla 2 Unidades utilizadas .....	21
Tabla 3 Simbología utilizada .....	21
Tabla 4 Tabla de error absoluto – Ruido flujo de calor en el suelo.....	31
Tabla 5 Interpretación del desempeño .....	33
Tabla 6 Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la radiación neta.....	34
Tabla 7 Errores de los modelos de radiación neta – Escala diaria.....	34
Tabla 8 Ecuaciones utilizadas para el cálculo del flujo de calor en el suelo.....	36
Tabla 9 Errores de los modelos de flujo de calor en el suelo – Escala diaria...	37
Tabla 10 Errores de la evapotranspiración – Escala diaria. ....	39
Tabla 11 Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la radiación neta.....	42
Tabla 12 Errores de los modelos de radiación neta en las 24h – Escala horaria. ....	43
Tabla 13 Errores de los modelos de radiación neta 6am-6pm – Escala horaria. ....	43
Tabla 14 Ecuaciones utilizadas para el cálculo del flujo de calor en el suelo...	45
Tabla 15 Errores de los modelos de flujo de calor en el suelo 24 h – Escala horaria. ....	46
Tabla 16 Errores de los modelos de flujo de calor en el suelo 6am 6pm – Escala horaria. ....	46
Tabla 17 Errores de la evapotranspiración 6AM 6PM – Escala horaria. ....	47
Tabla 18 Porcentaje de flujo de calor en el suelo respecto a la radiación neta.	49
Tabla 19 Albedo en las parcelas experimentales. ....	51
Tabla 20 Errores de la radiación neta, albedo y temperatura ambiente entre parcelas experimentales.....	51
Tabla 21 Comportamiento promedio de los componentes de la radiación neta. ....	52
Tabla 22 Errores del flujo de calor en el suelo, contenido de agua en el suelo y temperatura en el suelo.....	54
Tabla 23 Comportamiento promedio de los componentes del flujo de calor en el suelo.....	55



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Yo, Juan Diego Zúñiga Loja, autor de la tesis "**MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN NETA Y FLUJO DE CALOR EN EL SUELO EN UNA ZONA EXPERIMENTAL DEL PÁRAMO ANDINO**", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Químico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afeción alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, junio del 2015

A handwritten signature in blue ink, reading "Juan D. Zúñiga", written over a horizontal line.

Juan Diego Zúñiga Loja

0105164941



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Yo, Juan Diego Zúñiga Loja, autor de la tesis **"MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN NETA Y FLUJO DE CALOR EN EL SUELO EN UNA ZONA EXPERIMENTAL DEL PÁRAMO ANDINO"**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, junio de 2015

A handwritten signature in blue ink that reads "Juan D. Zúñiga".

Juan Diego Zúñiga Loja

0105164941



*El presente estudio se ha realizado dentro del Proyecto ETAPA-DIUC: “Ciclos Meteorológicos y Evapotranspiración a lo Largo de una Gradiente Altitudinal del Parque Nacional Cajas 2013 – 2017” del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales iDRHiCA de la Universidad de Cuenca.*

*Las bases de datos hidrometeorológicos utilizados en la investigación son de propiedad de la Universidad de Cuenca, iDRHiCA y ETAPA, su uso y publicación externa al presente trabajo están sujetos a las leyes de propiedad intelectual vigentes.*



## **Agradecimiento**

*Un sincero agradecimiento a mi director el Ing. Quím. Galo Carrillo Rojas, M Sc. por sus conocimientos, motivación y confianza para la realización de esta tesis, además debo agradecer al Ing. Mario Córdova Mora por su constante aporte y guía.*

*A la Universidad de Cuenca con su Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales y Centro de Hidrología y Clima, Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (ETAPA EP), Subgerencia de Gestión Ambiental y Administración del Parque Nacional Cajas (PNC), Área de Biosfera Macizo del Cajas y Área Nacional de Recreación Quimsacocha.*

Juan Diego Zúñiga Loja  
Cuenca, junio de 2015

## INTRODUCCIÓN

### Antecedentes

Es importante entender el funcionamiento de los páramos, ya que estos funcionan como almacenador, regulador y fuente natural de agua para millones de habitantes, una ciudad beneficiada de este recurso es Cuenca (Cuesta, et al., 2013). Algunos factores físicos como la radiación solar y calor influyen en los ecosistemas de montaña (Cristóbal, et al., 2009), motivo por el cual en esta tesis se estudió la radiación neta ( $R_n$ ) y flujo de calor en el suelo ( $G$ ), de estos parámetros depende la fotosíntesis, temperatura del ambiente, temperatura del suelo, movimiento del aire y agua en sus diferentes estados y en términos generales la evapotranspiración ( $ET_o$ ) (Llasat & Snyder, 1998; Allen, et al., 2006; Sánchez, et al., 2003) y son componentes que juegan un rol fundamental en la ecuación de balance de energía:

$$R_n = G + \lambda LE + H \quad (1)$$

Donde:  $R_n$  es la radiación neta en la superficie del cultivo,  $G$  el flujo de calor en el suelo,  $\lambda LE$  el calor latente a la atmósfera y  $H$  el calor sensible a la atmósfera.

Existen varias maneras de obtener valores de  $R_n$ ,  $G$  y  $ET_o$ . Se pueden obtener a través de datos satelitales (Samani, et al., 2007), o pueden ser medidos en la superficie mediante sensores especializados (Duffie & Beckman, 2013), la medición instrumental puede ser sumamente costosa, motivo por el cual el uso de estos dispositivos se restringe a trabajos con fines investigativos (Allen, et al., 2006). Por ello se han desarrollado diferentes investigaciones en torno a los procesos naturales aplicando varias metodologías como una alternativa económica, es así que la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés), ha desarrollado un método para el cálculo de la  $R_n$  y  $G$  a partir de datos meteorológicos (incluso para estimar datos meteorológicos en el caso de su ausencia), y posterior cálculo de la  $ET_o$  (Allen, et al., 2006), la  $R_n$  puede ser sobreestimada cuando se calcula a partir de datos satelitales, al comparar estos cálculos obtenidos al estimarla a partir de datos climáticos medidos en la superficie terrestre (Samani, et al., 2007), existen otros estudios que ayudan a calcular la  $R_n$  a partir de diferentes principios físicos como es la ecuación corregida de Stefan-Boltzman (Schirmbeck & Rivas, 2007), o ecuaciones sugeridas por diferentes autores en las cuales las variables de entrada son generalmente la temperatura del aire y la radiación de onda corta entrante (Irmak, et al., 2011; Xu & Singh, 2000).

La investigación realizada por (Córdova, et al., 2013) en el observatorio ecohidrológico de Zhurucay concluye que existe baja confiabilidad al estimar la  $ET_o$  con promedios mensuales de las variables existiendo un error porcentual del 20% respecto a la  $ET_o$  a nivel horaria y un error porcentual del 8% en las



estimación de  $ET_0$  diaria respecto a la  $ET_0$  a nivel horaria, resultando en una sobreestimación que aumenta a medida que aumenta la escala temporal. El trabajo realizado por (Gavilán, et al., 2007) en una región semiárida de España a 110 m.s.n.m. en el cual los autores comparan el método propuesto por la FAO 56, y el Comité de Requerimientos de Agua para Riego de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en inglés) con los valores medidos de  $ET_0$  con un lisímetro, concluyen que el método de la FAO 56 fue siempre menos exacto que la versión de ASCE. Por otra parte cuando la  $ET_0$  no muestra buenos resultados es posible calibrar la ecuación para una mejor respuesta, (Majnooni-Heris, et al., 2013) realizan una calibración de la ecuación propuesta por la FAO 56 debido a que en principio los valores de  $ET_0$  son subestimados hasta en un 24% al ser comparados con los valores medidos por un lisímetro, la calibración fue realizada para una zona a 1567.3 m.s.n.m. en Irán cuyo suelo tiene características franco arenosas.

Existe un nuevo método de cálculo del flujo de calor en el suelo, el mismo que es sometido a comparación con valores exactos, y obtenidos con un método tradicional, resulta que el método propuesto produce una estimación confiable con menos variables de entrada (Wang & Bou-Zeid, 2012).

El modelo de la FAO 56 es el que mejor resultado ha tenido a nivel global, por esta razón se evaluó el comportamiento de este modelo con valores obtenidos con sensores especializados y se comparó además con otros modelos que han presentado buenos resultados en los sitios de estudio de estos.

### **Selección y justificación**

La presente investigación se realizó en el observatorio ecohidrológico de Zhurucay, ubicado a 85 Km al suroeste de la ciudad de Cuenca, con la finalidad de analizar los componentes de radiación neta ( $R_n$ ) y calor en el suelo ( $G$ ) del balance de energía a nivel de la capa límite suelo-atmósfera, y sus implicaciones en la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) en dos parcelas contiguas de suelo andosol del páramo andino, las variables, radiación neta y calor en el suelo son parámetros importantes en el cálculo de la evapotranspiración de referencia (Llasat & Snyder, 1998)

El Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca iDRHiCA dispone de equipos localizados en el observatorio ecohidrológico de Zhurucay, mismos que se suman al equipamiento meteorológico para entender la influencia de diferentes parámetros en procesos de evapotranspiración y procesos fisiológicos como la fotosíntesis. Estos equipos son automáticos con frecuencia de muestreo definido y almacenamiento en dataloggers, dejando de lado los métodos de estimación  $R_n$  y  $G$ . Debido a la falta de estudios más profundos de la  $R_n$  y  $G$  se desconoce la cantidad de energía disponible para llevar a cabo los diferentes procesos físicos, evaporación,



transpiración. Los valores obtenidos pondrán en evidencia zonas de mayor radiación neta y calor en el suelo en el transcurso del día. El estudio de estos parámetros nos ayudara a tener una línea base para estudios posteriores de hidrología y ecohidrología.

## **Objetivos**

### **General**

Analizar los componentes de radiación neta y calor en el suelo, del balance de energía a nivel de la capa limite suelo-atmósfera, y sus implicaciones en la evapotranspiración de referencia en dos parcelas contiguas de suelo andosol del páramo andino, por medio de modelos empíricos y comparativa con mediciones instrumentales.

### **Específicos**

- Procesamiento de información de dos sistemas de medición de flujo de energía solar en suelo andosol (parcelas experimentales contiguas).
- Análisis estadístico y grafico de los componentes de la radiación neta ( $R_n$ ), calor del suelo ( $G$ ), albedo ( $\alpha$ ), temperatura suelo ( $t_s$ ), humedad del suelo ( $h_s$ ) a nivel diario y subdiario para las dos parcelas.
- Estimación de la  $R_n$  y  $G$  basado en modelos empíricos y comparativa con resultados obtenidos en el objetivo 2. Efecto sobre la estimación de  $ET_o$  empleando el modelo de Penman-Monteith.

## 1 MARCO TEÓRICO

### 1.1 Características eco-sistémicas

El presente estudio se realizó en el observatorio ecohidrológico de Zhurucay, ubicado a 85 km al Sur oeste de la ciudad de Cuenca. El sitio de estudio está ubicado en el ecosistema de páramo. El páramo es un ecosistema andino y se encuentra entre los 3500m y 5000 m.s.n.m. (Josse, et al., 2009) el páramo andino tiene una extensión desde Colombia hasta el norte de Perú con pequeñas exenciones en Costa rica y Panamá (Hofstede, et al., 2014), y la zona de estudio está ubicada a 3780m.s.n.m. con características físico-químicas que lo ubican en el tipo de suelo andosol, (suelo oscuro) andosol proviene del japonés an = negro do = suelo con un horizonte andico de 30cm (Álvarez Sánchez & Naranjo García, 2003). Los andosoles se caracteriza por un alto contenido de materia orgánica, una elevada porosidad y su respectiva densidad aparente disminuida, una alta capacidad de retención de agua, así también una alta retención de fosfatos y otros aniones (Verde Vilanova, s.f.), pudiendo formar complejos organo-metálicos, motivo por el cual el suelo puede presentar texturas franco arcillo arenosas, franco arenosas, areno francosa y arenosa (Borja, et al., 2008). Los suelos de tipo andosol contienen principalmente material volcánico, piedra pómez, cenizas y otros materiales de tipo volcánico, visualmente forman ondulaciones montañosas (FAO, 2015). La vegetación está adaptada a temperaturas bajas y radiación intensa, baja presión de aire; las plantas se caracterizan por tener hojas duras y gruesas, de mínimo tamaño para protegerse del frio, con hojas en forma de rosetas para proteger a sus retoños del viento (Aguilar, et al., 2009).



Figura 1 Estación de Zhurucay.  
Fuente: (iDRHiCA)

## 1.2 Transmisión de calor

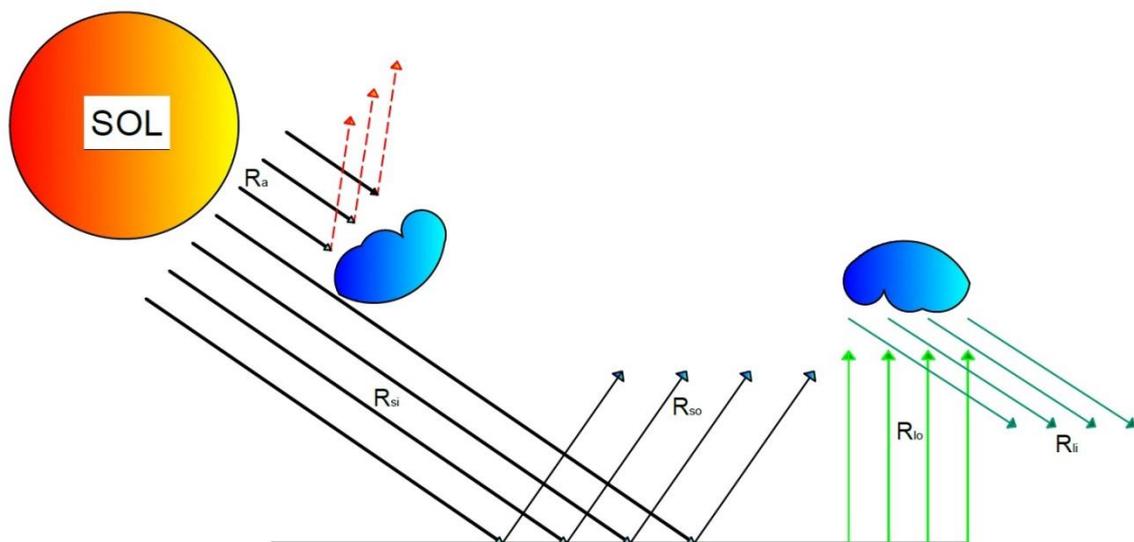
Existen tres formas de transmitir calor: convección, conducción y radiación. En esta tesis se hablara solamente de radiación y conducción.

### 1.2.1 Radiación

Es la transmisión de energía mediante ondas electromagnéticas, si esta se transmite a través del vacío no se convierte en calor, sin embargo al ponerse en contacto con un material la radiación puede ser transmitida, reflejada o absorbida. En el caso de ser absorbida se transforma en calor (Costa López, 1991)

#### 1.2.1.1 Componentes de la radiación neta

Existen cuatro componentes de la radiación neta, que son: radiación entrante de onda corta y larga y radiación saliente de onda corta y larga. (Allen, et al., 2006)



**Figura 2 Componentes de la radiación neta.**  
 Ra: Radiación extraterrestre, Rsi: Radiación entrante de onda corta,  
 Rso: Radiación saliente de onda corta, Rli: Radiación entrante de onda larga,  
 Rlo: Radiación saliente de onda larga.  
 Fuente: (Autor)

##### 1.2.1.1.1 Radiación de onda corta entrante ( $R_{si}$ )

El sol es la fuente de radiación de onda corta, este es una masa gaseosa compuesto básicamente de hidrogeno, con un diámetro de  $1,39E9$  m, y se comporta como un cuerpo negro con una temperatura de  $5777$  K (Duffie & Beckman, 2013). Este cuerpo emite energía radiante, y su distribución espectral



va desde los  $0.3\mu\text{m}$  hasta los  $2.5\mu\text{m}$  (González Velasco, 2009), dentro de esta distribución espectral se pueden distinguir tres regiones:

**Tabla 1 Regiones del espectro electromagnético de la radiación solar.**  
Fuente: (González Velasco, 2009)

Longitud de onda	Región
$< 0.4\mu\text{m}$	Ultravioleta
$0.4\mu\text{m} - 0.7\mu\text{m}$	Visible
$> 0.7\mu\text{m}$	Infrarrojo

#### 1.2.1.1.2 Radiación de onda corta saliente ( $R_{s0}$ )

Una vez que la radiación solar llega a la superficie terrestre, parte de esta es absorbida, y parte es reflejada, esto dependerá únicamente del albedo (condiciones de la vegetación y superficie). Se conoce como albedo a la fracción de radiación de onda corta entrante que es devuelta a la atmosfera (Lal, 2006)

La radiación que es absorbida contribuirá al calentamiento del suelo, y a la evapotranspiración (Lal, 2006).

#### 1.2.1.1.3 Albedo

Es la fracción de radiación que la superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre esta, se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{R_{s0}}{R_{si}} \quad (2)$$

El albedo no es una constante, pues varía dependiendo en que estación del año nos encontremos, del tipo de superficie, ángulo de incidencia solar, o pendiente de la superficie terrestre (Allen, et al., 2006; Matthews, 1984) y es de suma importancia, pues cuando este tiende a cero, toda la radiación está siendo absorbida y por tanto convirtiéndose en calor, que elevará la temperatura en el suelo y favorecerá el proceso de evapotranspiración (Lal, 2006; Schaetzl & Thompson, 2015).

#### 1.2.1.1.4 Radiación de onda larga saliente ( $R_{L0}$ )

Una vez que la fracción de radiación de onda corta ha sido absorbida por la tierra esta se convierte en calor, la tierra al tener temperaturas bajas devolverá esta energía a la atmósfera en forma de radiación de onda larga (Allen, et al., 2006).

#### 1.2.1.1.5 Radiación de onda larga entrante ( $R_{Li}$ )

Parte de la radiación de onda larga es perdida hacia el espacio, y parte de esta es devuelta a la superficie de la tierra, esta radiación que retorna a la tierra por



acción de las nubes se la conoce como radiación de onda larga entrante. (Allen, et al., 2006).

### 1.2.2 Conducción

La conducción de calor tiene lugar en un cuerpo sólido (Esplugas & Chamarro, 2005) desde la superficie hacia la profundidad del suelo, siguiendo la ley de Fourier que menciona:

*“Se produce conducción de calor cuando en las diversas partes de un cuerpo a distinta temperatura la agitación térmica se transmite de molécula a molécula hasta la unificación de aquella.”*

En el caso del suelo, a la cantidad de energía que pasa a través de un área de suelo en una unidad de tiempo se la conoce como flujo de calor en el suelo y se calcula con la ecuación de Fourier:

$$G = \lambda \frac{dT_s}{dz} \quad (3)$$

Donde  $\lambda$  es la conductividad térmica,  $T_s$  es la temperatura en el suelo, y  $z$  es la profundidad.

Este calor puede: calentar el suelo, ser radiada de nuevo a la atmosfera (longitud de onda larga), ser conducido a la profundidad del suelo, ser usado para evaporar el agua y derretir partículas de hielo (Schaetzl & Thompson, 2015). El flujo de calor a través de este medio dependerá en principio de la distribución suelo-agua-aire, el contenido de humedad en el suelo, textura, propiedades térmicas, porosidad (Schaetzl & Thompson, 2015).

#### 1.2.2.1 Importancia de los componentes del suelo

Afecta de manera directa a la diferencia de temperatura en los horizontes del suelo y la capacidad de transmitir calor en el suelo (Casanova, 2005). El agua al tener un calor específico elevado ( $4,18 \text{ kJ Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) será el componente encargado de que las fluctuaciones de la temperatura no sean muy severas, ya que la pérdida o ganancia de una gran cantidad de energía se verá reflejado en un pequeño cambio de la temperatura, por otro lado, el aire tiene un bajo calor específico ( $0,7 \text{ kJ Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) y al contrario que el agua, este con una pequeña ganancia o pérdida de energía tendrá un importante cambio en la temperatura, por lo tanto un suelo húmedo se calentará y enfriará más lentamente que un suelo seco. La materia orgánica tiene un calor específico intermedio entre los minerales y el agua (Schaetzl & Thompson, 2015),



### 1.2.2.1.1 Importancia de las propiedades térmicas

Las propiedades térmicas tienen relación directa con los componentes del suelo, y variará en función de estos. El contenido de agua tiene un efecto significativo sobre variables como: la conductividad térmica, capacidad calorífica, difusividad térmica y la admisión térmica (Schaetzl & Thompson, 2015).

La temperatura es una variable importante en el estudio de los suelos ya que de esta dependerán los procesos biológicos y de microorganismos que descompondrán la materia orgánica para convertirla en CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, la actividad de las raíces, y la estabilidad de los suelos especialmente en regiones frías (Olalla Mañas, 2005).

### 1.2.2.1.2 Importancia de la densidad aparente y porosidad

Aproximadamente el 50% del volumen de los suelos es material poroso (Raven, et al., 1992), la porosidad afecta la penetración de las raíces y la circulación de agua (Olalla Mañas, 2005), Además un incremento en la densidad seca del suelo y su respectiva disminución de porosidad conduce a un aumento en la conductividad térmica debido a que existe más materia sólida, menos poros de aire o agua por unidad de volumen, y una mejor transferencia de calor (Farouki, 1981)

Por otro lado la porosidad afecta a la difusividad térmica que es el cociente entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica, un aumento en la densidad provoca un aumento en la difusividad térmica, pero no en la proporción con la conductividad térmica (Farouki, 1981).

## 1.3 Evapotranspiración

El proceso de evapotranspiración es la conjugación de dos conceptos en los cuales existe una pérdida de agua, por un lado hay una pérdida de agua en el suelo llamado evaporación y una pérdida de agua a través de las plantas llamado transpiración (Allen, et al., 2006).

### 1.3.1 Evaporación

El agua cambia de fase líquida a fase de vapor mediante la vaporización, y la energía disponible que hace posible este proceso principalmente es la radiación de onda corta proveniente del sol, y la temperatura ambiental.

*“La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de la superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua en la atmósfera circundante”. Con el paso del tiempo este aire circundante se va saturando hasta que el proceso de transferencia se*



vuelve tan lento que finalmente se anula, para la reactivación del proceso la velocidad del viento influirá de manera importante en vista de que el aire saturado será intercambiado por aire insaturado. La evaporación dependerá de la radiación de onda corta proveniente del sol, temperatura del ambiente, humedad atmosférica, y velocidad del viento (Allen, et al., 2006).

### **1.3.2 Transpiración**

Consiste en la vaporización del agua líquida que está contenida en las plantas, el agua será eliminada a través de los estomas de la planta. Los estomas son aberturas superficiales en las hojas, que permite la salida de vapor de agua, y otros gases. Gran parte del agua absorbida por las raíces será eliminada por transpiración, y el remanente formara parte de la estructura de la planta. Al igual que la evaporación, la transpiración es posible gracias a la radiación de onda corta proveniente del sol, humedad atmosférica, temperatura ambiental, velocidad del viento. El contenido de agua en el suelo, la capacidad de conducir agua y la salinidad, además de las características del cultivo son parámetros también a tomar en cuenta (Allen, et al., 2006).

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Equipos utilizados

Los equipos que se utilizaron en esta investigación son los siguientes:

Velocidad del viento: Anemómetro Met One 034B–Campbell Scientific.

Radiación y sus componentes: Radiómetro neto CNR4–Campbell Scientific.

Flujo de calor en el suelo: Platos de flujo HFP01SC-Campbell Scientific.

Contenido de agua: Reflectómetro CS616-Campbell Scientific.

Temperatura y humedad relativa: CS215-Campbell Scientific.

### 2.2 Unidades y simbología

Las unidades que se consideran en este estudio son las recomendadas por el libro de la FAO 56.

**Tabla 2 Unidades utilizadas**

Fuente: (Allen, et al., 2006)

Parámetro	Unidad
Evapotranspiración	mm día <sup>-1</sup>
Radiación neta	MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>
Flujo de calor en el suelo	MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>

Los valores serán identificados por  $R_n$  (radiación neta),  $G$  (flujo de calor en el suelo), seguido de la palabra OBS y las iniciales del modelo utilizado para los valores observados y calculados respectivamente.

**Tabla 3 Simbología utilizada**

Fuente: (Autor)

Parámetro	Símbolo	Ecuación utilizada
Radiación neta	$R_n$ -OBS	Observaciones Radiómetro CNR4
	$R_n$ -PM	Penman-Monteith
	$R_n$ -SF	Corregida de Stefan-Boltzman
	$R_n$ -IR	Irmak
	$R_n$ -IR2	Irmak 2
	$R_n$ -LI	Linsley
Flujo de calor en el suelo	G-OBS	Observaciones Platos de Flujo HFP01SC
	G-PM	Penman-Monteith
	G-WB	Wang-Bou

## 2.3 Modelo de evapotranspiración

El método de Penman-Monteith, es el único método recomendado a nivel global, para el cálculo de la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos. (Allen, et al., 2006). Para nuestra latitud (cerca de la zona ecuatorial) es recomendable trabajar con datos registrados de 6am a 6pm.

### 2.3.1 Modelo de evapotranspiración Penman-Monteith a nivel diario

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia a nivel diario se deberán utilizar los promedios diarios de los siguientes parámetros: temperatura del aire y velocidad del viento.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

Donde

$ET_0$	Evapotranspiración de referencia	[mm día <sup>-1</sup> ]
$R_n$	Radiación neta en la superficie del cultivo	[MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$G$	Flujo de calor de suelo	[MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	Constante psicrométrica	[kPa °C <sup>-1</sup> ]
$T$	Temperatura media del aire a 2m de altura	[°C]
$u_2$	Velocidad del viento a 2m de altura	[m s <sup>-1</sup> ]
$e_a$	Presión de vapor de saturación	[kPa]
$e_s$	Presión real de vapor	[kPa]
$\Delta$	Pendiente de la curva de presión de vapor	[kPa °C <sup>-1</sup> ]

### 2.3.2 Modelo de evapotranspiración Penman-Monteith a nivel horario

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia a nivel horario se deberán utilizar los promedios horarios de los siguientes parámetros: temperatura del aire y velocidad del viento.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^0(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5)$$

Donde

	$ET_0$	Evapotranspiración de referencia	[mm hora <sup>-1</sup> ]
	$R_n$	Radiación neta en la superficie del cultivo	[MJ m <sup>-2</sup> hora <sup>-1</sup> ]
1]			
	$G$	Flujo de calor de suelo	[MJ m <sup>-2</sup> hora <sup>-1</sup> ]
1]			
	$\gamma$	Constante psicrométrica	[kPa °C <sup>-1</sup> ]
	$T_{hr}$	Temperatura media del aire a 2m de altura	[°C]
	$u_2$	Velocidad del viento a 2m de altura	[m s <sup>-1</sup> ]
	$e^0(T_{hr})$	Presión de vapor de saturación	[kPa]
	$e_a$	Presión real de vapor	[kPa]
	$\Delta$	Pendiente de la curva de presión de vapor	[kPa °C <sup>-1</sup> ]

## 2.4 Modelos de radiación neta

La radiación neta será obtenida basándonos en cinco modelos empíricos y una observación directa, para un fácil entendimiento se asignara una letra y un número a la observación y modelos.

### 2.4.1 Observación (R<sub>n</sub>-OBS)

La radiación neta fue obtenida a partir de datos medidos cada 5 minutos por el radiómetro neto CNR4 – Campbell Scientific que tiene un radio de cobertura de 12m. El radiómetro neto está compuesto por dos piranómetros y dos pirgeómetros.



Figura 3 Radiómetro neto CNR4 in situ.  
Fuente: (iDRHiCA)

Los piranómetros medirán la radiación solar de onda corta. El primer piranómetro tiene su cara hacia arriba que medirá la radiación de onda corta entrante, y un segundo piranómetro con la cara hacia abajo que medirá la radiación de onda

corta saliente. Estos dos parámetros nos ayudaran a calcular la radiación de onda corta neta:

$$R_{ns} = R_{si} - R_{so} \quad (6)$$

Donde

$R_{ns}$	Radiación neta de onda corta	$[W\ m^{-2}]$
$R_{si}$	Radiación de onda corta entrante	$[W\ m^{-2}]$
$R_{so}$	Radiación de onda corta saliente	$[W\ m^{-2}]$

Los pirgeómetros medirán la radiación de onda larga. El primer pirgeómetro tiene su cara dirigida hacia arriba que medirá la radiación de onda larga entrante, y un segundo pirgeómetro con la cara hacia abajo que medirá la radiación de onda larga saliente. Estos dos valores nos ayudaran a calcular la radiación de onda larga neta:

$$R_{nl} = R_{li} - R_{lo} \quad (7)$$

Donde

$R_{nl}$	Radiación neta de onda larga	$[W\ m^{-2}]$
$R_{li}$	Radiación de onda larga entrante	$[W\ m^{-2}]$
$R_{lo}$	Radiación de onda larga saliente	$[W\ m^{-2}]$

Los valores de  $R_{ns}$  y  $R_{nl}$  nos permiten calcular el valor de  $R_n$  como sigue:

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (8)$$

$$R_n = (R_{si} - R_{so}) + (R_{li} - R_{lo}) \quad (9)$$

Los valores registrados de  $R_n$  deberán ser promediados en las dos escalas de tiempo, horaria y diaria, y se deberá hacer la respectiva conversión de unidades.

#### 2.4.2 Modelo ( $R_n$ -PM)

El modelo empírico de Penman-Monteith descrito en el libro de FAO 56 será usado para la determinación de la  $R_n$  (Allen, et al., 2006).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (10)$$

Cálculo de la radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ )

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

Donde

$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman	[MJ K <sup>-4</sup> m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$T_{\max,K}$	Temperatura máxima absoluta	[K]
$T_{\min,K}$	Temperatura mínima absoluta	[K]
$e_a$	Presión de vapor real	[kPa]
$\frac{R_s}{R_{s0}}$	Relación relativa de onda corta	[adimensional]
$R_s$	Radiación solar	[MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$R_{s0}$	Radiación solar en un día despejado	[MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]

Cálculo de la radiación neta de onda corta ( $R_{ns}$ )

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (11)$$

Donde

$\alpha$	Albedo	
$R_s$	Radiación solar entrante	[MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]

### 2.4.3 Modelo ( $R_n$ -SF)

Este método se basa en la ecuación descrita por Stefan-Boltzman según (Schirmbeck & Rivas, 2007).

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + \varepsilon_{ls}\varepsilon_a\sigma T_a^4 - \varepsilon_{ls}\sigma T_s^4 \quad (12)$$

Donde

$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman	[MJ K <sup>-4</sup> m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	Albedo	[adimensional]
$\varepsilon_{ls}$	Emisividad de la superficie	[adimensional]
$\varepsilon_a$	Emisividad del aire	[adimensional]
$T_a$	Temperatura del aire	[K]
$T_s$	Temperatura de la superficie	[K]

Cálculo de la emisividad de la superficie  $\varepsilon_{ls}$

$$\varepsilon_{ls} = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s(1 - P_v) \quad (13)$$

Donde

$\varepsilon_v$	Emisividad de la vegetación	[adimensional]
$P_v = 1$	Porcentaje de vegetación	[adimensional]
$\varepsilon_s$	Emisividad del suelo	[adimensional]

$$\varepsilon_{1s} = \varepsilon_v = 0,99$$

Cálculo de la emisividad del aire  $\varepsilon_a$

$$\varepsilon_a = 0,92 \times 10^{-5} T_a^2 \quad (14)$$

La ecuación se reduce a:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + 0,99\varepsilon_a\sigma T_a^4 - 0,99\sigma T_s^4 \quad (15)$$

#### 2.4.4 Modelo (R<sub>n</sub>-IR)

Una ecuación desarrollada a partir de una regresión lineal  $R_n=f(R_s)$  (Irmak, et al., 2011) sugieren que:

$$R_n = 0.61R_s - 1 \quad (16)$$

Donde

$R_s$  Radiación de onda corta entrante [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]

#### 2.4.5 Modelo (R<sub>n</sub>-IR<sup>2</sup>)

(Irmak, et al., 2011) Sugieren también que:

$$R_n = -0.054T_{\max} + 0.111T_{\min} + 0.462R_s - 0.49243d_r + 50.831 \quad (17)$$

Donde

$R_s$  Radiación de onda corta entrante [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]  
 $T_{\max}$  Temperatura del aire máxima registrada [°C]  
 $T_{\min}$  Temperatura del aire mínima registrada [°C]  
 $d_r$  Distancia relativa inversa tierra-sol

#### 2.4.6 Modelo (R<sub>n</sub>-LI)

Se usará el método propuesto por Linsley 1982 descrito por (Xu & Singh, 2000)

$$R_n = 7.14 \times 10^{-3} R_s + 5.23 \times 10^{-6} R_s (T + 17.8)^{1.87} - 3.94 \times 10^{-6} R_s^2 - 2.39 \times 10^{-9} R_s^2 (T - 7.2)^2 - 1.02 \quad (18)$$

Donde

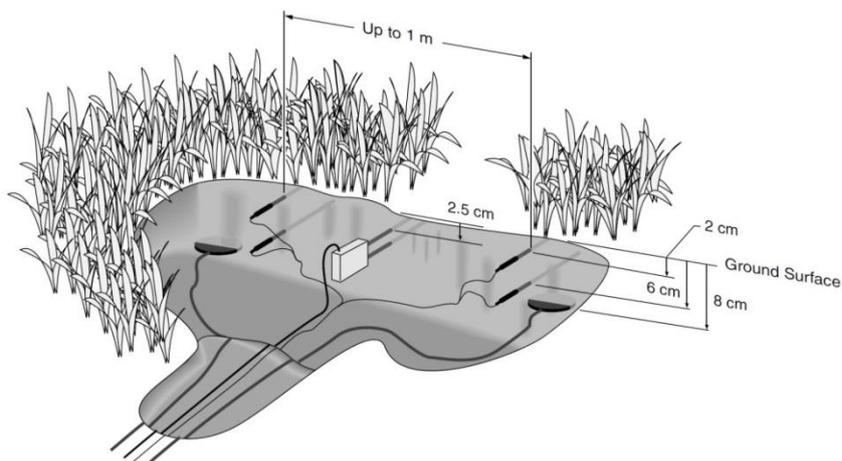
$R_n$	Radiación neta	[cal cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$R_s$	Radiación de onda corta entrante	[cal cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$T$	Temperatura media del aire	[°C]

## 2.5 Modelos de flujo de calor en el suelo (G)

El flujo de calor en el suelo será calculado a partir de modelos empíricos matemáticos, y una medición directa.

### 2.5.1 Observación (G-OBS)

El plato que mide el flujo de calor en el suelo HFP01SC - Campbell Scientific consiste de una termopila y un calentador de película. La termopila mide los gradientes de temperatura alrededor del plato, mientras que durante la calibración el calentador de película es usado para generar un flujo de calor alrededor del plato. La cantidad de energía utilizada para generar la calibración del flujo de calor es medida por un datalogger. Cada plato es calibrado individualmente, y mide el flujo de calor en el suelo a una profundidad de ocho centímetros que es lo que recomienda el manual del equipo. Estos datos registrados fueron tomados como referencia.



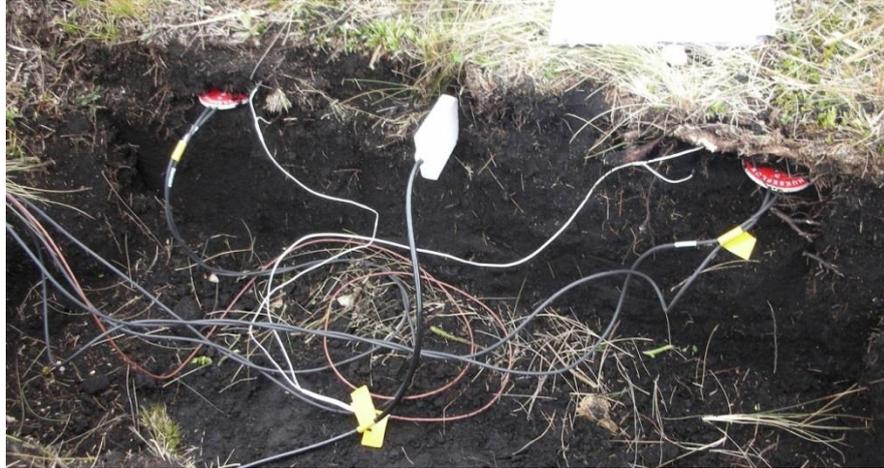


Figura 4 Disposición in situ y teórica de platos de flujo y termopilas.  
Fuente: (Manual HFP01SC-iDRHiCA)

### 2.5.2 Estimación (G-PM)

El libro de la FAO 56 (Allen, et al., 2006) sugiere que el flujo de calor en periodos horarios es una fracción del 10% y 50% del valor de radiación neta para el día y la noche respectivamente.

$$G_{dá} = 0.1R_n \quad (19)$$

$$G_{noche} = 0.5R_n \quad (20)$$

Mientras que para periodos diarios este valor tiende a cero.

$$G \approx 0 \quad (21)$$

### 2.5.3 Modelo (G-WB)

El método propuesto por (Wang & Bou-Zeid, 2012) en el cual no es necesario medir la temperatura a diferentes profundidades se expresa de la siguiente manera:

$$G_z(t) = Ae^{\left(-z\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right)} \sin\left(\omega t + \varepsilon - z\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) - \frac{2A\kappa}{\pi} \int_0^\infty \frac{(\kappa\xi^2 \sin \varepsilon - \omega \cos \varepsilon) \cos \xi z}{\omega^2 + \kappa^2 \xi^4} e^{(-\kappa\xi^2 t)} \cdot d\xi \quad (22)$$

Donde

A	Amplitud de la onda de flujo de calor diaria	[W m <sup>-2</sup> ]
z	Profundidad	[m]



$\omega$	Velocidad angular de rotación de la tierra	[rad h <sup>-1</sup> ]
$\kappa$	Difusividad térmica	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$t$	Tiempo	[h]
$\varepsilon$	Retardo de paso de onda [adimensional]	
$\xi$	Variable de integración	

Cálculo de la velocidad angular de rotación de la tierra ( $\omega$ )

$$\omega = \frac{2\pi}{24}$$

Cálculo de la retardo de paso de onda ( $\varepsilon$ )

$$\varepsilon = -\frac{\pi}{2}$$

Cálculo de la difusividad térmica ( $\kappa$ )

$$\kappa = \frac{\lambda}{C_v} \quad (23)$$

Donde

$\lambda$	Conductividad térmica	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$C_v$	Capacidad calorífica volumétrica	[J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]

Cálculo de la conductividad térmica ( $\lambda$ )

Para este cálculo se usará el modelo de kersten 1949 (Farouki, 1981), cuya ecuación corresponde a suelos con una temperatura es mayor a +4 °C.

$$\lambda = 0.1442(0.9 \log \theta - 0.2)10^{0.6243\delta_d} \quad (24)$$

Donde

$\lambda$	Conductividad térmica	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\delta_d$	Densidad del suelo seco	[g cm <sup>-3</sup> ]
$\theta$	Humedad del suelo	[%]

Cálculo de la capacidad calorífica volumétrica ( $C_v$ )

$$C_v = \frac{2.01 \times 10^6 \delta_b}{2.65} + 4.19 \times 10^6 \theta \quad (25)$$

Donde

$\delta_b$	Densidad aparente	[Mg m <sup>-3</sup> ]
$\theta$	Contenido volumétrico de agua	[m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]



## 2.6 Procesamiento de la información

Los modelos se analizaron en la herramienta informática Excel, como primer paso se trataron los valores incorrectos debido al proceso de autocalibración que se observaron en la compilación de los datos del flujo de calor en el suelo, con el método de mínimos cuadrados aplicados a una ecuación polinómica de segundo grado.

### 2.6.1 Criterio de eliminación y corrección de datos

Para la eliminación de datos influenciados por la autocorrección, se utilizó una regresión polinómica de segundo grado obteniendo coeficientes de correlación entre 0,97 y 0,99; posteriormente se obtuvieron los nuevos datos ajustados a la curva, y se los graficó.

En vista que el número de datos es masivo se utilizó la función aleatoria en Excel, tomando en cuenta que:

Los datos compilados por cada plato son:

$$\text{Datos compilados} = \frac{1440\text{min}}{\text{día}} * \frac{1\text{dato}}{5\text{min}} * 153 = 44064$$

Teniendo una frecuencia de 3 horas de calibración:

$$\text{Datos compilados en tres horas} = 180\text{min} * \frac{1\text{dato}}{5\text{min}} = 36$$

$$\text{Grupo de datos} = \frac{44064}{36} = 1124$$

Se tiene que corregir 1124 grupo de datos, para este propósito se analizó una muestra que sea representativa y se corrigió, y posteriormente replicar en todos los datos.

### 2.6.2 Tamaño de la muestra

Para un error estándar de 0,05 y un nivel de confianza del 90% se obtiene que:

$$N = 35$$

Se analizaron en 35 grupos de datos de forma aleatoria con la ayuda de la función aleatoria de Excel, obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 4** Tabla de error absoluto – Ruido flujo de calor en el suelo.  
Fuente: (Autor)

N° Dato	Error absoluto	Diferencia
1	32614,384	
2	456,984	32157,400
3	134,959	322,023
4	90,051	44,909
5	41,368	48,683
6	31,300	10,067
7	26,160	5,140
8	19,777	6,384
9	18,966	0,811
10	16,566	2,401
11	13,153	3,413
12	21,712	-8,560

La tabla 4 muestra que es necesario eliminar 11 datos después de la calibración para que el error absoluto promedio no exceda el 15% aplicados a una ecuación de segundo grado.

### 2.6.3 Método de obtención de nuevos datos

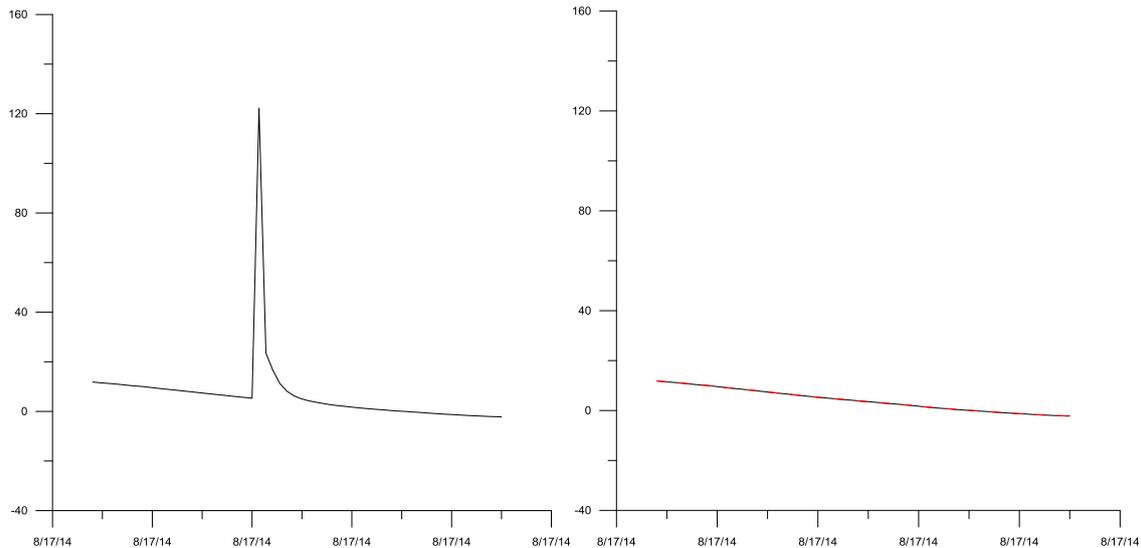
Se utilizó la interpolación de LaGrange formando un polinomio de tercer grado cuya fórmula es:

$$g(x) = \sum_{i=1}^{n+1} U_i(x)y_i \quad (26)$$

Donde

$$U_i(x) = \frac{U_i(x)}{U_i(x_i)} = \prod_{j=1, j \neq i}^{n+1} \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)} \quad (27)$$

A continuación se presenta un gráfico antes y después de procesar la información:



**Figura 5 Curva de flujo de calor con valores incorrectos por autocalibración, y procesados.**  
Fuente: (Autor)

## 2.7 Análisis de los modelos

Los modelos se evaluaron con el error cuadrático medio RMSE (root mean square error), error medio de sesgo MBE (mean bias error), y coeficiente de correlación  $R^2$ , se los calcula de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (28)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (29)$$

Donde

- $Y_i$  Valor observado
- $X_i$  Valor calculado por modelos
- $n$  Número de datos

Las unidades dependen de la variable que se analice.

## 2.8 Criterio de interpretación del desempeño para comparación ente observaciones y modelos

Se evaluara la estimación de los modelos estudiados, el signo positivo nos indica una sobreestimación, mientras que el signo negativo nos indica una subestimación.

**Tabla 5 Interpretación del desempeño**  
**Fuente: (Autor)**

<b>Estimación</b>	<b>Desempeño</b>
< 5	Excelente
5 – 10	Muy bueno
10 - 15	Bueno
15 – 20	Razonable
> 20	Pésimo

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Estudio a nivel diario

##### 3.1.1 Radiación neta escala diaria

Se tomó como referencia la radiación neta medida con los radiómetros netos CNR4, y se comparó con los 5 modelos diferentes.

Tabla 6 Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la radiación neta.  
Fuente: (Autor)

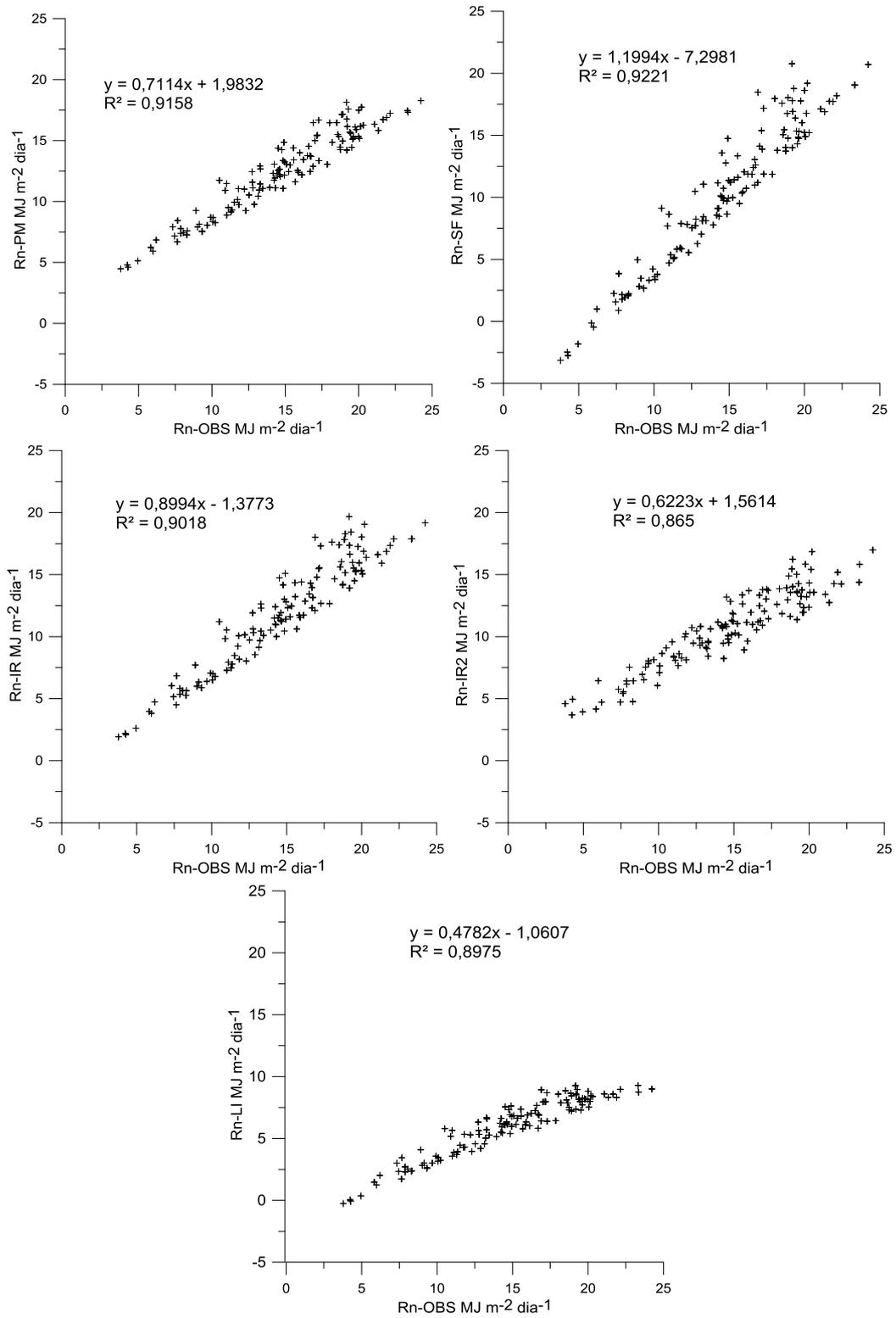
	Ecuación utilizada
R-OBS	Observaciones Radiómetro CNR4
R-PM	$R_n = R_{ns} - R_{nl}$
R-SF	$R_n = (1 - \alpha)R_s + \epsilon_{ls}\epsilon_a\sigma T_a^4 - \epsilon_{ls}\sigma T_s^4$
R-IR	$R_n = 0.61R_s - 1$
R-IR2	$R_n = -0.054T_{max} + 0.111T_{min} + 0.462R_s - 0.49243d_r + 50.831$
R-LI	$R_n = 7.14 \times 10^{-3}R_s + 5.23 \times 10^{-6}R_s(T + 17.8)^{1.87} - 3.94 \times 10^{-6}R_s^2 - 2.39 \times 10^{-9}R_s^2(T - 7.2)^2 - 1.02$

Los resultados son los siguientes:

Tabla 7 Errores de los modelos de radiación neta – Escala diaria.  
Fuente: (Autor)

	MBE MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	RMSE MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	R1/Ri	Estimación %	Desempeño
R-PM	2,240	2,782	0,915	0,866	-13,6	Bueno
R-SF	4,382	4,752	0,922	0,621	-37,9	Pésimo
R-IR	2,850	3,191	0,901	0,789	-21,1	Pésimo
R-IR2	3,964	4,470	0,865	0,744	-25,6	Pésimo
R-LI	8,694	9,048	0,897	0,389	-61,6	Pésimo

En la tabla 7 se muestran la correlación que existe entre los modelos y las observaciones registradas por los radiómetros netos. Se encontró que existe una subestimación en todos los casos, siendo el modelo propuesto por la FAO 56 (Allen, et al., 2006) el que menor error produjo una subestimación del 13,6%, seguido por el modelo R<sub>n</sub>-IR genera una subestimación del 21,1%, seguidamente con un comportamiento aun aceptable el modelo R<sub>n</sub>-IR2 con una subestimación del 25,6%, finalmente los modelos R<sub>n</sub>-SF y R<sub>n</sub>-LI subestiman más del 30%. En un análisis comparativo en un gráfico de dispersión se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 6** Correlación entre valores de radiación neta CNR4 y modelos – Escala diaria.  
Fuente: (Autor)



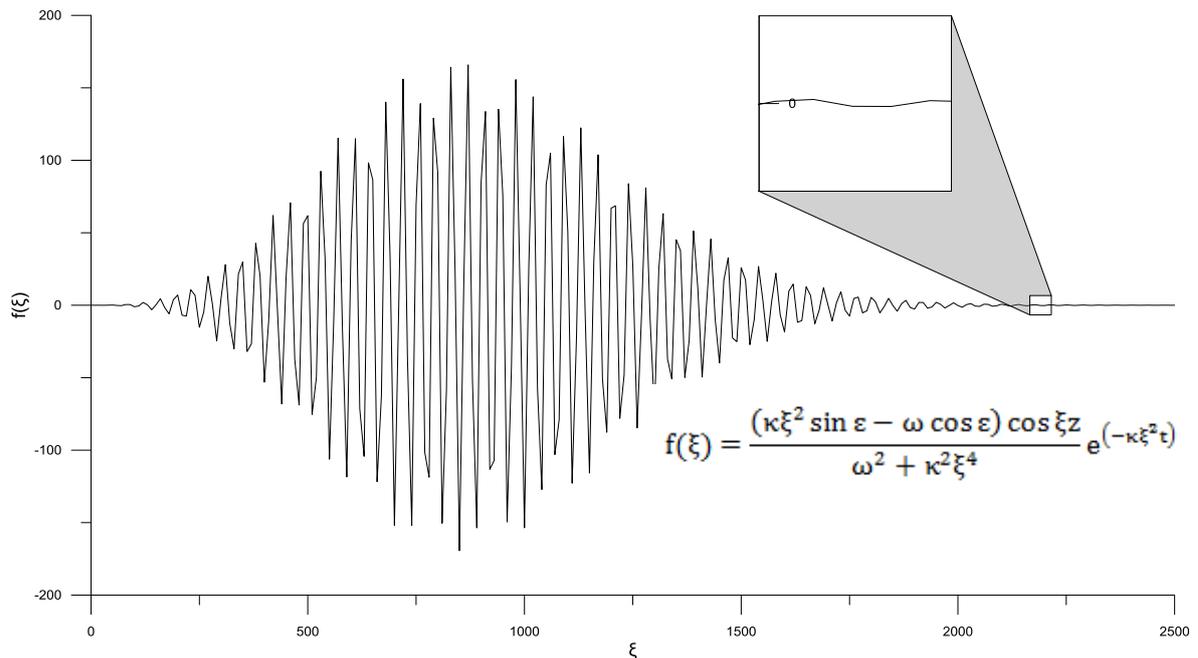
### 3.1.2 Flujo de calor escala diaria

Para el estudio se consideraron 2 modelos de flujo de calor en el suelo y una observación.

**Tabla 8 Ecuaciones utilizadas para el cálculo del flujo de calor en el suelo.**  
Fuente: (Autor)

<b>Ecuación utilizada</b>	
G-OBS	Observaciones Platos de flujo HFP01SC
G-PM	$G \approx 0$
G-WB	$G_z(t) = Ae^{\left(-z\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right)} \sin\left(\omega t + \varepsilon - z\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) - \frac{2A\kappa}{\pi} \int_0^\infty \frac{(\kappa\xi^2 \sin \varepsilon - \omega \cos \varepsilon) \cos \xi z}{\omega^2 + \kappa^2 \xi^4} e^{(-\kappa\xi^2 t)} . d\xi$

La ecuación propuesta por (Wang & Bou-Zeid, 2012) del modelo G-WB tiene un límite superior infinito, y para su solución se graficó la función para tener una idea clara de su comportamiento resultando:



**Figura 7 Función de Wang.**  
Fuente: (Autor)



Los resultados son los siguientes:

**Tabla 9 Errores de los modelos de flujo de calor en el suelo – Escala diaria.**  
Fuente: (Autor)

	<b>MBE</b> <b>MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup></b>	<b>RMSE</b> <b>MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>G1/ Gi</b>	<b>Estimación</b> <b>%</b>	<b>Desempeño</b>
G-PM	0,031	0,235	0	0,00	-100	Pésimo
G-WB	0,031	0,235	0,345	0,00	-100	Pésimo

En la tabla 9 se muestran la correlación que existe entre los modelos y las observaciones registradas por los platos de flujo.

En los 2 casos existe una subestimación del 100%, ya que los valores de los modelos tienden a cero, si los comparamos con los valores máximos y mínimos registrados por los platos de flujo fueron 0,4879 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> y -0,5498 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> respectivamente, de esta manera se comprueba lo que dice el libro de la FAO 56 (Allen, et al., 2006) que el flujo de calor a nivel diario tiende a cero.

Haciendo gráficos de dispersión se obtuvo lo siguiente:

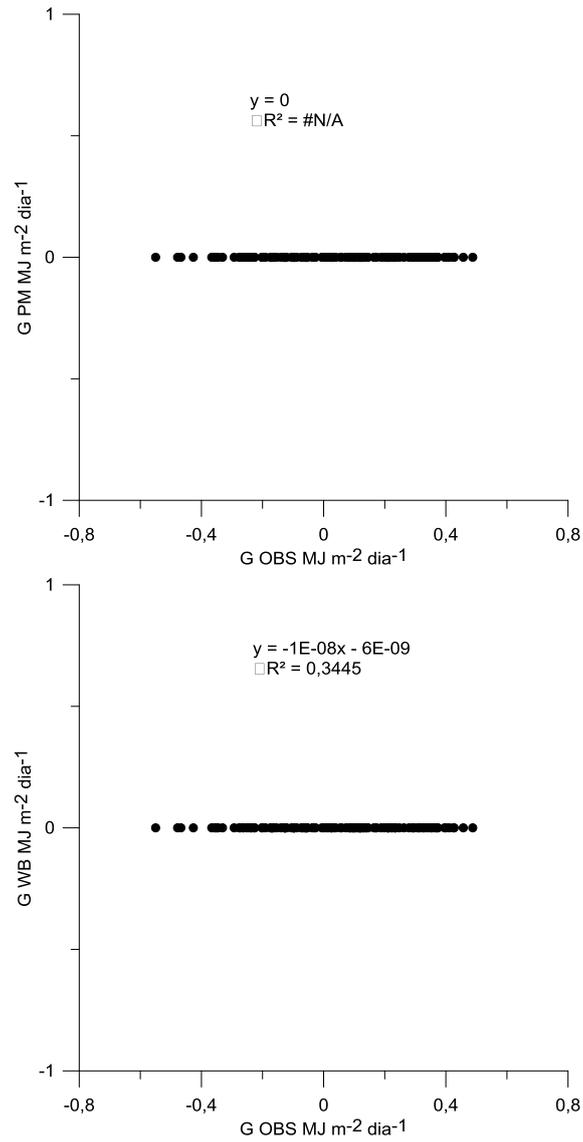


Figura 8 Correlación entre valores de flujo de calor en el suelo HRP01SC y modelos – Escala diaria.  
Fuente: (Autor)

### 3.1.3 Evapotranspiración escala diaria

$ET_o$  ( $R_n$ -OBS, G-OBS) es la evapotranspiración de referencia calculada con valores de  $R_n$  y G observados y es la que se tomó como referencia.

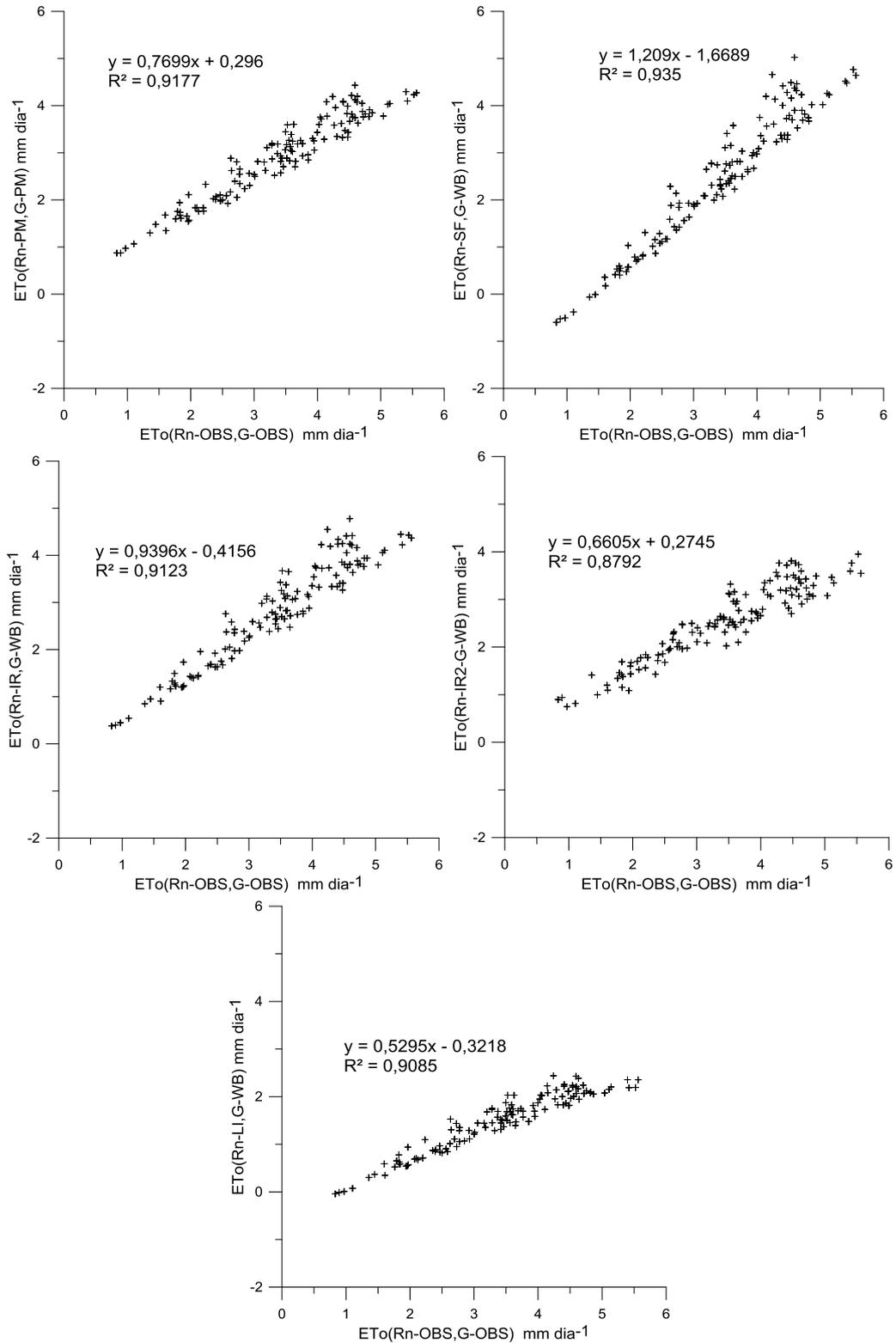
En este caso también se observa que la  $ET_o$  calculada a partir de modelos de  $R_n$  y G produce una subestimación respecto a la  $ET_o$  calculada a partir de los valores observados.

Tabla 10 Errores de la evapotranspiración – Escala diaria.

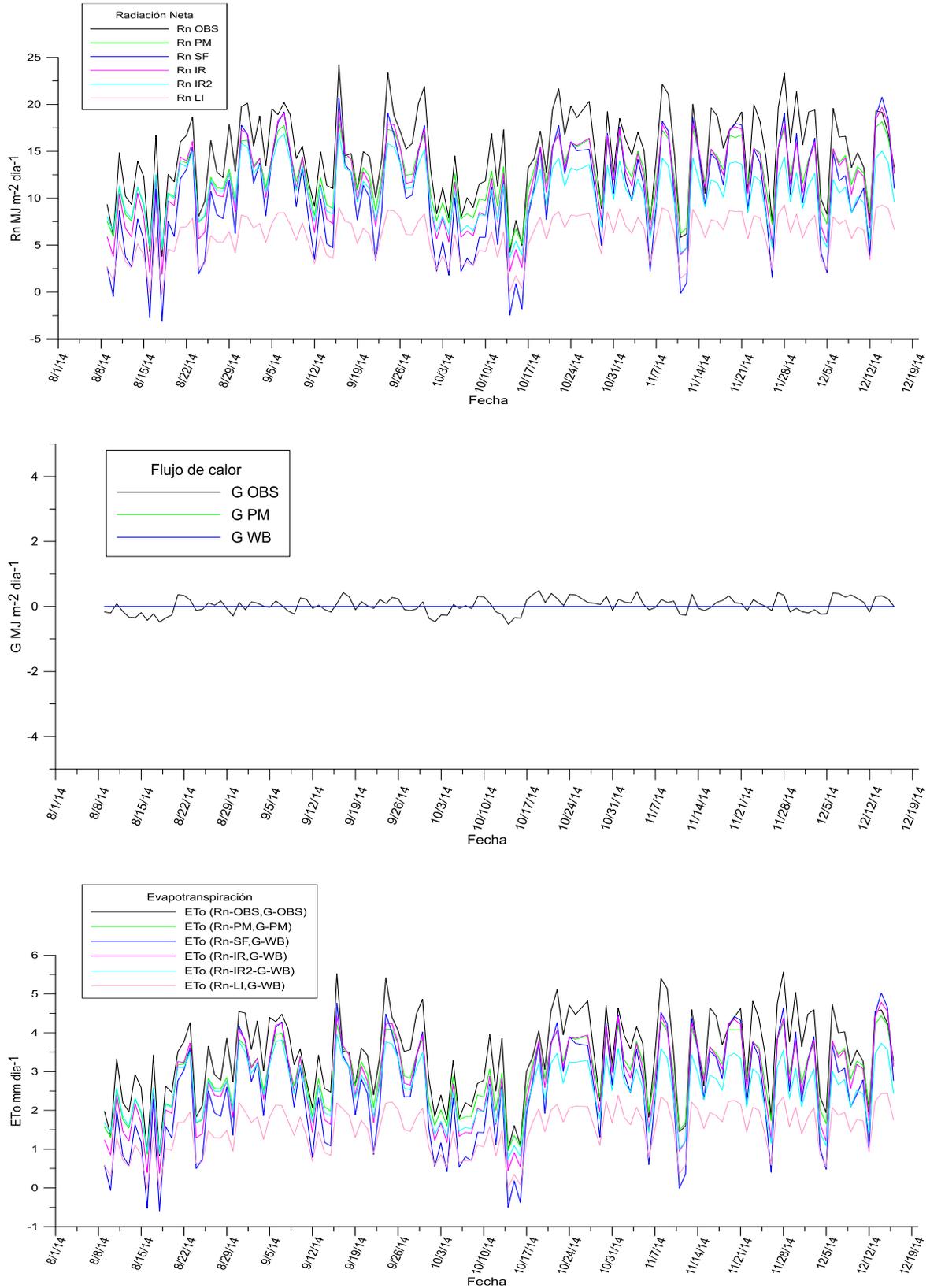
Fuente: (Autor)

	MBE	RMSE	R <sup>2</sup>	$ET_o(R_1 G_1) / ET_o(R_i G_i)$	Estimación %	Desempeño
$ET_o$ ( $R_n$ -PM, G-PM)	0,489	0,605	0,917	0,869	-13,1	Bueno
$ET_o$ ( $R_n$ -SF, G-WB)	0,956	1,044	0,935	0,638	-36,2	Pésimo
$ET_o$ ( $R_n$ -IR, G-WB)	0,622	0,702	0,912	0,795	-20,5	Pésimo
$ET_o$ ( $R_n$ -IR2, G-WB)	0,883	0,995	0,879	0,752	-24,8	Pésimo
$ET_o$ ( $R_n$ -LI, G-WB)	1,926	2,003	0,908	0,415	-58,5	Pésimo

Comparando los resultados de la evapotranspiración en un gráfico de dispersión se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 9** Correlación entre valores calculados de evapotranspiración con valores de R<sub>n</sub> y G observados y calculados a partir de los modelos – Escala diaria. Fuente: (Autor)



**Figura 10 Comportamiento de la radiación neta, flujo de calor en el suelo y evapotranspiración – Escala diaria Fuente: (Autor)**



La figura 10 muestra que la  $R_n$  es el valor más influyente en el cálculo de la  $ET_o$ , ya que el flujo de calor tiende a cero, en este caso también existe una subestimación por parte de todos los modelos respecto a  $ET_o(R_n-OBS, G-OBS)$  que es la evapotranspiración de referencia calculada con valores de  $R_n$  y  $G$  observados, obteniendo un mejor resultado cuando se utiliza los valores de  $R_n-PM$  y  $G-PM$  correspondientes a lo propuesto por la FAO 56 con una subestimación del 13,1%, seguido de la combinación  $R_n-IR, G-WB, R_n-IR2, G-WB$  con una subestimación de 20,5% y 24,8% respectivamente. Estudios muestran que la  $ET_o$  calculada a partir de la ecuación combinada de Penman-Monteith (Allen, et al., 2006) es la que mejor se adapta.

### 3.2 Estudio a nivel horario

Para el estudio horario de evapotranspiración de referencia se tomara en cuenta los valores calculados de 6am a 6pm ya que son las horas en las que se lleva a cabo la evapotranspiración.

#### 3.2.1 Radiación neta escala horaria

Se tomó como referencia la radiación neta medida con los radiómetros netos CNR4, y se comparó con los 5 modelos diferentes.

Tabla 11 Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la radiación neta.  
Fuente: (Autor)

Ecuación utilizada	
$R_n-OBS$	Observaciones Radiómetro CNR4
$R_n-PM$	$R_n = R_{ns} - R_{nl}$
$R_n-SF$	$R_n = (1 - \alpha)R_s + \epsilon_{ls}\epsilon_a\sigma T_a^4 - \epsilon_{ls}\sigma T_s^4$
$R_n-IR$	$R_n = 0.61R_s - 1$
$R_n-IR2$	$R_n = -0.054T_{max} + 0.111T_{min} + 0.462R_s - 0.49243d_r + 50.831$
$R_n-LI$	$R_n = 7.14 \times 10^{-3}R_s + 5.23 \times 10^{-6}R_s(T + 17.8)^{1.87} - 3.94 \times 10^{-6}R_s^2 - 2.39 \times 10^{-9}R_s^2(T - 7.2)^2 - 1.02$

A escala horaria se observa también una subestimación por parte de los modelos estudiados, con los siguientes errores:

Tabla 12 Errores de los modelos de radiación neta en las 24h – Escala horaria.  
Fuente: (Autor)

	<b>MBE</b> <b>MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup></b>	<b>RMSE</b> <b>MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R1/Ri</b>	<b>Estimación</b> <b>%</b>	<b>Desempeño</b>
R <sub>n</sub> -PM	-0,416	6,179	0,988	0,952	-4,8	Excelente
R <sub>n</sub> -SF	4,077	5,040	0,922	0,929	-7,1	Muy bueno
R <sub>n</sub> -IR	2,905	6,590	0,991	0,736	-26,4	Pésimo
R <sub>n</sub> -IR2	3,496	11,042	0,989	0,719	-28,1	Pésimo
R <sub>n</sub> -LI	13,810	27,645	0,127	0,538	-46,2	Pésimo

Tabla 13 Errores de los modelos de radiación neta 6am-6pm – Escala horaria.  
Fuente: (Autor)

	<b>MBE</b> <b>MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup></b>	<b>RMSE</b> <b>MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R1/Ri</b>	<b>Estimación</b> <b>%</b>	<b>Desempeño</b>
R <sub>n</sub> -PM	3,533	7,549	0,938	0,952	-4,8	Excelente
R <sub>n</sub> -SF	3,007	4,470	0,993	0,845	-15,5	Bueno
R <sub>n</sub> -IR	6,988	9,257	0,989	0,771	-22,9	Pésimo
R <sub>n</sub> -IR2	10,942	15,451	0,989	0,745	-25,5	Pésimo
R <sub>n</sub> -LI	28,161	39,914	0,027	0,298	-70,2	Pésimo

Se encontró que en horas de sol y en todo el día el modelo propuesto por la FAO 56 (Allen, et al., 2006) subestima el 4,8%, el segundo mejor comportamiento tuvo el modelo R<sub>n</sub>-SF con una subestimación en horas del día de 15,5% y en las 24 horas una subestimación de 7,1%; seguido del modelo R<sub>n</sub>-IR con una subestimación en horas del día de 22,9% y en las 24 horas una subestimación de 26,4%, seguido del modelo R<sub>n</sub>-IR2 con una subestimación en horas del día de 25,5% y en las 24 horas una subestimación de 28,1%, el modelo R<sub>n</sub>-LI al igual que a escala diaria presenta un mal comportamiento con una subestimación de 70,2% y 46,2% en horas del día y en las 24 horas respectivamente. Un estudio realizado en Cataluña-España a nivel horario analiza la influencia de la R<sub>n</sub> calculada a partir de datos meteorológicos y una medición directa revelando que la temperatura es el principal parámetro que afecta a la R<sub>n</sub>, y la R<sub>n</sub> es el parámetro más importante que afecta la ET<sub>o</sub> (Llasat & Snyder, 1998), lo que afirma nuestro estudio, si analizamos el comportamiento del modelo R-LI frente a los valores de R<sub>n</sub> observados, y lo comparamos con los valores de ET<sub>o</sub>(R<sub>n</sub>-OBS,G-OBS) frente a ET<sub>o</sub> (R<sub>n</sub>-LI,G-WB) notamos que la curva tiene la misma tendencia.

Comparando los modelos en un gráfico de dispersión se obtienen los siguientes resultados:

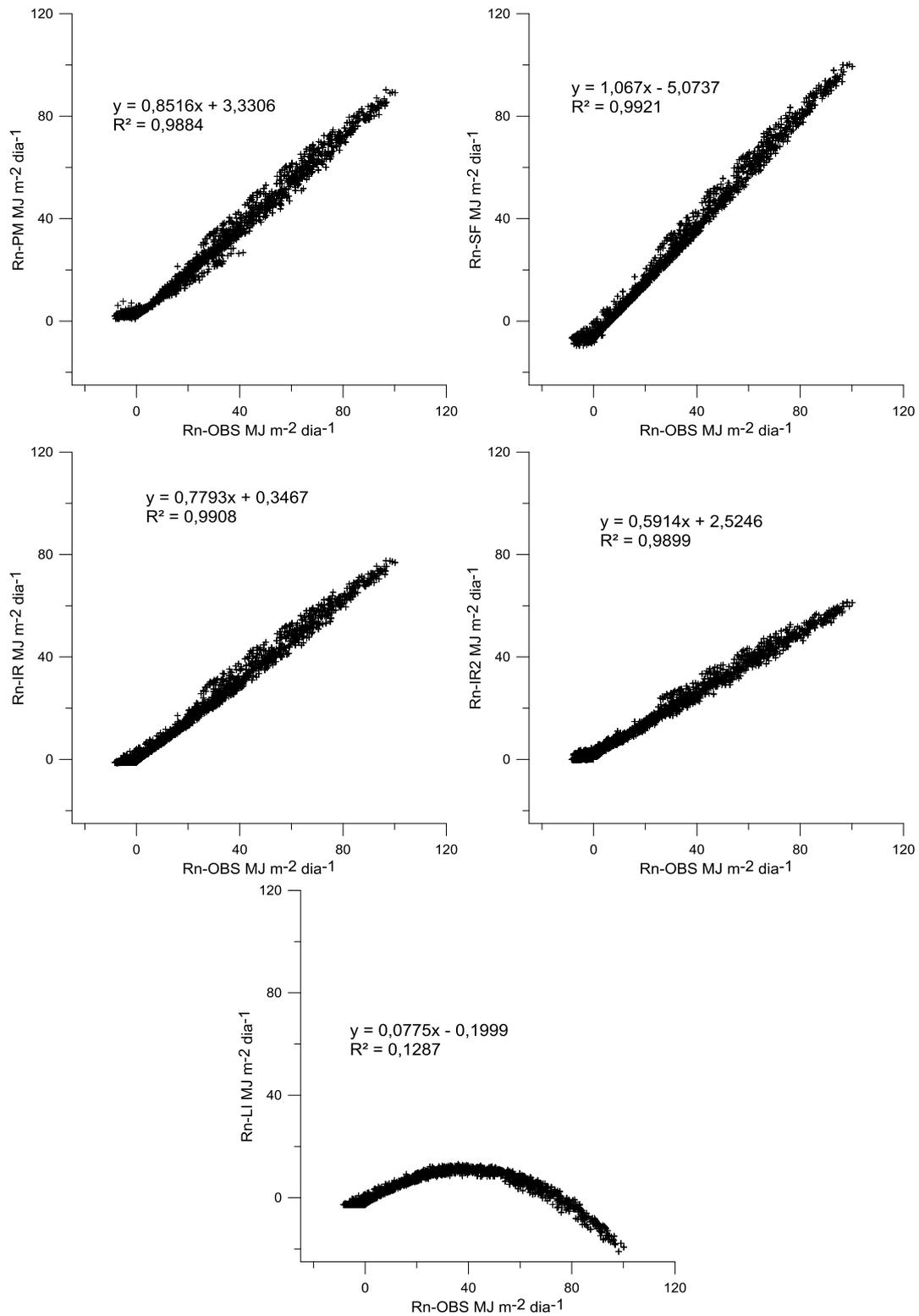


Figura 11 Correlación entre valores de radiación neta CNR4 y modelos – Escala horaria.  
Fuente: (Autor)

### 3.2.2 Flujo de calor escala horaria

Para este estudio la función propuesta por (Wang & Bou-Zeid, 2012) es necesario cambiar el límite de integración como muestra la siguiente figura:

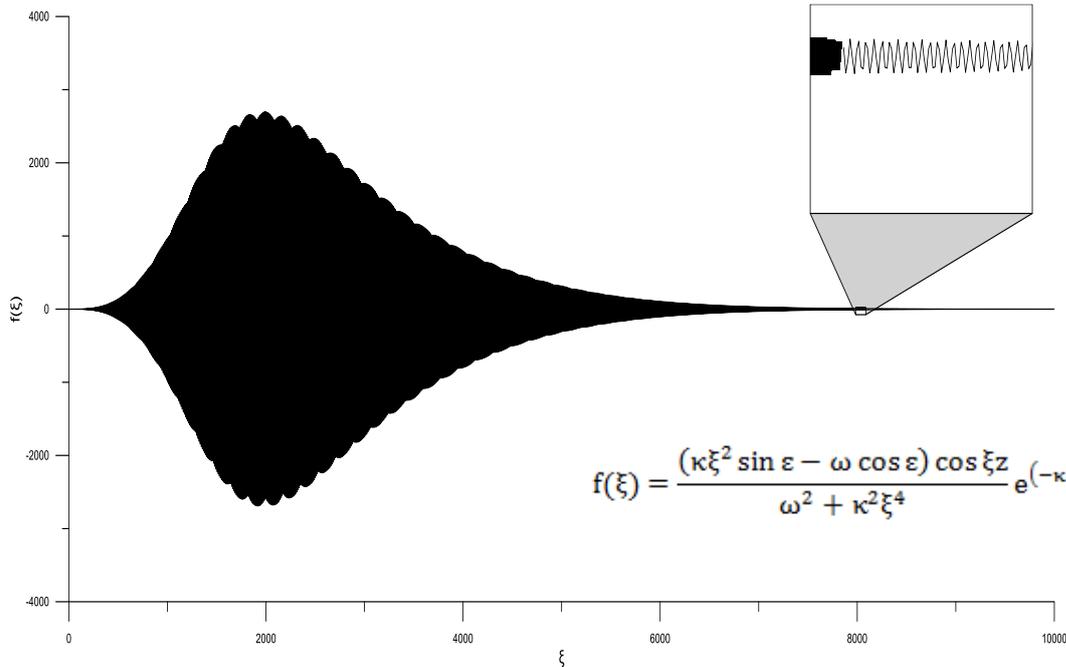


Figura 12 Función de Wang.  
Fuente: (Autor)

Por motivos de optimización de tiempo se tomara como límite superior de integración el valor de 10000 para todo el transcurso de las 24 horas.

Para el estudio se consideraron 2 modelos de flujo de calor en el suelo y se comparó con las observaciones de los platos de flujo.

Tabla 14 Ecuaciones utilizadas para el cálculo del flujo de calor en el suelo.  
Fuente: (Autor)

<b>Ecuación utilizada</b>	
G-OBS	Observaciones Platos de flujo HFP01SC
G-PM	$G \approx 0$
G-WB	$G_z(t) = Ae^{\left(-z\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right)} \sin\left(\omega t + \varepsilon - z\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) - \frac{2A\kappa}{\pi} \int_0^\infty \frac{(\kappa\xi^2 \sin \varepsilon - \omega \cos \varepsilon) \cos \xi z}{\omega^2 + \kappa^2\xi^4} e^{(-\kappa\xi^2t)} . d\xi$

Mismos que tienen el siguiente comportamiento:



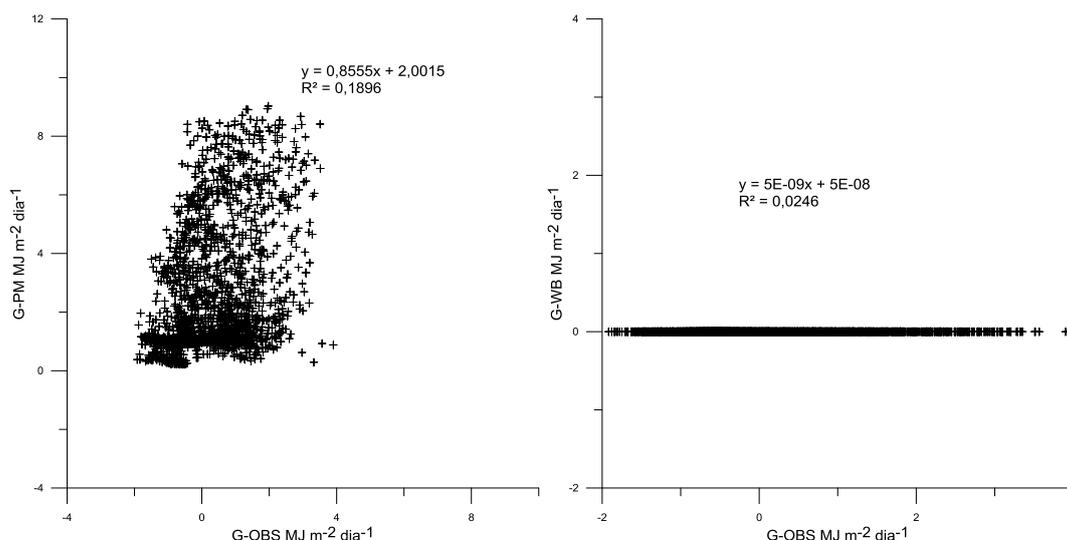
**Tabla 15 Errores de los modelos de flujo de calor en el suelo 24 h – Escala horaria.**  
Fuente: (Autor)

	MBE MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	RMSE MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	G1/Gi	Estimación %	Desempeño
G-PM	-1,894	2,694	0,189	1,160	+16	Razonable
G-WB	0,076	0,974	0,025	0,000	-100	Pésimo

**Tabla 16 Errores de los modelos de flujo de calor en el suelo 6am 6pm – Escala horaria.**  
Fuente: (Autor)

	MBE MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	RMSE MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	G1/Gi	Estimación %	Desempeño
G-PM	-2,386	3,522	0,044	1,053	+5,3	Muy bueno
G-WB	0,552	1,217	0,107	0,000	-100	Pésimo

Haciendo gráficos de dispersión se obtuvo lo siguiente:



**Figura 13 Correlación entre valores de flujo de calor en el suelo HRP01SC y modelos – Escala horaria.**

Fuente: (Autor)

El modelo de la FAO 56 (Allen, et al., 2006) mostró el mejor comportamiento, en horas de día sobreestima el flujo de calor en un 5,3% y para las 24 horas existe una sobrestimación del 16%, mientras que el modelo G-WB (Wang & Bou-Zeid, 2012) no tiene un buen comportamiento en nuestro ecosistema, pues con los valores recomendados por los autores del estudio el primer término de la ecuación es cero, y el segundo término de la ecuación tiende a cero, es necesario que el estudio de una información más detallada de la misma.

### 3.2.3 Evapotranspiración escala horaria

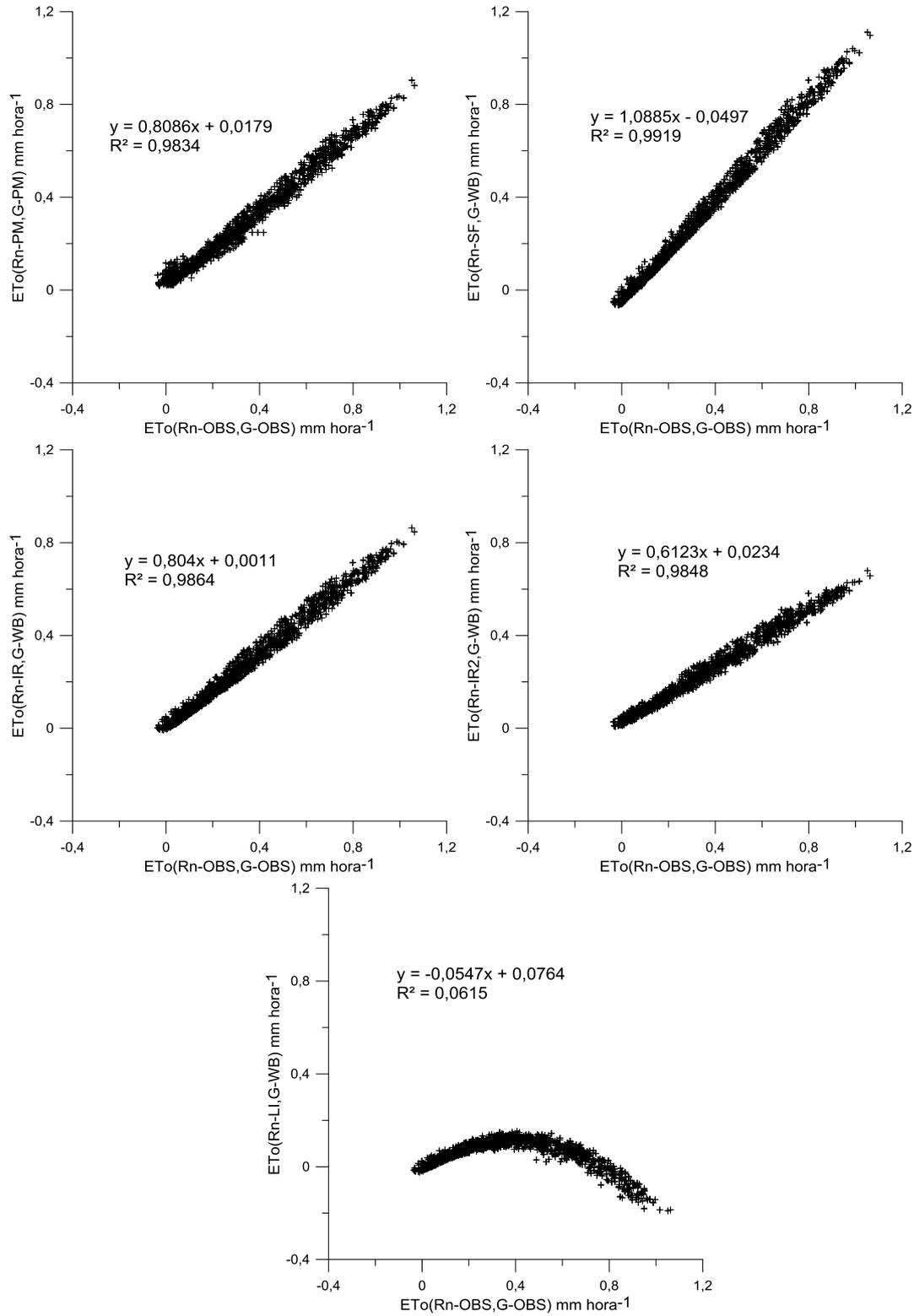
$ET_o(R_n-OBS, G-OBS)$  es la evapotranspiración de referencia calculada con valores de  $R_n$  y  $G$  observados y es la que se tomó como referencia, haciendo un análisis comparativo entre modelos, el comportamiento fue el siguiente:

Tabla 17 Errores de la evapotranspiración 6AM 6PM – Escala horaria.

Fuente: (Autor)

	MBE mm hora <sup>-1</sup>	RMSE mm hora <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	$ET_o(R_n - G_1) / ET_o(R_n - G_i)$	Estimación %	Desempeño
$ET_o(R_n-PM, G-PM)$	1,380	2,124	0,983	0,898	10,2	Bueno
$ET_o(R_n-SF, G-WB)$	0,522	0,995	0,992	0,870	13,0	Bueno
$ET_o(R_n-IR, G-WB)$	1,491	2,039	0,986	0,806	19,4	Razonable
$ET_o(R_n-IR2, G-WB)$	2,444	3,526	0,985	0,771	22,9	Pésimo
$ET_o(R_n-LI, G-WB)$	6,496	9,376	0,062	0,328	67,2	Pésimo

El mejor comportamiento de  $ET_o$  mostró lo propuesto por la FAO 56 con una subestimación de 10,2%, seguido de la  $ET_o$  calculada a partir de la combinación  $R_n-SF, G-WB$  que sobreestima en un 13%; seguido de la combinación  $R_n-IR, G-WB$  con una subestimación de 19,4%, seguido de la combinación  $R_n-IR2-G-WB$  con una subestimación de 22,9%; finalmente la combinación  $R_n-LI, G-WB$  que tiene un mal comportamiento sub estima un 67,2%. El error en la estimación de  $ET_o$ , debido a un error en  $R_n$  aumenta con la temperatura a aproximadamente 85% del error de  $R_n$  a  $T_a=40^\circ C$ . Un error relativamente alto de  $R_n = 66 W m^{-2}$  ( $5,69 MJ m^{-2} dia^{-1}$ ) se ve reflejado en un error en la  $ET_o$  de  $56 W m^{-2}$  ( $4,83 MJ m^{-2} dia^{-1}$ ) (Llasat & Snyder, 1998). El trabajo realizado por (Gavilán, et al., 2007) en una región semiárida de España a 110 m.s.n.m. en el cual comparan el método propuesto por la FAO 56 y ASCE con los valores medidos de  $ET_o$  con un lisímetro, encuentran un muy buen comportamiento con una sub estimación del 5% cuando se utiliza la versión de la FAO 56 con valores medidos y estimados, y de una subestimación del 3% y 4% con valores medidos y estimados respectivamente.



**Figura 14** Correlación entre valores de evapotranspiración – Escala horaria.  
Fuente: (Autor)

### 3.3 Análisis experimental de las parcelas

Las parcelas se encuentran ubicadas una junto a la otra (ver anexo 1).

#### 3.3.1 Estudio de la radiación neta y el flujo de calor

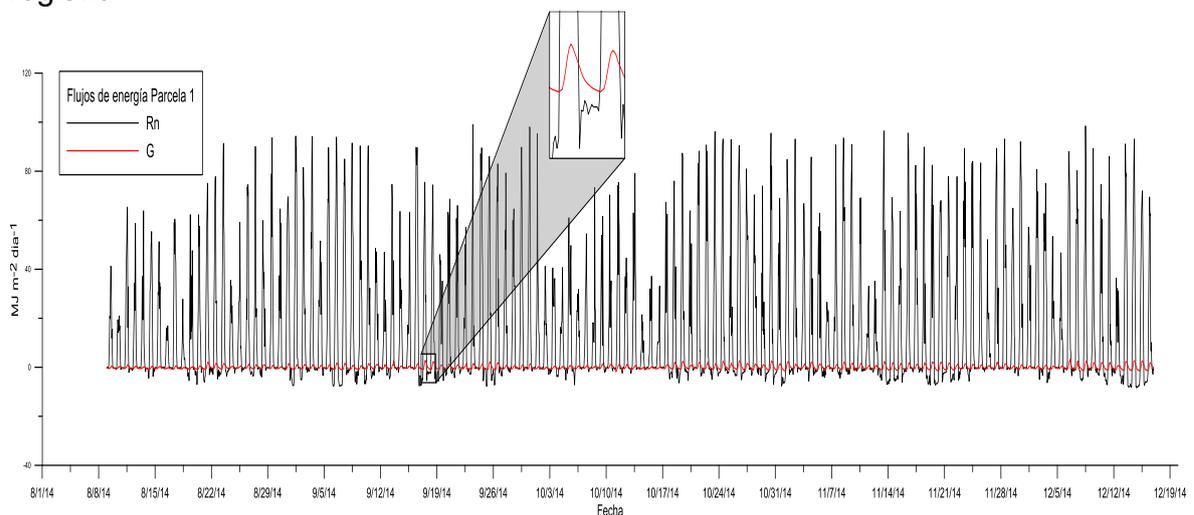
El estudio de la FAO 56 realizado por Penman-Monteith sugiere que: el flujo de calor en horas del día es el 10% de la radiación neta, mientras que para la noche es el 50% de la misma (Allen, et al., 2006).

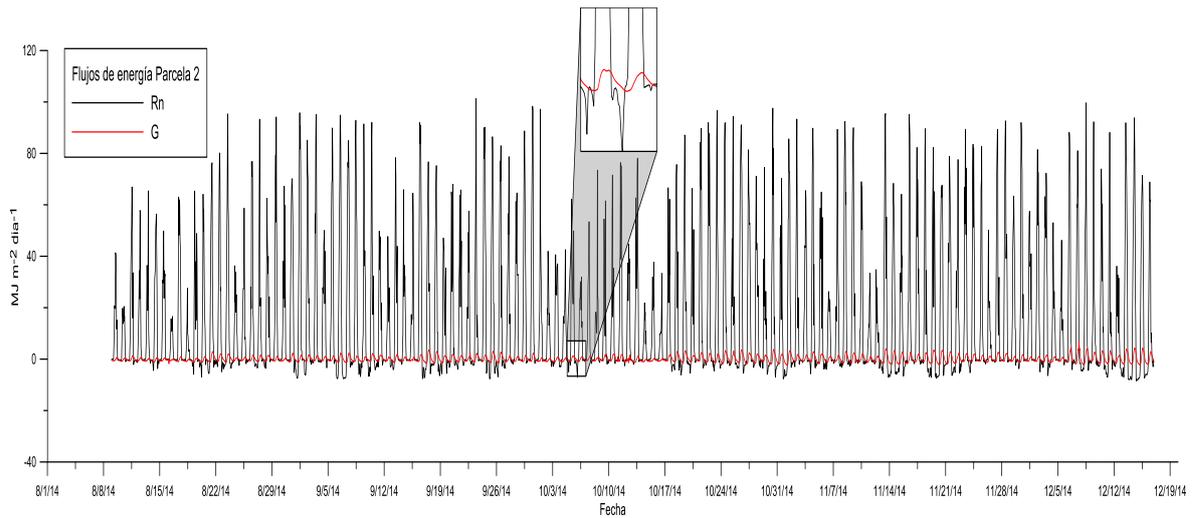
Nosotros encontramos que para nuestro medio se comporta de la siguiente manera:

**Tabla 18 Porcentaje de flujo de calor en el suelo respecto a la radiación neta.**  
Fuente: (Autor)

<b>Porcentaje de energía que representa G frente a Rn</b>			
Parcela 1		Parcela 2	
Día	Noche	Día	Noche
%	%	%	%
14,947	43,848	19,662	52,519

Esto quiere decir que en la parcela 1 en horas de día, el flujo de calor en el suelo es el 14% de la radiación neta, y en horas de la noche es el 43%, teniendo un pequeño error con respecto a lo que menciona la FAO 56. Mientras que para la parcela 2 el flujo de calor en el suelo en horas de día representa el 19% de la radiación neta, y para horas de la noche esta es el 52% de la radiación neta registra

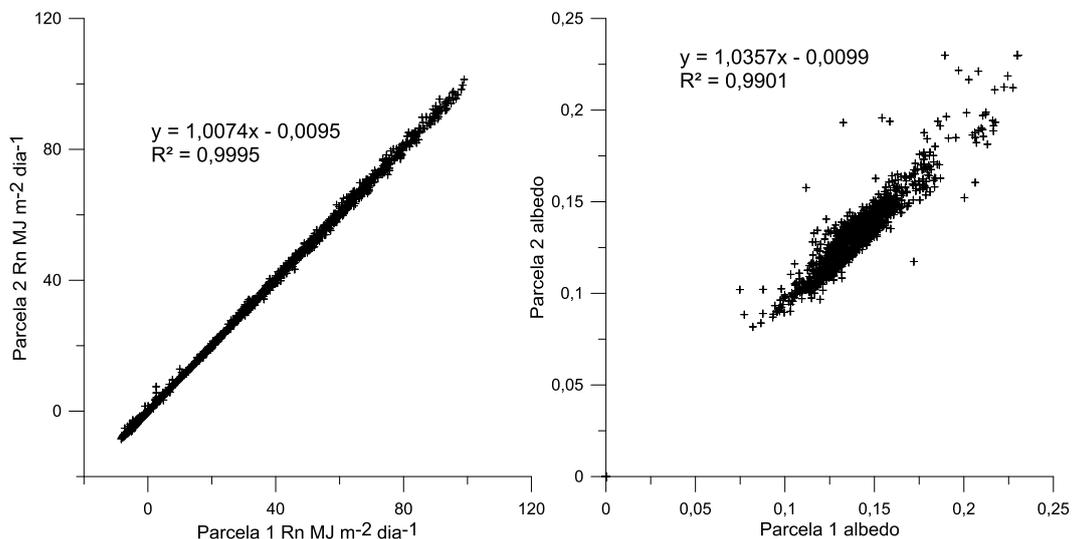




**Figura 15 Comportamiento de la Radiación neta y el Flujo de calor en el suelo en la parcela 1 - 2.**  
**Fuente: (Autor)**

### 3.3.2 Radiación neta y sus componentes

Para el cálculo de la Radiación neta el libro de la FAO 56 utiliza algunos parámetros entre los cuales encontramos la temperatura del aire, las radiaciones de onda corta y larga tanto entrantes como salientes y estas a su vez dependen del albedo (condiciones de la vegetación). Estas variables serán las que a continuación estudiaremos.



**Figura 16 Correlación entre parcelas experimentales, Radiación neta, Albedo y temperatura del aire.**  
**Fuente: (Autor)**

El valor del albedo es un factor muy importante ya que este es un coeficiente de reflectividad, y nuestras parcelas tienen un albedo promedio de:



Tabla 19 Albedo en las parcelas experimentales.

Fuente: (Autor)

Parcela	Albedo
1	0,141
2	0,133

Tabla 20 Errores de la radiación neta, albedo y temperatura ambiente entre parcelas experimentales.

Fuente: (Autor)

Parámetro	MBE	RMSE	R <sup>2</sup>
Radiación neta	-0,100	0,598	0,999
Albedo	0,003	0,007	0,990
Temperatura ambiente	0,082	0,664	0,981

Para un fácil entendimiento de los componentes de radiación neta, a continuación se grafica el promedio de los mismos en el tiempo estudiado.

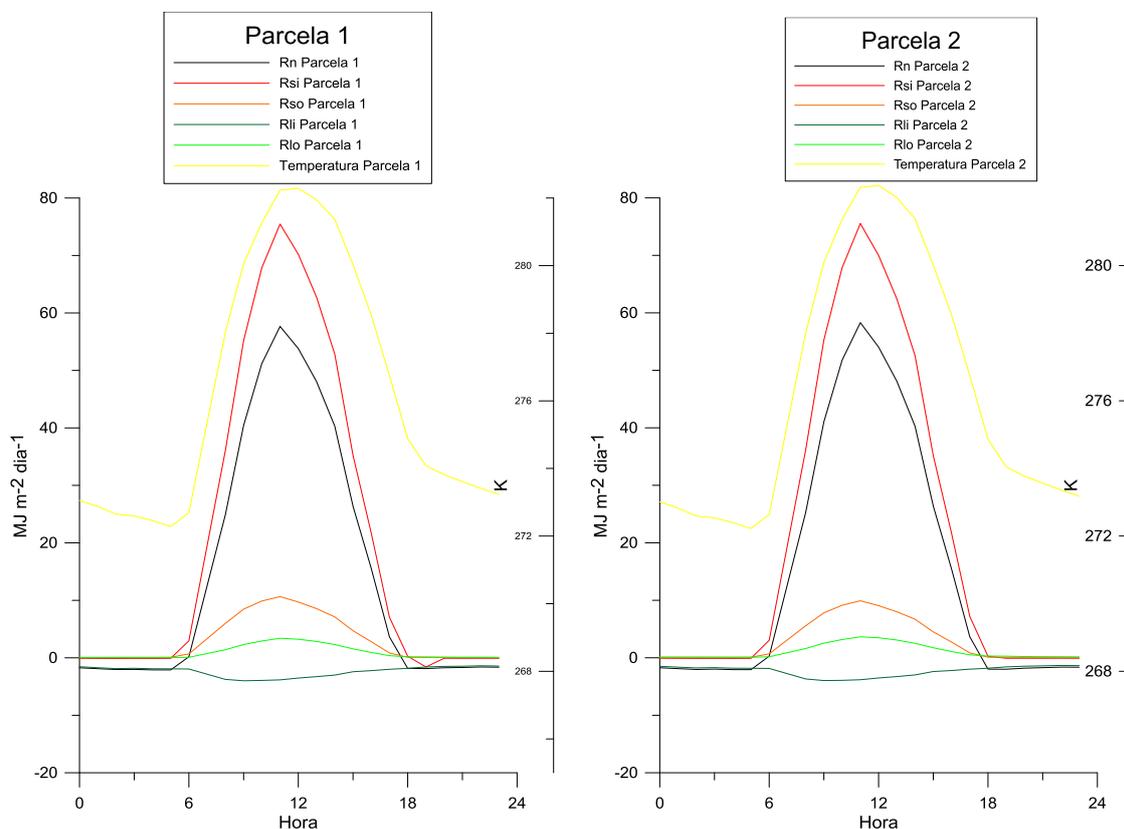


Figura 17 Comportamiento de radiación neta y sus componentes.

R<sub>n</sub>: radiación neta, R<sub>si</sub>: Radiación entrante de onda corta,  
 R<sub>so</sub>: Radiación saliente de onda corta, R<sub>li</sub>: Radiación entrante de onda larga,  
 R<sub>lo</sub>: Radiación saliente de onda larga.

Fuente: (Autor)

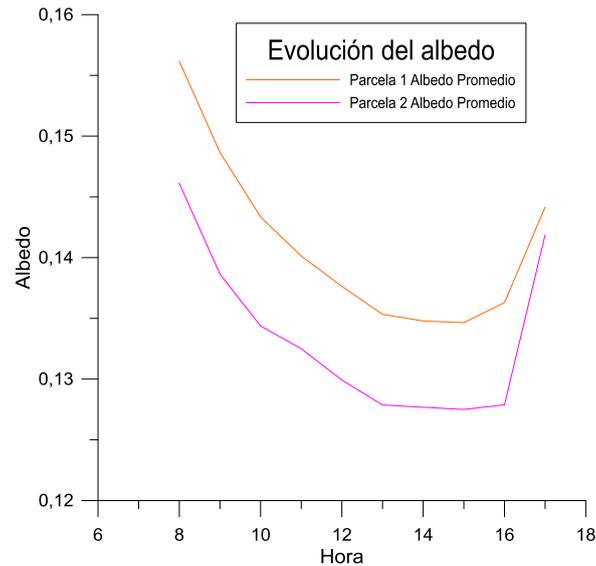


Figura 18 Comportamiento diario del albedo en las parcelas.  
Fuente: (Autor)

Tabla 21 Comportamiento promedio de los componentes de la radiación neta.  
Fuente: (Autor)

	Unidades	Parcela 1	Parcela 2	Diferencia porcentual
$R_n$	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	14,776	14,873	0,652%
$R_{si}$	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	21,088	21,133	0,213%
$R_{so}$	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	3,061	2,870	-6,655%
$R_{li}$	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	-2,343	-2,295	-2,092%
$R_{lo}$	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	0,968	1,107	12,556%
T	$^{\circ}\text{C}$	3,117	3,104	-0,449%
Albedo	Adimensional	0,141	0,133	-6,015%

En la tabla 20 los valores de diferencia porcentual positivos indican que los flujos de energía, temperatura y albedo de la parcela 2 son mayores al de la parcela 1, y los valores negativos lo contrario.

Si tomamos como ejemplo el medio día, el flujo de energía estaría distribuido de la siguiente manera

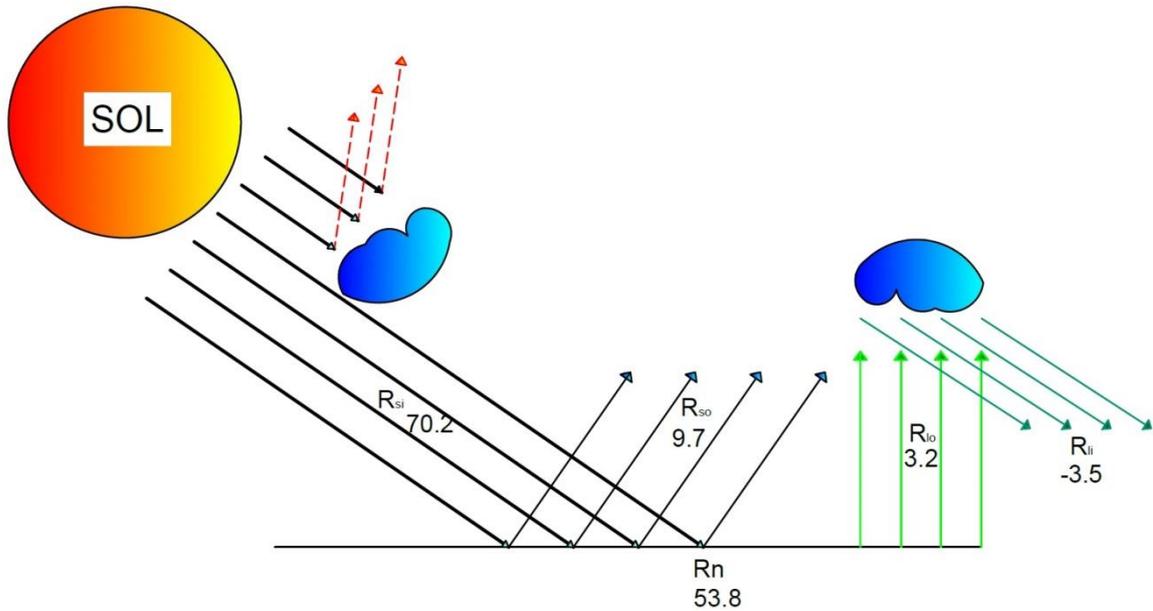


Figura 19 Flujos de componentes de radiación – Parcela 1.

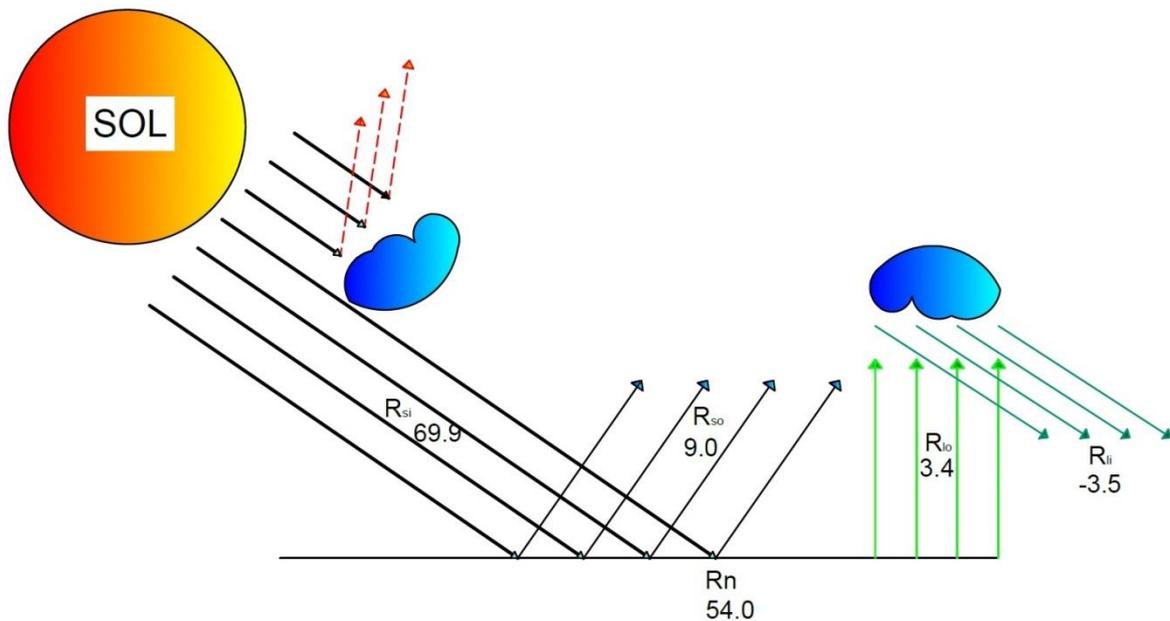


Figura 20 Flujos de componentes de radiación – Parcela 2.

Haciendo una comparación entre la parcela 1 y la parcela 2 encontramos que los parámetros estudiados en la radiación neta y sus componentes tienen un coeficiente de correlación mayor a 0,980; un RMSE inferior a 0,664 y un MBE inferior a 0,082 lo que nos hace concluir que los equipos se encuentran en perfecto funcionamiento, ya que las condiciones físicas de las parcelas son muy similares. Estos errores se ven reflejados en las figuras de los componentes.

Los valores de albedo encontrados (0,141 y 0,133) corresponden a valores característicos de pastizales y tierras de cultivo que están comprendidos entre 0,1 – 0,25 (Lal, 2006), si los comparamos enfocándonos en el tercer dígito decimal observamos que entre la parcela 1 y en la parcela 2 tenemos una



diferencia de 0,008; haciendo un examen visual a las parcelas, la parcela 2 corresponde a la más oscura por tener fracciones de suelo desnudo, como consecuencia absorberá una mayor cantidad de radiación, Estudios muestran que una variación de 0,1-0,2 en el albedo en un área muy grande puede ocasionar una reducción de 0,5 a 0,7 mm día<sup>-1</sup> de precipitación (Franchito & Rao, 1992).

Las parcelas experimentales estudiadas se comportan de manera semejante en lo que se refiere a  $R_n$  y sus componentes, si nos referimos a la  $R_n$  este obtuvo un coeficiente de correlación de 0,999 con un RMSE de 0,598 y MBE de -0,100, los resultados muestran que la parcela 2 tiene un 0,652% más de energía que la parcela 1, una vez que el flujo de energía incide sobre la superficie terrestre, observamos una variación en el albedo de 0,008 entre parcelas equivalente al 6,015% de diferencia, con un coeficiente de correlación de 0,990 un RMSE de 0,007 y un MBE de 0,003; el componente  $R_{so}$  en la parcela 1 y parcela 2 son de 3,061 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> y 2,870 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> respectivamente, se nota que la parcela 1 refleja mayor cantidad de energía, en términos energéticos un 6,655% más que la parcela 2, la radiación neta en cambio fue mayor en la parcela 2 (14,873 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) que en la parcela 1 (14,776 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>).

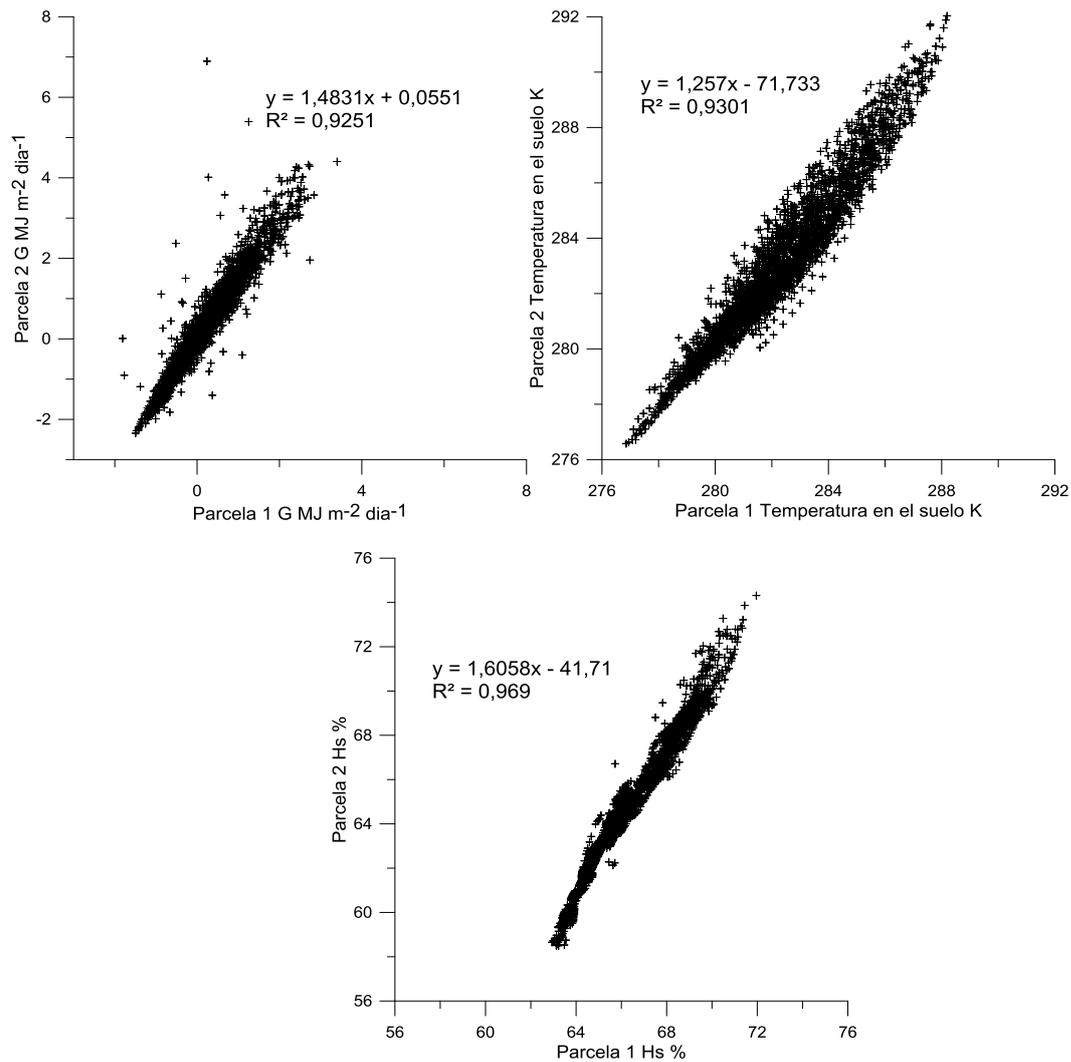
### 3.3.3 Flujo de calor en el suelo y sus componentes

El flujo de calor en el suelo depende de factores tales como la temperatura en el suelo y la humedad en el suelo.

Tabla 22 Errores del flujo de calor en el suelo, contenido de agua en el suelo y temperatura en el suelo.

Fuente: (Autor)

Parámetro	MBE	RMSE	R <sup>2</sup>
Flujo de calor	-0,074	0,499	0.925
Temperatura en el suelo	-0,808	1,224	0.930
Humedad en el suelo	1,5451	1,967	0.969

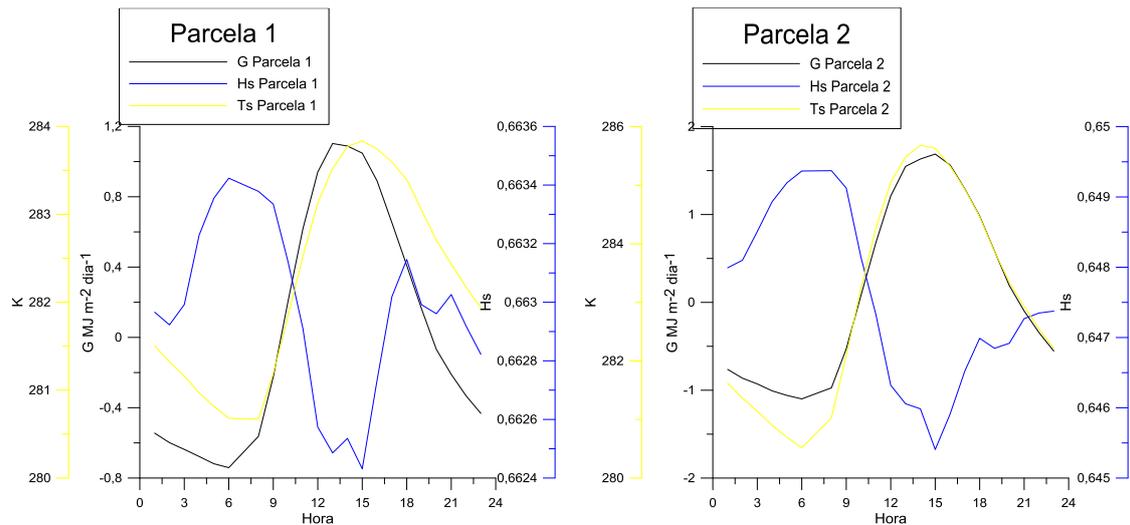


**Figura 21** Correlación entre parcelas experimentales, Flujo de calor en el suelo, Contenido de agua en el suelo, Temperatura en el suelo.  
Fuente: (Autor)

Para un correcto entendimiento del flujo de calor, humedad en el suelo y temperatura en el suelo a continuación se lo graficara en un periodo de 24 horas.

**Tabla 23** Comportamiento promedio de los componentes del flujo de calor en el suelo.  
Fuente: (Autor)

	Unidades	Parcela 1	Parcela 2	Diferencia porcentual
G	MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	0,038	0,112	66,071%
H <sub>s</sub>	Adimensional	0,663	0,648	-2,315%
T <sub>s</sub>	Adimensional	9,097	9,905	8,157%



**Figura 22 Comportamiento del flujo de calor en el suelo y sus componentes.**  
**G: Flujo de calor en el suelo, Hs: contenido de agua en el suelo, Ts: temperatura en el suelo.**  
**Fuente: (Autor)**

En la tabla 22 los valores de diferencia porcentual positivos indican que los flujos de energía, temperatura en el suelo y humedad en el suelo de la parcela 2 son mayores al de la parcela 1, y los valores negativos lo contrario.

En el flujo de calor se encontró un comportamiento diferente entre parcelas, el flujo de calor en el suelo tiene un coeficiente de correlación de 0,925 un RMSE de 0,499 y un MBE de -0,074; el coeficiente de correlación no es excelente en vista que la parcela 2 absorbió una mayor cantidad de energía de  $0,112 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  y con ello elevó su temperatura a  $9,905^\circ\text{C}$ ; por otra parte la parcela 1 registró un flujo de calor de  $0,038 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en el tiempo de estudio y consiguió elevar su temperatura hasta los  $9,097^\circ\text{C}$  existiendo una diferencia del 66,071% en el flujo de calor y del 8,157% en la temperatura en el suelo; notamos que la temperatura no varía en la misma proporción que el flujo de calor en el suelo, esto es porque el contenido de agua en el suelo es alta, como se mencionó en el marco teórico, necesitamos una gran cantidad de energía para variar apenas la temperatura; la humedad en el suelo es mayor en la parcela 1 (66,342%) que en la parcela 2 (64,937%), esta variación dio como resultado un coeficiente de correlación de 0,969 un RMSE de 1,967 y un MBE de 1,545.

La parcela 2 almacenó un 66,071% de energía más que la parcela 1, y logró elevar la temperatura en el suelo en la parcela 2 un 8,157% más que en la parcela 1, finalmente la humedad relativa tiene un comportamiento opuesto, pues la parcela 1 tuvo un 2,315% más que la parcela 2.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

El modelo propuesto por la FAO 56 mostró el mejor comportamiento en todos los casos  $R_n$ ,  $G$  y  $ET_o$ . Pues en el caso de la  $R_n$  la subestimación a escala diaria fue de 13,6% mientras que para escala horaria fue de 4,8%. Si analizamos el comportamiento del flujo de calor en el suelo a nivel horario se sobreestima un 16% si se toman en cuenta las 24 horas del día, y una sobreestimación de 5,3% si solo tomamos en cuenta las horas de sol, lo que indica que la ecuación del flujo de calor en el suelo propuesta por la FAO 56 tiene un mejor comportamiento en horas de sol. Estos errores se reflejan también en la  $ET_o$ , a nivel diario la ecuación combinada de Penman-Monteith subestima el 13,1% y a nivel horario subestima el 10,2% si los comparamos con los valores de  $ET_o$  calculado a partir de los valores observados de  $R_n$  y  $G$ ; aumentando la subestimación a medida que se aumenta la escala temporal en todos los casos ( $R_n$ ,  $G$ ,  $ET_o$ ).

En la  $R_n$ , el modelo R-SF tiene un comportamiento aceptable a escala diaria, en promedio subestima el 37,9%; mientras que a escala horaria subestima el 7,1% si se toma la  $R_n$  de todo el día, y 15,5% si se calcula en horas de sol; notando que al aumentar la escala temporal, se aumenta el error producido y se tiene mejores resultados en horas de sol. El modelo R-IR tiene un comportamiento diferente, a escala diaria este subestima 21,1%; y a escala horaria en un periodo de 24 horas subestima el 26,4% y en horas sol subestima el 22,9% esta ecuación a medida que se reduce la escala temporal aumenta la subestimación, aunque la variación no es significativa. El modelo R-IR2 a escala diaria tiene un buen comportamiento subestima en 25,6%; mientras que a escala horaria subestima el 28,1% tomando en cuenta las 24 horas del día, y una subestimación del 25,5% en horas de sol, en este modelo la ecuación no se ve afectada significativamente al variar la escala temporal. Finalmente el modelo R-LI tiene en general un mal comportamiento tanto en escala diaria como horaria con una subestimación de 61,1% y 46,2% respectivamente.

El modelo G-WB para el cálculo del flujo de calor no mostró un buen comportamiento a escala horaria en vista que los valores de la ecuación tienden a cero,  $Ae^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}} \sin\left(\omega t + \varepsilon - z\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \approx 0$ . La cantidad de calor en el suelo respecto a la radiación neta en promedio para el día es de 17,3% y para la noche de 48,18% con lo que se comprueba lo mencionado en el libro de la FAO 56.

Las combinaciones de modelos de  $R_n$  y  $G$  para el cálculo de  $ET_o$  muestran que  $ET_o$  (R-SF,G-WB) a escala diaria subestima el 36,2% mientras que a escala horaria subestima el 13,0% disminuyendo el error a medida que se reduce la escala temporal; la combinación  $ET_o$  (R-IR,G-WB) subestima a escala diaria el



20,5% y a escala horaria el 19,4%; la combinación  $ET_o$  (R-IR2-G-WB) a escala horaria subestima el 24,8% y a escala diaria subestima 22,9 estos dos últimas combinaciones no se ven afectadas por la escala temporal; finalmente la combinación  $ET_o$  (R-LI,G-WB) subestima a escala diaria el 58,5% y a escala horaria subestima el 67,2%.

El modelo propuesto por la FAO 56 es el mejor para el estudio de ecosistemas andinos, pues el error en las dos escalas temporales no excede 13,6% para el cálculo de  $R_n$ , 16% para el cálculo de  $G$ , y 13,1% para el cálculo de  $ET_o$  calculado a partir de datos observados de  $R_n$  y  $G$ .

Los resultados del análisis comparativo de parcelas muestran variaciones no muy significativas en la radiación neta y sus componentes, 6,015% en el albedo, de 0,652% en la radiación neta, 6,655% en la radiación de onda corta saliente, pero se encontró lo contrario en el flujo de calor, no así en sus componentes, 66,071% en el flujo de calor en el suelo, 8,157% en la temperatura del suelo y 2,315% en la humedad del suelo, a pesar de la aparente homogeneidad del suelo donde se localizan las parcelas, hay una diferencia significativa en la magnitud de flujo de calor del suelo  $G$ , y en menor medida en la del flujo de radiación  $R_n$ .

En la figura 19 se observa que el albedo no permanece constante al transcurrir el tiempo, este llega a un mínimo a las 3 de la tarde, este fenómeno se explica por el ángulo solar. El albedo es un factor importante en el ecosistema de montaña, en vista que una pequeña variación de este hace que varíe el calor en el suelo y con ello su temperatura, desde el punto de vista climático, la variación de este parámetro ocasiona un aumento o decremento de la temperatura a nivel de la superficie terrestre.



## 4.2 Recomendaciones

- Para propósitos de cálculo de evapotranspiración de referencia en el páramo andino, se recomienda usar los valores que se obtengan con datos calculados de  $R_n$  y  $G$  a partir de lo propuesto por la FAO 56, de preferencia en una escala horaria, en el caso que no se cuente con radiómetros netos y platos de flujo.
- Hacer una calibración de la ecuación combinada de Penman-Monteith si los valores de las variables son promediadas diariamente.
- Hacer una caracterización del suelo en las parcelas, para identificar el motivo de la variación del flujo de calor.



## Referencias

- Aguilar, Z., Ulloa, C. & Hidalgo, P., 2009. *Guía de Plantas Útiles de los Páramos de Zuleta, Ecuador*. Quito: PPA-EcoCiencia.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M., 2006. *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. 56: Food and Agriculture Org.
- Álvarez Sánchez, J. & Naranjo García, E., 2003. *Ecología del suelo en la selva húmeda de México*. Primera ed. México: Pasta rústica.
- Borja, P. y otros, 2008. *Características Físico-Químicas de Histosoles y Andosoles de los Páramos de Quimsacocha, Ecuador*. Quito: Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo.
- Casanova, E., 2005. *Introducción a la ciencia del suelo*. Segunda ed. Caracas: Universidad central de Venezuela.
- Córdova, M., Carrillo, G. & Céleri, R., 2013. Errores en la influencia de la evapotranspiración de referencia de una zona de paramo andino debido al uso de datos mensuales, diarios y horarios. *Aqua-LAC*, V(2), pp. 14-22.
- Costa López, J., 1991. *Curso de Ingeniería Química - Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte*. Barcelona: Reverté.
- Cristóbal, J. y otros, 2009. Estimación de la radiación neta diaria a escala regional mediante imágenes de teledetección y modelización SIG. *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de teledetección*, pp. 389-392.
- Cuesta, F. y otros, 2013. *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*, s.l.: CONDESAN.
- Duffie, J. A. & Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Cuarta ed. Madison: WILEY.
- Esplugas, S. & Chamarro, M. E., 2005. *Fundamentos de transmisión de calor*. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- FAO, 2015. *FAO Corporate Document Repository*. [En línea] Available at: <http://www.fao.org/docrep/003/y1899e/y1899e06.htm>
- Farouki, O., 1981. *Thermal properties of soils*. Hanover: CRREL.
- Franchito, S. & Rao, B., 1992. Climatic change due to land surface alterations. *Kluwer Academic Publishers*, 22(1), pp. 1-34.
- Gavilán, P., Berengena, J. & Allen, R., 2007. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: Impact on Penman-Monteith reference ET estimates in semiarid regions. *Agricultural Water Management*, 89(3), pp. 275-286.
- González Velasco, J., 2009. *Energías renovables*. Barcelona: Reverte.



Hofstede, R. y otros, 2014. *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado del conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*, Quito: UINC.

Irmak, S., ASCE, M., Odhiambo, L. & Mutiibwa, D., 2011. Evaluating the Impact of Daily Net Radiation Models on Grass and alfalfa-Reference Evapotranspiration Using the Penman-Monteith Equation in a Subhumid and Semiarid Climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(2), pp. 59-72.

Josse, C. y otros, 2009. *Ecosistemas de los andes del norte y centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela.*, Lima: Secretaria general de la comunidad andina, Programa regional ECOBONA-intercooperación, CONDESAN-proyecto páramo andino, Programa bioandes, Naturereserve, IAvH, LTA.UNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL.

Lal, R., 2006. *Encyclopedia of Soil Science*. Primera ed. Ohio: Advisory Board.

Llasat, M. & Snyder, R., 1998. Data error effects on net radiation and evapotranspiration estimation. *Agricultural and forest meteorology*, 91(3-4), pp. 209-221.

Majnooni-Heris, A., Rashid, A., Asadi, E. & Zare, D., 2013. Calibrating Net Solar of FAO 56 Penman-Monteith Method to Estimate Reference Evapotranspiration. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 3(10), pp. 1-7.

Matthews, E., 1984. *Vegetation, Land-Use and Seasonal Albedo Data Sets*, New York: National Aeronautics and Space Administration .

Olalla Mañas, F. M., 2005. *Agua y agronomía*. Madrid: Aedos.

Raven, P., Ever, R. & Eichhorn, S., 1992. *Biología de las plantas*. Cuarta ed. Barcelona: Reverté.

Samani, Z. y otros, 2007. Estimating Daily Net Radiation over Vegetation Canopy through Remote Sensing and Climatic Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), pp. 291-297.

Sánchez, O., Vega, E., Peters, E. & Monroy-Vilchis, O., 2003. *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*. Primera ed. México: Continental.

Schaetzl, R. & Thompson, M., 2015. *Soil Genesis and geomorphology*. Second ed. New York: Cambridge university press.

Schirmbeck, J. & Rivas, R., 2007. *Estimación de la radiación neta a nivel del suelo a partir de datos captados por el sensor ETM+*, Florianópolis: s.n.

Trajkovic, S. & Gocic, M., 2010. Comparison of some empirical equation for estimating daily reference evapotranspiration. *Architecture and Civil Engineering*, 8(2), pp. 163-168.

Verde Vilanova, J. R., s.f. Influencia de los factores de formación y uso del suelo en las propiedades ándicas, formas y mecanismos de estabilización de carbono en suelos del norte de la Península Ibérica. *UNIVERSIDAD SANTIAGO DE COMPOSTELA*, p. 13.



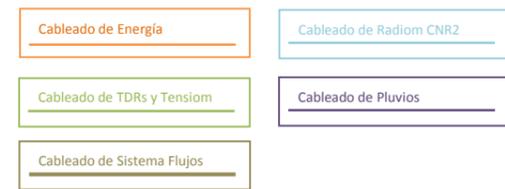
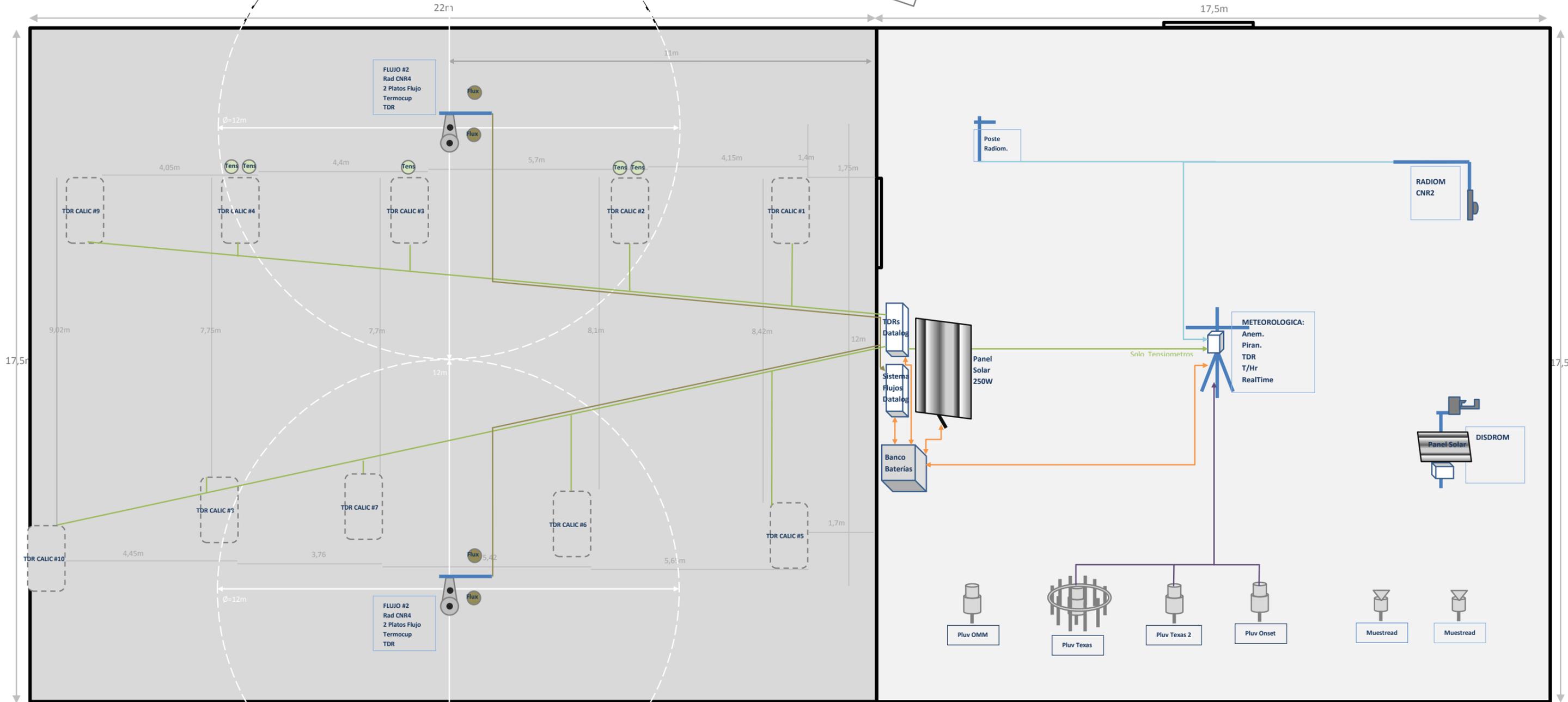
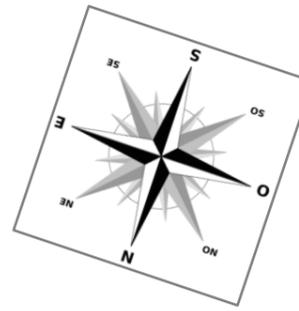
UNIVERSIDAD DE CUENCA

Wang, Z.-H. & Bou-Zeid, E., 2012. A novel approach for the estimation of soil ground heat flux. *Agricultural and Forest Meteorology*, Volumen 154-155, pp. 214-221.

Xu, C. & Singh, V., 2000. Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 14(2), pp. 339-349.

Anexo 1: Diseño equipamiento observatorio ecohidrológico de Zhurucay

ANEXOS



**DIAGRAMA DE EQUIPAMIENTO E INSTALACIONES – OBSERVATORIO ZHURUCAY – DRHyCA / CHyC**  
 Elaborado por: G. Carrillo  
 Revisado por:  
 Fecha: 07 Julio 2014