

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR Y NETA A PARTIR DE LA  
TEMPERATURA EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMO Y COMPARACIÓN CON  
SENSORES A NIVEL DEL SUELO

Tesis previa a la obtención del título de  
Ingeniera Ambiental.

**Autora:**

Paola Fernanda Montenegro Díaz.

**Director:**

Ing. Galo José Carrillo Rojas, M Sc.

**Codirector:**

Ing. Mario Andrés Córdova Mora.

**Cuenca - Ecuador**  
**2015**



## RESUMEN

La radiación es un parámetro meteorológico ampliamente relacionado con los procesos de evapotranspiración, fotosíntesis y cambio climático. Para conocer su influencia, es necesario el monitoreo continuo mediante equipos especializados; o emplear modelos matemáticos para su cálculo. El estudio explora las relaciones entre radiación observada y estimada; y la influencia de la nubosidad sobre la radiación solar. Se desarrolló con información de tres estaciones meteorológicas, en la microcuenca del río Quinoas. Los objetivos fueron: (i) estimar la radiación solar horaria, (ii) estimar la radiación neta horaria; mediante metodología de FAO-56. Los resultados se compararon con observaciones de piranómetros o radiómetros netos respectivamente; aplicando los estadísticos: error cuadrático medio (RMSE), error medio de sesgo (MBE) y coeficiente de determinación ( $R^2$ ). (iii) Relacionar el porcentaje de nubosidad, determinado mediante análisis de imágenes satelitales Landsat ETM+(B1), con la radiación solar. Los resultados mostraron relaciones pobres en la estimación de radiación solar mediante Hargreaves-Samani (HS), con RMSE% superiores a 64,5%, MBE% superiores a -31,8% y  $R^2$  medio de 0,52. El cálculo de la radiación neta, mediante observaciones con los piranómetros, fue aceptable, se obtuvo un  $R^2$  medio de 0,96, RMSE% inferior a 41,9% y MBE% inferior a 23,9%. Existe una relación inversamente proporcional de moderada a alta ( $R^2=0,73$ ) entre el porcentaje de nubosidad y la fracción efectiva de radiación solar, para el dominio que abarca los instrumentos piranómetros (72,26 Km<sup>2</sup>). El estudio ha evaluado la fiabilidad/plausibilidad del modelo HS y la importancia de relacionar radiación solar y nubosidad en un ecosistema de páramo.

**Palabras clave:** radiación solar, radiación neta, nubosidad, imágenes satelitales, Landsat, páramo.



## ABSTRACT

Radiation is a meteorological parameter related to the processes of evapotranspiration, photosynthesis, and climate change. In order to understand the influence of radiation on an ecosystem, is necessary a continuing monitoring using specialized equipment, or using mathematic models to calculate it. Study probes the relation between observed and estimated radiation, and the influence of cloudiness over the solar radiation. It was developed using information of three meteorological stations, situated in Quinoas watershed. Objectives were: (i) Estimating hourly solar radiation, (ii) Estimating hourly net radiation. Both of them were calculated using equations described in FAO-56. Results were compared with the data from pyranometers and net radiometers respectively, using statistical equations: root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE), and coefficient of determination ( $R^2$ ). (iii) Relating the cloudiness percentage, determined by Landsat ETM+(B1) satellite images, with the solar radiation. Results showed a poor estimation of the solar radiation using Hargreaves-Samani model (HS). RMSE% errors were higher than 64.5%, MBE% errors were higher than -31.8% and the mean  $R^2$  was 0.52. Net radiation calculated from values of solar radiation observed in pyranometers was acceptable. RMSE% were lower than 41.9%, MBE% were lower than 23.9%, and the mean  $R^2$  was 0.96. There was a moderate to high inverse relation ( $R^2=0.73$ ) between cloudiness percentage and the effective fraction of solar radiation, for the area that contains the pyranometers (72.26 Km<sup>2</sup>). This study has evaluated the reliability/plausibility of the HS model, and the importance of relating the solar radiation and cloudiness in a páramo ecosystem.

**Key words:** solar radiation, net radiation, cloudiness, Landsat satellite images, páramo.



---

**CONTENIDO**

RESUMEN ..... 2

ABSTRACT ..... 3

AGRADECIMIENTO..... 10

INTRODUCCIÓN ..... 11

    1. ANTECEDENTES ..... 11

    2. JUSTIFICACIÓN ..... 12

    3. OBJETIVOS ..... 14

        3.1. Objetivo General ..... 14

        3.2. Objetivos Específicos..... 14

CAPÍTULO I ..... 15

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... 15

    1. RADIACIÓN ..... 15

        1.1. Radiación extraterrestre..... 15

        1.2. Radiación neta ..... 15

        1.3. Radiación solar ..... 16

        1.4. Radiación terrestre..... 16

    2. PARÁMETROS METEOROLÓGICOS QUE INFLUYEN EN EL  
    COMPORTAMIENTO DE LA RADIACIÓN ..... 17

        2.1. Nubosidad..... 17

    3. IMÁGENES SATELITALES ..... 18

        3.1. Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ ..... 18

CAPÍTULO II ..... 22

MATERIALES Y MÉTODOS ..... 22

    1. ZONA DE ESTUDIO ..... 22

    2. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA ..... 24



---

2.1. Descripción general de los equipos meteorológicos empleados.....	24
2.2. Información meteorológica.....	25
3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	25
CAPÍTULO III .....	28
ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR HORARIA A PARTIR DE UN MODELO BASADO EN LA TEMPERATURA DEL AIRE. ....	28
1. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	28
2. METODOLOGÍA .....	28
2.1. Descripción .....	28
3. CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	31
3.1. Información empleada y cálculos.....	31
4. RESULTADOS.....	32
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	36
CAPITULO IV .....	39
ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN NETA HORARIA A PARTIR DE UN MODELO BASADO EN LA TEMPERATURA DEL AIRE Y EN LA RADIACIÓN SOLAR. ....	39
1. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	39
2. METODOLOGÍA .....	39
2.1. Descripción .....	39
3. CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	41
3.1. Información empleada y cálculos.....	41
4. RESULTADOS.....	42
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	46
CAPÍTULO V .....	48



---

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA NUBOSIDAD RESPECTO A LA RADIACIÓN SOLAR, EN EL ÁREA APROXIMADA DE DETECCIÓN DE LOS SENSORES PIRANÓMETROS. ....	48
1. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	48
2. METODOLOGÍA .....	48
2.1. Descripción .....	48
3. CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	49
3.1. Información empleada y cálculos.....	49
4. RESULTADOS.....	53
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	58
CAPITULO VI.....	61
CONCLUSION GENERAL .....	61
1. OBJETIVO GENERAL .....	61
2. CONCLUSION GENERAL .....	61
BIBLIOGRAFÍA .....	63
ANEXOS .....	70
Anexo 1: Especificaciones técnicas de los equipos meteorológicos empleados .....	70
Anexo 2: Tablas referentes a las fracciones $R_{\text{obs}} Ra^{-1}$ y $R_{\text{krs1}} Ra^{-1}$ y el porcentaje de nubosidad, en las estaciones meteorológicas: Toreadora, La Virgen, Chirimachay y el dominio Quinoas. ....	75
Anexo 3: Fotografías de las estaciones meteorológicas Toreadora, La Virgen y Chirimachay, ubicadas en la microcuenca del río Quinoas.....	79



**INDICE DE TABLAS**

**Tabla 1.** Bandas de las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+..... 19

**Tabla 2.-** Microcuenca del río Quinoas, estaciones meteorológicas. .... 22

**Tabla 3.-** Parámetros meteorológicos, microcuenca del río Quinoas..... 23

**Tabla 4.-** Valores de  $K_{rs2}$  para las estaciones meteorológicas: Toreadora, La Virgen y Chirimachay. .... 32

**Tabla 5.-** Análisis estadístico de  $R_{sK_{rs1}}$  y  $R_{sK_{rs2}}$  respecto a  $R_{s_{obs}}$ , en la microcuenca del río Quinoas..... 33

**Tabla 6.-** Análisis estadístico de  $R_{n_{krs1}}$  y  $R_{n_{est}}$ , en la microcuenca del río Quinoas..... 42

**Tabla 7.-** Porcentaje de nubosidad sobre el área de detección se los sensores piranómetros, en la microcuenca del río Quinoas. .... 54

**Tabla 8.-** Resultados de  $R^2$ , entre la fracción efectiva de radiación solar y el porcentaje de nubosidad, en la microcuenca del río Quinoas..... 57

**INDICE DE FIGURAS**

**Figura 1.-** Imagen Landsat ETM+ SLC-Off. Path 10 Row 62..... 20

**Figura 2.-** Microcuenca del río Quinoas..... 23

**Figura 3.-** Gráficos de dispersión de  $R_{sK_{rs1}}$  y  $R_{sK_{rs2}}$  respecto a  $R_{s_{obs}}$ , en la microcuenca del río Quinoas..... 35

**Figura 4.-** Gráficos de dispersión de  $R_{n_{krs1}}$  y  $R_{n_{est}}$  respecto a  $R_{n_{obs}}$ , en la microcuenca del río Quinoas..... 45

**Figura 5.-** Microcuenca del río Quinoas, áreas en estudio. .... 51

**Figura 6.-** Análisis de la nubosidad en la banda 1, imagen satelital Landsat ETM+ SLC Off (B1). .... 52

**Figura 7.-** Gráficos de dispersión entre la fracción efectiva de radiación solar y el porcentaje de nubosidad. .... 56



Yo, Paola Fernanda Montenegro Díaz, autora de la tesis **“ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR Y NETA A PARTIR DE LA TEMPERATURA EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMO Y COMPARACIÓN CON SENSORES A NIVEL DEL SUELO ”**, 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 Ingeniera Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, abril del 2015



**Paola Fernanda Montenegro Díaz**

**C.I: 0106984453**





Yo, Paola Fernanda Montenegro Díaz, autora de la tesis **“ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR Y NETA A PARTIR DE LA TEMPERATURA EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMO Y COMPARACIÓN CON SENSORES A NIVEL DEL SUELO”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, abril del 2015.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Paola M.', written over a horizontal line.

**Paola Fernanda Montenegro Díaz**

**C.I: 0106984453**



## **AGRADECIMIENTO**

He de reconocer la gran labor de quienes hicieron posible este proyecto, principalmente a mi maestro y director de tesis, Ingeniero Galo Carrillo, persona que me ha brindado la oportunidad de aprender de sus conocimientos y experiencia; y al Ingeniero Mario Córdova por sus aportes y continuas sugerencias.

A la Universidad de Cuenca con su Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHiCA), a la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (ETAPA-EP), a la Subgerencia de Gestión Ambiental y Administración del Parque Nacional Cajas (PNC), al Área de Biosfera Macizo del Cajas y Área Nacional de Recreación Quimsacocha, y al proyecto ETAPA-DIUC: “Ciclos Meteorológicos y Evapotranspiración a lo Largo de una Gradiente Altitudinal del Parque Nacional Cajas 2013–2017”.

A mi familia, amigos y compañeros por su cariño y apoyo incondicional.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

Paola Montenegro Díaz.



## INTRODUCCIÓN

### 1. ANTECEDENTES

El estudio de los ecosistemas de páramo ha ganado importancia científica en los últimos años, debido al alto grado de endemismo biológico y a sus condiciones climáticas, muy diferentes a las de otros ecosistemas (Mena et al., 2011). Los ecosistemas de páramo están ubicados en La Cordillera de los Andes de Colombia, Ecuador, Norte de Perú y en Venezuela, desde los 3.000 msnm hasta los 4.800 msnm (Ramsay & Oxley, 1996). En Ecuador, 1.835.834 hectáreas corresponden a páramo (Llambí, Werschitz, & Alejandra, 2012).

El páramo de acuerdo al gradiente altitudinal, se divide en: subpáramo (3.000-3.500 msnm) destinado principalmente a uso agrícola, páramo propiamente (3.500-4.100 msnm) con pajonales y bosques de *Polylepis* y superpáramo (superior a 4.100 msnm) que limita con la línea de nieve (Buytaert, Célleri, De Bievre, & Cisneros, 2003). El clima de páramo es húmedo y frío; con dos estaciones lluviosas y dos estaciones secas. Las estaciones lluviosas corresponden a los meses de abril-mayo y septiembre-noviembre, las secas a los meses de diciembre-febrero y junio-agosto.

La precipitación es predominantemente orográfica y en forma de lloviznas (Buytaert et al., 2003); anualmente oscila entre 600 mm en los páramos secos, y 4.000 mm en los páramos húmedos (Llambí et al., 2012). Así por ejemplo, en la microcuenca de Zhurucay (3400–3900 msnm), en la provincia del Azuay-Ecuador, la temperatura promedio diaria es de 5,9 °C, con escasa variabilidad estacional (Padrón, 2013). Los vientos son fuertes y de dirección variable, la presión atmosférica es baja debido a la altura sobre el nivel del mar (Córdova, Carrillo, & Célleri, 2013), mientras que la radiación es alta, debido a la altura y declinación solar (Llambí et al., 2012).



En referencia a la radiación, diferentes autores han mencionado que en los ecosistemas de páramo, es significativamente más elevada que en otros ecosistemas (Mena et al., 2011). Se considera que posee los valores más altos del planeta (Llambí et al., 2012), con mínima variación durante todo el año (Buytaert et al., 2003). La radiación puede alcanzar valores instantáneos de  $1,4 \text{ KW m}^{-2}$  (Padrón, 2013), los valores máximos ocurren al medio día. Por lo cual se entiende que, la vegetación de páramo se ha adaptado a condiciones climáticas extremas.

Adicionalmente, la nubosidad determina la distribución de la radiación, pues interfiere con la radiación directa y la convierte en difusa; por lo tanto, se relaciona con el ciclo del agua y el balance energético (Bendix, Rollenbeck, & Palacios, 2004). Esta interferencia, en términos de cantidad de radiación que llega a la superficie terrestre, puede traducirse en que, a una determinada hora, en un día despejado, la radiación puede ser de  $1,2 \text{ KW m}^{-2}$ ; y para un día nublado, a la misma hora, la radiación puede reducirse a  $0,5 \text{ KW m}^{-2}$  (Llambí et al., 2012).

## **2. JUSTIFICACIÓN**

La radiación es un parámetro climático, que conjuntamente con la temperatura, la velocidad del viento y la humedad, están relacionados con los procesos de evaporación, transpiración (Córdova, 2013), fotosíntesis y cambio climático (Gubler, Gruber, & Purves, 2012). Por otro lado, la implementación de proyectos energéticos, dependen de la intensidad de la radiación incidente sobre la zona (Martínez-Romero, Ortega, de Juan, Tarjuelo, & Moreno, 2012). Debido a ello, el análisis de la radiación es indispensable para la modelación de balances energéticos (Gubler et al., 2012; Llebot, 1994); ya que su correcta evaluación permite analizar, por ejemplo, la eficacia de la implementación de proyectos energéticos (Raichijk & Taddei, 2012) o la estimación de la evapotranspiración a nivel espacial (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006; Solano & Vázquez, 2013).



Para el monitoreo continuo de la radiación, es necesario disponer de equipos especializados, como por ejemplo: radiómetros (De Castro Teixeira, Bastiaanssen, Ahmad, Moura, & Bos, 2008) o piranómetros (Bernier & Plamondon, 1983); aunque los sensores meteorológicos pueden ser costosos, y generalmente de difícil acceso para países en vía de desarrollo. Debido a ello, se han propuesto distintos modelos matemáticos, que permiten estimar el valor de la radiación a partir de variables meteorológicas (temperatura, duración de la insolación, nubosidad, entre otros). Han sido varios los autores que han estudiado la radiación mediante la aplicación de modelos matemáticos, como el método de Hargreaves-Samani, el modelo de Almorox-Hontoria o el de Chen (Tabari, Talaei, Willems, & Martinez, 2014), los modelos que calculan la radiación en base al análisis de imágenes satelitales (Moradi, Mueller, Alijani, & Kamali, 2008), o los que se basan en la correlación entre distintos modelos (De Castro Teixeira et al., 2008).

Cabe mencionar que un pequeño cambio en las características de la radiación, sobre la superficie terrestre, potencialmente generará cambios significativos en el clima (Ohmura et al., 1998). Es por ello que la presente investigación, se ha aplicado a ecosistemas de páramo de la región Sur del Ecuador, en donde la información científica existente referente a radiación, es escasa.

Para la presente investigación, se ha empleado información de tres estaciones meteorológicas, pertenecientes al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca (iDRHiCA), dentro del Proyecto ETAPA-DIUC: “Ciclos Meteorológicos y Evapotranspiración a lo Largo de una Gradiente Altitudinal del Parque Nacional Cajas 2013–2017”. Las estaciones se encuentran ubicadas en la microcuenca del río Quinoas, en el Parque Nacional Cajas (ecosistema de páramo).



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo General**

Estimación de la radiación solar y radiación neta horarias en ecosistemas de páramo mediante ecuaciones basadas en la temperatura, y posterior análisis estadístico empleando observaciones en equipos especializados (radiómetros y piranómetros); así como el análisis de la influencia de la nubosidad sobre la radiación solar de las zonas en estudio.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos desarrollados en páginas posteriores son:

- I. Estimación de la radiación solar horaria a partir de un modelo basado en la temperatura del aire a nivel superficial (2 m), y comparación con datos observados con sensores piranómetros; de las estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Quinoas (Parque Nacional Cajas).
- II. Estimación de la radiación neta horaria a partir de un modelo basado en la temperatura (2 m) y en la radiación solar a nivel superficial, y comparación con datos observados en radiómetros netos; de las estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Quinoas (Parque Nacional Cajas).
- III. Análisis de la influencia de la nubosidad con respecto a la radiación solar que cubre el área aproximada de detección de los sensores piranómetros, por medio de imágenes satelitales Landsat; en las estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Quinoas (Parque Nacional Cajas).



## **CAPÍTULO I**

### **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

#### **1. RADIACIÓN**

La radiación es la energía que emiten los cuerpos en forma de ondas electromagnéticas. La principal fuente de energía para la Tierra, es el Sol; el cual posee un espectro de longitudes de onda corta ( $\lambda < 4 \mu\text{m}$ ), a diferencia de la Tierra que es mucho más fría, y emite radiación de onda larga ( $\lambda > 4 \mu\text{m}$ ).

##### **1.1. Radiación extraterrestre**

La radiación extraterrestre ( $R_a$ ), corresponde a la cantidad de radiación que llega a la superficie de la atmósfera. Para el cálculo de  $R_a$  es necesario conocer la constante solar, con valor aproximado de  $0,082 \text{ MJm}^{-2}\text{min}^{-1}$  (Allen et al., 2006). La constante es el valor de la energía procedente del sol, por una unidad de tiempo por unidad de superficie; en dirección perpendicular a la energía radiada por el sol, a la distancia media entre la Tierra y el Sol (Duffie & Beckman, 2013).

##### **1.2. Radiación neta**

El balance de la radiación en el sistema Tierra-atmósfera o radiación neta ( $R_n$ ), se obtiene de la diferencia de la radiación emitida y recibida por el sistema.

Existe un transporte meridional entre la radiación emitida por el Sol y la emitida por la superficie terrestre. Las dos formas de radiación no se encuentran en la misma proporción para las distintas regiones del planeta (Castillo & Jordán, 1999). Lo cual se debe a que, las regiones ecuatoriales reciben más energía procedente del Sol que las polares; mientras que, en las regiones polares, la pérdida de energía es mayor por emisión desde la superficie terrestre (Castillo & Jordán, 1999).



### **1.3. Radiación solar**

Parte de  $R_a$  llega a la superficie terrestre, y se conoce como radiación solar o global ( $R_s$ ). En un día despejado  $R_s$  constituye el 75% de  $R_a$  (Allen et al., 2006). Mientras mayor es la altura sobre el nivel del mar, mayor es la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre.

$R_s$  está formada por radiación solar directa y radiación difusa. La radiación solar directa es la radiación incidente que proviene directamente del Sol. La radiación difusa es la radiación que alcanza la superficie terrestre, luego de haber sido dispersada por las nubes y demás moléculas presentes en la atmósfera (Duffie & Beckman, 2013).

El albedo es la fracción de energía que es reflejada por una superficie. El albedo depende del ángulo de incidencia, de la pendiente de la superficie terrestre y del tipo de cultivo (Allen et al., 2006). La radiación solar neta ( $R_{ns}$ ) es la fracción de radiación solar que no se refleja, se relaciona con las características del albedo.

### **1.4. Radiación terrestre**

La radiación que se emite desde la superficie terrestre, atmósfera o desde cualquier otro cuerpo que posea temperaturas similares a las del ambiente, se conoce como radiación terrestre ( $R_{nl}$ ) (Duffie & Beckman, 2013).  $R_{nl}$  se relaciona con la emisividad del tipo nubes presentes en un periodo determinado, temperatura y presión de vapor de la zona en estudio (Flerchinger, Xaio, Marks, Sauer, & Yu, 2009; Marthews, Malhi, & Iwata, 2011); así como del tipo de vegetación y estación del año (De Castro Teixeira et al., 2008).





Tanto  $R_s$  como  $R_{nl}$  determinan la cantidad de energía presente en el planeta (Gubler et al., 2012). En los ecosistemas de montaña  $R_s$  es el tipo de energía dominante; pero  $R_{nl}$  en estaciones de alta nubosidad, contribuye con elevadas cantidades de energía, alcanzando valores similares a  $R_s$  en épocas secas, debido a la alta emisividad de las nubes presentes (Sicart, Hock, Ribstein, & Chazarin, 2010).

## **2. PARÁMETROS METEOROLÓGICOS QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE LA RADIACIÓN**

### **2.1. Nubosidad**

La nubosidad hace referencia a la fracción de cielo cubierto por nubes. Las nubes están constituidas por gotas de agua o nieve suspendidas en la atmósfera, formadas por un núcleo de condensación (Nakajima & King, 1990). Las nubes se clasifican de acuerdo a: su origen (orográficas y convectivas), su naturaleza (naturales y artificiales), su forma (cúmulus, cirrus y nimbus) y su nivel atmosférico (altas, medias y bajas) (Rodríguez, Capa, & Portela, 2004). Para la clasificación de la nubosidad, es necesaria la observación de la cobertura nubosa; pero esta generalmente es escasa; y por lo tanto está sujeta a errores (Sicart et al., 2010).

Las nubes son más frías que la superficie terrestre (Irish, 2000) y generan sombras sobre la misma, dependiendo de la posición del ángulo solar. La manera en que las nubes se distribuyen sobre una determinada región depende de: la topografía, altitud, distancia de la línea costera (Azorín et al., 2012). Dentro de lo mencionado, se observa que en la ciudad de Cuenca - Ecuador, existe una elevada cobertura nubosa, debido a la reducción de la altura de la Cordillera de los Andes (3.300 a 4.000 msnm), con respecto a la parte norte y central del país (Bendix et al., 2004).



Por otro lado, la cantidad de nubes, su tipo, temperatura del aire en la base de la nube, la altitud a la que se forman sobre la superficie y estación del año, están relacionados con los valores de  $R_s$  y  $R_{nl}$  de una determinada región (Kasten & Czeplak, 2000). Es decir que, la nubosidad se relaciona con la radiación; el valor de  $R_s$  decrece con la nubosidad, mientras que el valor de  $R_{nl}$  aumenta con la nubosidad. Existe una relación entre la radiación de onda corta, de onda larga y la nubosidad (Ambach, 1974). Con respecto a  $R_s$ , autores señalan que la forma en que se distribuye sobre la superficie terrestre depende de la presencia de nubes, su distribución y espesor óptico (Rubio, Lopez, Tovar, & F, 2003).

### **3. IMÁGENES SATELITALES**

#### **3.1. Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+**

El monitoreo de la superficie y atmósfera terrestre se realiza, entre otros, por medio del análisis de imágenes satelitales georreferenciadas. Mencionadas imágenes caracterizan los elementos según la reflectividad que estos posean.

Las imágenes se obtienen de satélites destinados a la captura de imágenes de la superficie terrestre; entre ellos, el Landsat 7, lanzado en 1998, y administrado por National Space and Space Administration (NASA). El satélite Landsat 7, está situado sobre una órbita Heliosincrónica, y cuenta con un radiómetro multiespectral, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), que proporciona imágenes de alta resolución de la superficie terrestre (Markham, Boncyk, Helder, & Barker, 2014). Transmite 532 imágenes diarias, correspondientes a toda la superficie terrestre.



Las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ están compuestas por 8 bandas (Tabla 1), que permiten el análisis de la superficie terrestre, con una resolución espacial de 30 m para 6 bandas, 60 m para infrarrojo termal y 15 m para la banda pancromática (Markham et al., 2014); con un nivel digital (ND) o valor de píxel entre 0 y 255, el cual está determinado por la reflectancia del objeto analizado. Las imágenes satelitales cuentan con correcciones o niveles de procesamiento, como el L1T (Terrain Corrected) o el L1G (Radiometrically and Geometrically Corrected) (U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey, 2013), que permiten una mejor interpretación de los aspectos observados en una imagen satelital.

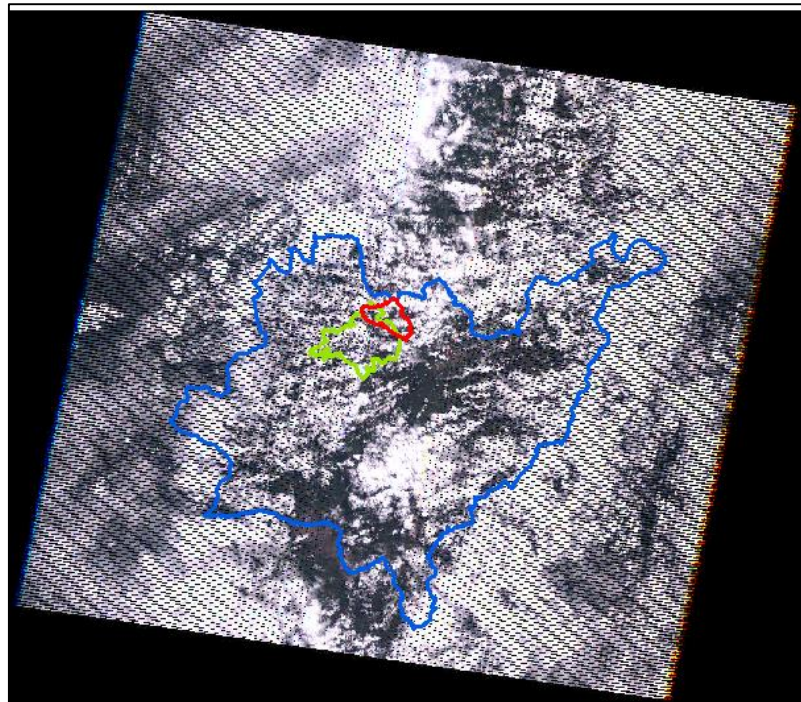
La información indicada a continuación (Tabla 1), detalla las principales características y aplicaciones de las bandas de una imagen satelital Landsat 7 ETM+. La información ha sido tomada de: U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey (2013).

**Tabla 1.** Bandas de las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.

<b>BANDA</b>	<b>LONGITUD DE ONDA</b>	<b>RESOLUCIÓN</b>	<b>APLICACIONES</b>
1 azul	0,45-0,52 $\mu\text{m}$	30 m	Monitoreo acuático, distingue suelo de vegetación.
2 verde	0,52-0,60 $\mu\text{m}$	30 m	Distingue vegetación.
3 rojo	0,63-0,69 $\mu\text{m}$	30 m	Distingue entre vegetación y suelo.
4 infrarrojo cercano	0,77-0,90 $\mu\text{m}$	30 m	Distingue entre cuerpos de agua y suelo.
5 infrarrojo de onda corta 1	1,55-1,75 $\mu\text{m}$	30 m	Discrimina el contenido de humedad del suelo y vegetación, atraviesa las nubes.
6 infrarrojo termal	10,40-12,50 $\mu\text{m}$	60 m	Distingue la humedad del suelo.
7 Infrarrojo de onda corta 2	2,09-2,35 $\mu\text{m}$	30 m	Distingue rocas y depósitos minerales.
8 Pancromático	0,52-0,90 $\mu\text{m}$	15 m	Definición de imágenes.

Cabe mencionar que las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ presentan un bandeo; debido a que el equipo Scan Line Corrector (SLC) se averió en el año 2003, motivo por el cual se encuentra apagado. Para una imagen completa (aproximadamente 185 X 170 km), el bandeo corresponde al 22%, disminuyendo hacia la parte central (U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey, 2013).

A continuación (Figura 1) se expone la imagen satelital Landsat ETM+ SLC Off para la provincia del Azuay-Ecuador.



**Figura 1.-** Imagen Landsat ETM+ SLC-Off. Path 10 Row 62.

*Se ubica la provincia del Azuay-Ecuador (azul), el Parque Nacional Cajas (verde) y la microcuenca del río Quínoas (rojo).*

*Se indica la composición color natural, bandas 3, 2,1; dentro de la imagen satelital.*

*Imagen satelital correspondiente al día 31-05-2014.*



El satélite Landsat 7 ETM+ pasa por la provincia del Azuay-Ecuador aproximadamente cada 15 días, entre las 10:20:00-10:25:00. El área total del Azuay se cubre con la imagen correspondiente al Path 10 Row 62. Se observa además que la provincia se encuentra en la parte central de la imagen, por lo tanto el bandeo para Azuay es mínimo.



## **CAPÍTULO II**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **1. ZONA DE ESTUDIO**

Se han realizado observaciones de parámetros meteorológicos obtenidos de tres estaciones meteorológicas, ubicadas en la microcuenca del río Quínoas, Parque Nacional Cajas, en la provincia del Azuay-Ecuador (Tabla 2).

**Tabla 2.-** Microcuenca del río Quinoas, estaciones meteorológicas.

<b>ESTACIÓN</b>	<b>UBICACIÓN</b>	<b>ALTITUD</b>	<b>PRESIÓN</b>
<b>Toreadora</b>	UTM WGS84 697618,73 ; 9692227,08	3955 msnm	63,54 kPa
<b>La Virgen</b>	UTM WGS84 701110,74 ; 9692382,23	3626 msnm	66,20 kPa
<b>Chirimachay</b>	UTM WGS84 705703,88 ; 9688895,48	3298 msnm	68,83 kPa

La microcuenca del río Quinoas (Figura 2) forma parte de un ecosistema de páramo; los parámetros meteorológicos promedio horarios de la microcuenca, correspondientes al año 2014 se indican a continuación (Tabla 3).

Tabla 3.- Parámetros meteorológicos, microcuenca del río Quinoas.

	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN	HUMEDAD RELATIVA	RADIACIÓN SOLAR
Microcuenca Río Quinoas	8,30 °C	49,12 mm hora <sup>-1</sup>	86, 09%	0,816 MJ m <sup>-2</sup> hora <sup>-1</sup>

Parámetros meteorológicos promedio del año 2014.

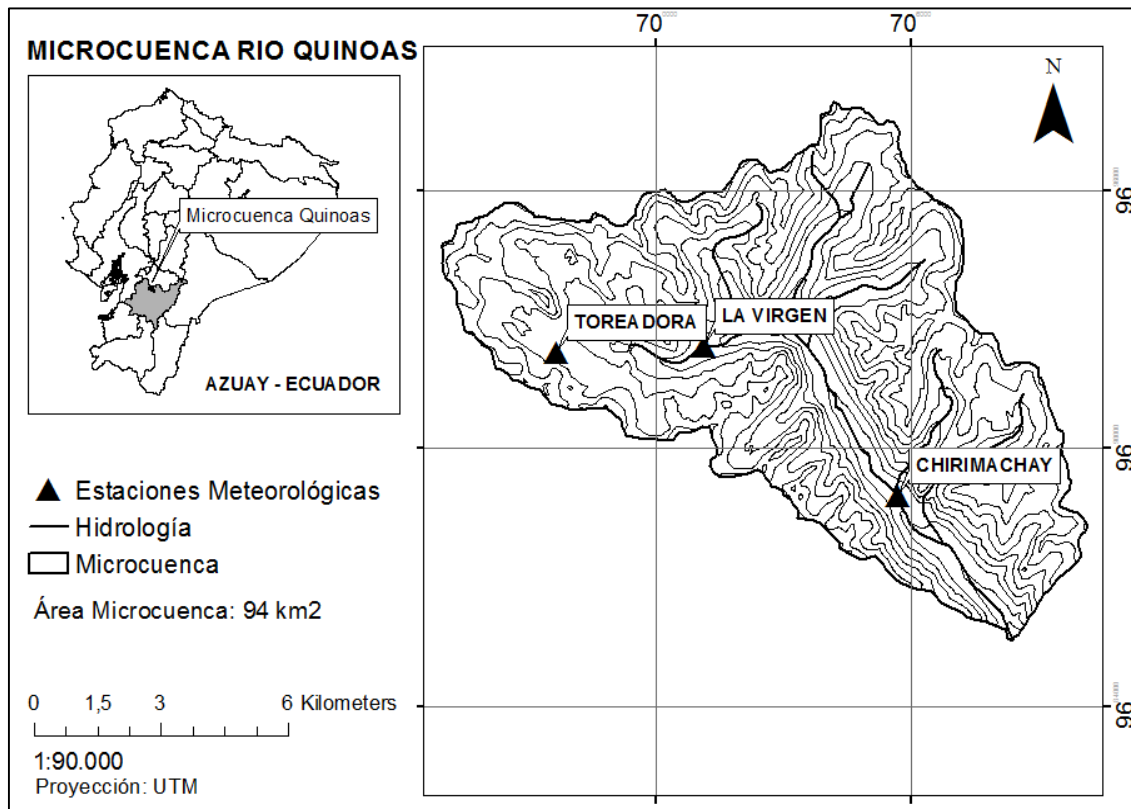


Figura 2.- Microcuenca del río Quinoas.

Se indican las estaciones meteorológicas: Toreadora, La Virgen y Chirimachay.  
Fuente propia.



## **2. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA**

### **2.1. Descripción general de los equipos meteorológicos empleados**

A continuación se especifican los equipos meteorológicos empleados:

- Piranómetro SP-110-Apogee,
- Radiómetro Neto NR-Lite 2-Kipp Zonen,
- Sensor combinado de Temperatura/humedad relativa CS215-Campbell Scientific,

Los piranómetros miden la radiación solar. El piranómetro SP-110-Apogee mide la radiación solar directa y difusa mediante un detector fotovoltaico con un ángulo de visión de  $180^{\circ}$  y una precisión de  $\pm 5\%$  (APOGEE INSTRUMENTS INC., 2014a).

Los radiómetros netos miden la diferencia entre radiación solar y radiación terrestre, de radiación incidente y reflejada; es decir miden la radiación neta. Los radiómetros netos NR-Lite 2-Kipp Zonen poseen un pirgeómetro para la radiación terrestre con un ángulo de visión de  $150^{\circ}$  y para la radiación solar un piranómetro con un ángulo de visión de  $180^{\circ}$  (CAMPBELL SCIENTIFIC INC., 2010).

Finalmente los sensores de temperatura-humedad relativa, como su nombre lo indica, miden la temperatura y humedad relativa del aire.





Los sensores se encuentran programados de manera que cada cinco minutos se almacenen valores máximos, mínimos y promedio del parámetro meteorológico respectivo. Los parámetros meteorológicos se almacenan en un datalogger Campbell Scientific instalado conjuntamente con los equipos en cada estación.

En el Anexo 1 se encuentran las especificaciones técnicas de los equipos meteorológicos mencionados. En el Anexo 3 se indican fotografías de los equipos instalados dentro de las estaciones meteorológicas.

## **2.2. Información meteorológica**

La base de datos de las tres estaciones se analizó durante los periodos: agosto 2013 - julio 2014 (primer y tercer objetivo) y octubre - diciembre 2014 (segundo objetivo), desde las 06:00:00 hasta las 18:00:00 (12 horas). Para posteriormente convertirlos a las unidades de medida de análisis requeridas, y emplearlos en las ecuaciones propuestas para la estimación de radiación solar (Ec. 4) o radiación neta (Ec.14).

El tercer objetivo se respondió mediante el análisis de la nubosidad del sector, por medio de observaciones realizadas en veintidós imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ (B1) SLC Off, correspondientes al primer periodo de estudio, y software ArcGis 10.1 para el análisis. Las imágenes se obtuvieron de bases de datos del sitio web USG Earth Explorer de U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey (ver: <http://earthexplorer.usgs.gov>).

## **3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Los valores estimados de la radiación solar y radiación neta ( $\text{MJm}^{-2}\text{hora}^{-1}$ ) se analizaron estadísticamente con respecto a los valores observados en cada estación meteorológica, durante los periodos de estudio indicados.



Debido a que han sido ampliamente utilizadas en el análisis de parámetros meteorológicos, y a que se ajustan para el análisis de datos históricos, para el análisis estadístico se emplearon:

Error cuadrático medio RMSE. Proporciona información sobre el rendimiento o precisión de los modelos (conjunto de datos). La ecuación evalúa la medida en la que modelo no se ajusta a la información real; mientras mayor es RMSE, más baja se considera la estimación.

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

Error medio de sesgo MBE (Mean Bias Error). Hace referencia al error sistemático, proporciona información sobre el rendimiento o precisión del modelo (Katiyar, Kumar, Kumar P, & B.Das, 2010). Permite la comparación entre los valores observados y los estimados; el modelo matemático indica si existe una tendencia a sobreestimar o subestimar los valores obtenidos.

El valor deseado es de cero, valores negativos indican subestimación y valores positivos indican sobrestimación.

$$\text{MBE: } \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad (\text{Ec. 2})$$

Para obtener una visión más clara del análisis estadístico, se han expresado en porcentaje los valores obtenidos de RMSE y MBE. Para lo cual, RMSE y MBE se dividen para el valor medio observado (radiación solar y radiación neta observadas), en cada periodo de estudio (Badescu, 2008; Katiyar et al., 2010).

Coeficiente de determinación R<sup>2</sup>. Permite medir la relación lineal entre los valores reales y los estimados; es decir, brinda información acerca de la bondad de ajuste de un determinado modelo.



Los valores  $R^2$  varían entre cero y uno; siendo uno el valor deseado, e indica que existe una relación lineal perfecta de los valores. La correlación es excelente con valores superiores a 0,9, existe una correlación alta cuando  $R^2$  se encuentra entre 0,7 y 0,89, moderada entre 0,4 a 0,69 y pobre con valores inferiores (Vargas, 1996).

$$R^2: \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde, para las tres ecuaciones anteriores:

- $X_i$ : Valores estimados.
- $Y_i$ : Valores observados.
- $\bar{X}, \bar{Y}$ : Valores estimados y observados promedio.
- $n$ : Número total de datos.

RMSE MBE y  $R^2$  han sido empleados por Flerchinger y otros (2009) para la comparación de algoritmos de detección de radiación de onada larga entrante. Raichijk y Taddei (2012), emplearon los mismos estadísticos, en un estudio comparativo de modelos empíricos de estimación de la radiación solar directa horaria. Ocampo y Rivas (2013), para la estimación de la radiación neta diaria, mediante modelos de regresión. Mientras que Tabari (2014), los utilizó para la validación y calibración de las ecuaciones de estimación de radiación solar diaria para el cálculo de la evapotranspiración.

Para alcanzar resultados del tercer objetivo, se emplearon gráficos de dispersión, que permitieron relacionar la fracción efectiva de radiación solar estimada u observada, respecto al porcentaje de nubosidad. Del mismo modo, se calculó  $R^2$  (Ec.3) para cada estación y para el dominio que considera las tres estaciones como un conjunto.



## **CAPÍTULO III**

### **ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR HORARIA A PARTIR DE UN MODELO BASADO EN LA TEMPERATURA DEL AIRE.**

#### **1. OBJETIVO ESPECÍFICO**

Estimación de la radiación solar horaria a partir de un modelo basado en la temperatura del aire a nivel superficial (2 m), y comparación con datos observados con sensores piranómetros; de las estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Quinoas (Parque Nacional Cajas).

#### **2. METODOLOGÍA**

##### **2.1. Descripción**

A fin de dar respuesta al primer objetivo, se utilizó la ecuación propuesta por Hargreaves-Samani (HS) para el cálculo de la radiación solar. La ecuación ha sido empleada en distintas investigaciones (Ugwu & Ugwauanyi, 2011) y propuesta por la Food and Agriculture Organization en FAO-56 (Allen et al., 2006). Además, la ecuación solamente necesita de un mínimo de información meteorológica (De Sousa et al., 2013).

Para el cálculo de la radiación solar según HS, es necesario contar con la variación de la temperatura y el valor de la radiación extraterrestre del periodo de cálculo. La humedad relativa no se incluye en el modelo, debido a que se encuentra implícita en la diferencia de temperatura (Ugwu & Ugwauanyi, 2011).



Además de la nubosidad y humedad, la latitud y elevación de la región estudiada, afectan la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas; factores que se encuentran incluidos en la ecuación para el cálculo de la radiación extraterrestre, que es un factor incluido en el modelo de HS (Ugwu & Ugwauanyi, 2011).

$$R_s = K_{rs} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

- $R_s$ : Radiación solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ ).
- $K_{rs}$ : Coeficiente de ajuste, calibrado en 0,16 para regiones de interior y 0,19 para regiones costeras\*.
- $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ : Temperatura máxima y mínima del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $R_a$ : Radiación extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ ).

\* Para el presente estudio se utiliza el coeficiente de 0,16.

Para conocer como varía el valor de radiación solar, al calcular el coeficiente de ajuste, Allen (1995) en (Tabari et al., 2014) propone:

$$K_{rs} = K_{ra} \left( \frac{P}{P_0} \right)^{0,5} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

- $K_{ra} = 0,17$ .
- $P$ : Presión atmosférica de la zona en estudio (kPa).
- $P_0$ : Presión atmosférica a nivel del mar (101,3 kPa).

Las siguientes ecuaciones, han sido tomadas de FAO-56 (Allen et al., 2006):

Al haberse propuesto el estudio de la radiación solar horaria, la ecuación que permitió el cálculo de la radiación solar extraterrestre horaria fue:



$$Ra = \frac{12 * 60}{\pi} G_{sc} dr [(\omega_2 - \omega_1) \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1)] \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

- $G_{sc}$ : Constante solar =  $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ .
- $dr$ : Distancia relativa inversa Tierra-Sol.
- $\omega_1$  y  $\omega_2$ : Ángulos de radiación al inicio y final del periodo (rad).
- $\varphi$ : Latitud (rad).
- $\delta$ : Declinación solar (rad).

$$dr = 1 + 0,33 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

- $J$ : día juliano

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi t_1}{24} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi t_1}{24} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

- $\omega$ : Ángulo solar en el que ocurre el punto medio del periodo considerado (rad).
- $t_1$ : Duración del periodo considerado (horas).

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t + 0,06667(Lz - Lm) + Sc) - 12] \quad (\text{Ec. 10})$$



Donde:

- t: Hora estándar en el punto medio del periodo considerado (hora).
- Lz: Longitud del centro de la zona de tiempo local (grados oeste de Greenwich).
- Lm: Longitud de la zona de medición (grados oeste de Greenwich).
- Sc: Corrección estacional para el tiempo solar (horas).

$$Sc = 0,1645 \sin 2b - 0,1255 \cos b - 0,025 \sin b \quad (\text{Ec. 11})$$

$$b = \frac{(2\pi(J - 81))}{364} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\delta = 0,409 \sin \left( \frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) \quad (\text{Ec. 13})$$

### **3. CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

#### **3.1. Información empleada y cálculos**

Para la estimación de la radiación solar fue necesario analizar los datos del periodo agosto 2013–julio 2014, según lo explicado en el capítulo II.

Para obtener la radiación solar estimada 1 ( $R_{SKrs1}$ ) (Ec. 4), se empleó el coeficiente de ajuste de 0,16 ( $Krs_1$ ), según lo propuesto por Hargreaves-Samani (1985) en (Allen et al., 2006).

Posteriormente, según lo indicado por Allen (1995) en (Tabari et al., 2014), se calculó el coeficiente de ajuste estimado ( $Krs_2$ ) (Ec. 5), para obtener la radiación solar estimada 2 ( $R_{SKrs2}$ ) (Ec.4).



Los resultados horarios de  $R_{SKrs1}$  y  $R_{SKrs2}$  ( $MJm^{-2} \text{ hora}^{-1}$ ), se analizaron estadísticamente (Ec. 1, 2 y 3) respecto a radiación solar observada en los sensores piranómetros ( $R_{S_{obs}}$ ).

#### **4. RESULTADOS**

A continuación se exponen los resultados obtenidos del análisis anteriormente explicado.

**Tabla 4.-** Valores de  $Krs_2$  para las estaciones meteorológicas: Toreadora, La Virgen y Chirimachay.

	<b>TOREADORA</b>	<b>LA VIRGEN</b>	<b>CHIRIMACHAY</b>
<b><math>Krs_2</math></b>	0,134	0,137	0,140

*$Krs_2$ : coeficiente de ajuste estimado para las condiciones locales.*

Analizando la Tabla 4, se deriva que  $Krs_2$  es menor a 0,16 en las tres estaciones; se observa además que  $Krs_2$  aumenta ligeramente a medida que disminuye la altura a la que se encuentra instalada cada estación (Tabla 2). Con respecto a  $Krs_2$ , en Toreadora es 15,85% inferior al valor propuesto (0,16) indicado por Allen (2006), 14,11% inferior en La Virgen y 12,42% inferior en Chirimachay.

Posteriormente, se obtuvieron  $R_{SKrs1}$  y  $R_{SKrs2}$  y se analizaron estadísticamente respecto a  $R_{S_{obs}}$ , en las tres estaciones (Tabla 5).





**Tabla 5.-** Análisis estadístico de  $R_{s_{Krs1}}$  y  $R_{s_{Krs2}}$  respecto a  $R_{s_{obs}}$ , en la microcuenca del río Quinoas.

	TOREADORA			LA VIRGEN			CHIRIMACHAY		
	$R_{s_{Krs1}}$	$R_{s_{Krs2}}$	$R_{s_{obs}}$	$R_{s_{Krs1}}$	$R_{s_{Krs2}}$	$R_{s_{obs}}$	$R_{s_{Krs1}}$	$R_{s_{Krs2}}$	$R_{s_{obs}}$
<b>Valor máx.</b>	2,03	1,71	4,38	1,76	1,51	4,20	1,78	1,55	4,25
<b>Valor min.</b>	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
<b>Promedio</b>	0,71	0,60	1,04	0,62	0,54	1,02	0,60	0,53	0,88
<b>RMSE</b>	0,67	0,75		0,74	0,81		0,68	0,73	
<b>MBE</b>	-0,33	-0,45		-0,39	-0,48		-0,28	-0,36	
<b>RMSE %</b>	64,51	72,34		73,08	79,62		77,15	82,74	
<b>MBE %</b>	-	-		-	-		-	-	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,54	0,54		0,51	0,51		0,50	0,50	

*Análisis para las estaciones: Toreadora, La Virgen y Chirimachay.*

*$R_{s_{Krs1}}$ : radiación solar con coeficiente de ajuste 0,16.  $R_{s_{Krs2}}$ : radiación solar con coeficiente de ajuste estimado para las condiciones locales.  $R_{s_{obs}}$ : Radiación solar observada en piranómetros. Valores máximos, mínimos, promedio y estadísticos incluidos.*

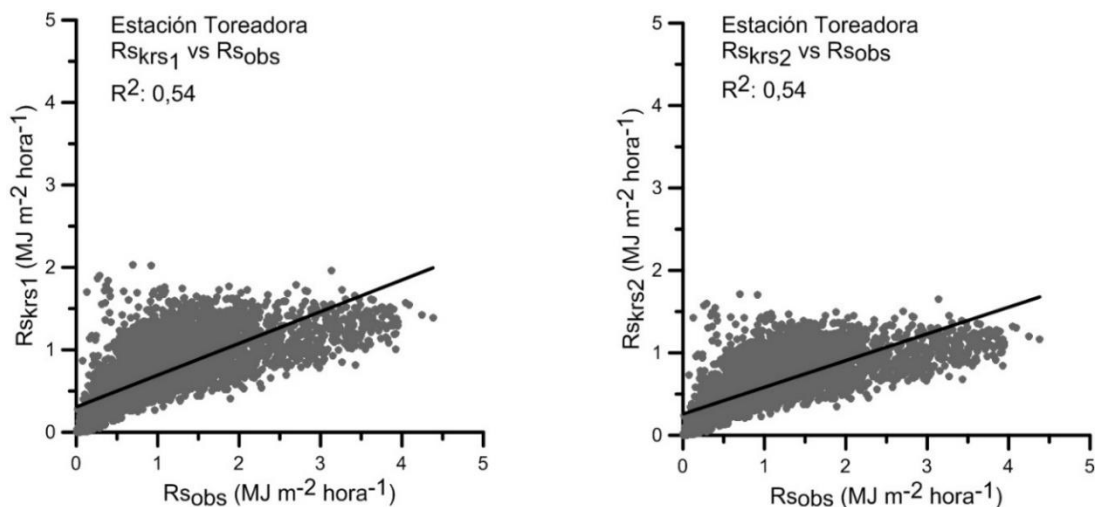
*Análisis realizado para el periodo de un año (agosto 2013–julio 2014).*

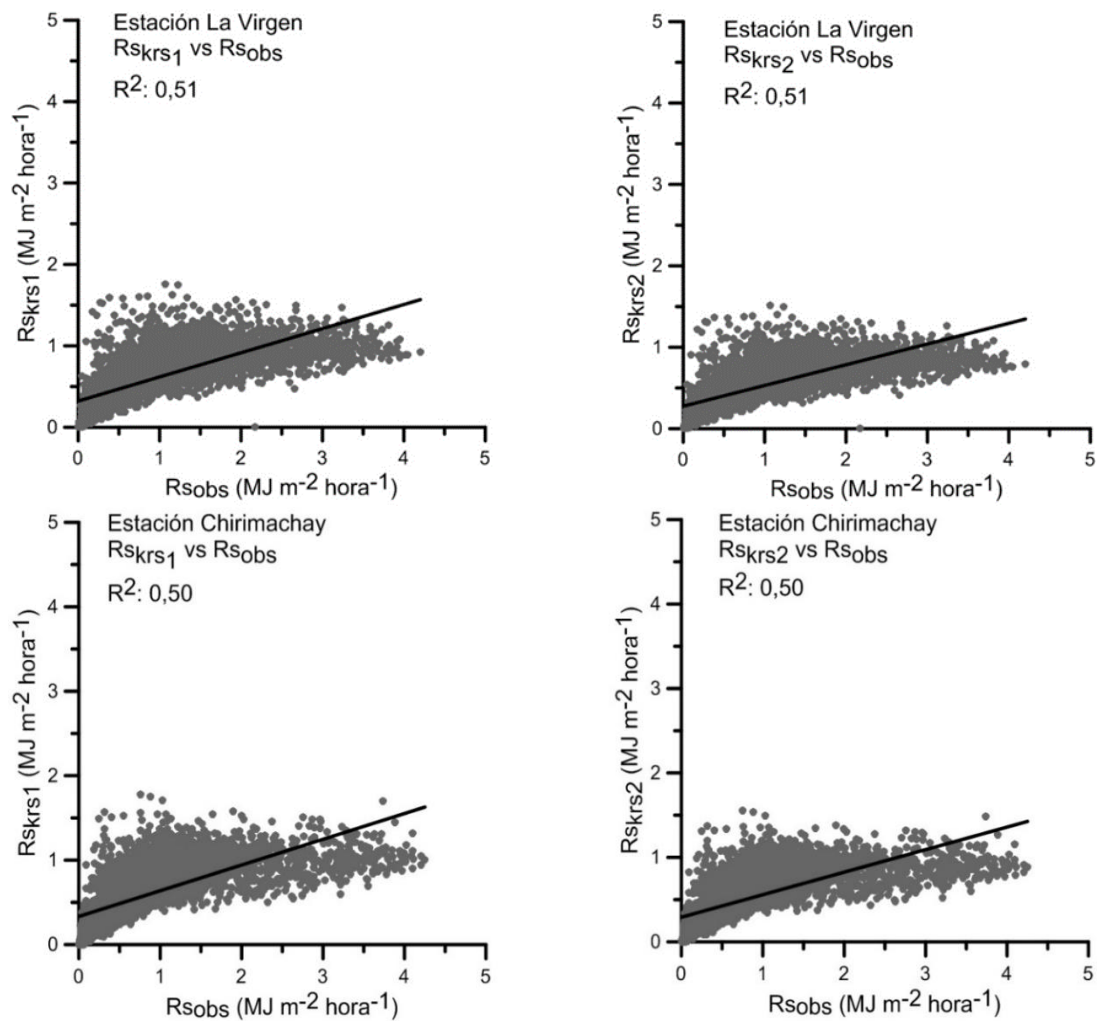
Los valores máximos de radiación solar se encuentran entre las 11:00:00 y 13:00:00 horas (observaciones en la base de datos), esto se debe a que los rayos de sol se reciben de manera directa sobre la superficie terrestre, atravesando una menor porción de atmósfera. Mientras que los valores mínimos de radiación solar se encuentran entre las 06:00:00 y 7:00:00 horas, ya que en la madrugada, radiación solar posee ángulos muy bajos que atraviesan una porción más grande de la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre. Se observa que los valores promedio de  $R_{s_{krs1}}$ ,  $R_{s_{krs2}}$  y  $R_{s_{obs}}$ , son relativamente mayores en la estación Toreadora, seguida de La Virgen y finalmente Chirimachay, durante el periodo estudiado, lo que coincide con la literatura (capítulo I), que indica que a mayor altura, mayor es la radiación solar.

Del análisis estadístico, los errores obtenidos con RMSE% y MBE%, con  $R_{Skrs1}$ , son inferiores a los obtenidos con  $R_{Skrs2}$ , para las tres estaciones; pero en ambos casos se consideran errores significativos.

Analizando solamente los resultados de  $R_{Skrs1}$  (debido a los menores errores, en comparación con  $R_{Skrs2}$ ), se observa que RMSE% fueron superiores a 64,51% encontrado Toreadora, siendo en Chirimachay donde se obtuvo el mayor error 77,15%. MBE% fueron de subestimación en las tres estaciones, con errores superiores a -31,77% encontrado en Chirimachay, siendo en La Virgen donde se obtuvo el mayor error de -38,66%.

Los resultados presentados en la Tabla 5, se puedan apreciar de manera más clara en los gráficos de dispersión (Figura 3).





**Figura 3.-** Gráficos de dispersión de  $R_{skrs1}$  y  $R_{skrs2}$  respecto a  $R_{sobs}$ , en la microcuenca del río Quinoas.

*Análisis para las estaciones: Toreadora, La Virgen y Chirimachay.*

*$R_{skrs1}$ : radiación solar con coeficiente de ajuste 0,16.  $R_{skrs2}$ : radiación solar con coeficiente de ajuste estimado para las condiciones locales.  $R_{sobs}$ : Radiación solar observada en piranómetros.*

*Análisis realizado para el periodo de un año (agosto 2013–julio 2014).*

De la Figura 3, al comparar los resultados de  $R^2$ , se infiere que existe una relación positiva entre los parámetros analizados. El valor promedio (tres estaciones) de  $R^2$ , sea de  $R_{skrs1}$  o de  $R_{skrs2}$ , es 0,52; que corresponde a un 52% de relación, considerada como moderado.



## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El capítulo tuvo como objetivo estimar radiación solar horaria a partir del modelo HS, basado en la temperatura máxima y mínima del aire, a nivel superficial (2 m). Posteriormente se comparó estadísticamente, los valores estimados mediante el modelo, con las observaciones realizadas en sensores piranómetros. El estudio se desarrolló en tres estaciones meteorológicas: Toreadora, La Virgen y Chirimachay, ubicadas en la microcuenca del río Quinoas (Parque Nacional Cajas), durante un periodo de un año (agosto 2013 – julio 2014).

Se estimó la radiación solar horaria mediante HS (Ec. 4), y mediante HS con coeficiente de ajuste estimado (Ec.4 + Ec. 5), basado en la presión atmosférica del ecosistema estudiado. Los coeficientes de ajuste estimados fueron, en las tres estaciones, inferiores al valor del coeficiente de ajuste propuesto (0,16) en el modelo HS; lo cual concuerda con la investigación llevada a cabo por Tabari (2014), donde se calibró el coeficiente de ajuste para la estimación de la radiación solar diaria, en regiones áridas y semiáridas. Por otro lado, de Sousa (2013) calibró la ecuación de HS para una región sub-húmeda de Brasil, basándose en regresiones lineales del coeficiente original; al igual que en el caso anterior, obtuvo un coeficiente de ajuste inferior al propuesto por Hargreaves-Samani.

Posteriormente, se compararon los estadísticos obtenidos de  $R_{SKrs1}$  y  $R_{SKrs2}$  (radiación solar con coeficiente de ajuste propuesto y con coeficiente de ajuste estimado, respectivamente). Para  $R_{SKrs1}$ , los RMSE% fueron superiores a 64,51% y los MBE% de las tres estaciones, fueron de subestimación, siendo -31,77% el menor error. Mientras que con  $R_{SKrs2}$ , los estadísticos RMSE% y MBE% de las tres estaciones, mostraron errores superiores a los encontrados con  $R_{SKrs1}$ . Por lo tanto, el cálculo del coeficiente de ajuste, no mejoró la relación entre los valores observados y estimados de radiación solar horaria. Resultados similares encontró Tabari (2014), que obtuvo valores RMSE y MBE menores con



coeficiente de ajuste de 0,16, que con el coeficiente de ajuste calculado para las regiones estudiadas. Sin embargo, las estimaciones de Tabari (2014) con el modelo de HS sin modificaciones, tuvo un buen rendimiento. Por el contrario, de Sousa (2013), obtuvo mejores resultados con la ecuación de HS con coeficiente de ajuste estimado; la mejor respuesta del modelo HS, probablemente se deba la distinta ecuación empleada en el cálculo del coeficiente de ajuste.

Analizando solamente los resultados obtenidos con HS sin modificaciones (Ec. 4), debido a los menores errores encontrados (en comparación con los obtenidos al estimar el coeficiente de ajuste) para el ecosistema en particular, se consideró que posee errores significativos tanto de RMSE% como de MBE%, y la relación lineal promedio fue moderada 0,52. Mientras que Tabari (2014), al calcular la radiación solar diaria con HS, obtiene RMSE% y MBE% inferiores a los obtenidos en la presente investigación; al igual que Ugwu (2011), al emplear la ecuación de HS, para el cálculo de la radiación solar diaria en Albuja (región de la Savana), donde obtuvo un RMSE considerado no significativo, aunque el modelo tuvo una tendencia a sobreestimar y subestimar valores y un  $R^2$  elevado.

Las diferencias entre los resultados encontrados en la presente investigación, llevada a cabo un ecosistema de páramo, y las investigaciones de Tabari (2014) y de Ugwu (2011), pueden deberse a las distintas características de los ecosistemas y a los diferentes periodos de análisis. Probablemente, el modelo de HS no genere estimaciones deseables en los ecosistemas de páramo, por las condiciones climáticas extremas que los caracterizan, especialmente por elevada radiación solar que presentan, debido a su altura sobre el nivel de mar y ubicación ecuatorial. No obstante, un análisis horario de los factores meteorológicos, minimiza los errores generados en su estimación; errores que en periodos de tiempo más largos (por ejemplo diario/mensual) pueden compensarse, y por lo tanto omitirse.



Se concluye que la ecuación de HS no proporciona una respuesta significativa en la estimación de la radiación solar para la zona de estudio. Es decir, existe una escasa relación entre los valores de radiación solar estimados mediante la ecuación HS y los observados en sensores piranómetros; relación que se ha considerado pobre. Además, se observa que los errores se incrementan con el cálculo del coeficiente de ajuste (Ec. 5), como variable en el cálculo de la radiación solar mediante HS. Por lo que, para el caso particular, es preferible utilizar el modelo de HS sin correcciones.

Para futuros estudios, se recomienda estimar la radiación solar probando otros modelos matemáticos, con la finalidad de encontrar una ecuación que genere una relación aceptable respecto a la radiación solar observada en los sensores piranómetro. La finalidad sería encontrar un modelo matemático que pueda ser empleado para el cálculo de la radiación solar, en ecosistemas con similares características a las del presente estudio, que no cuenten los equipos meteorológicos necesarios.



## CAPITULO IV

# ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN NETA HORARIA A PARTIR DE UN MODELO BASADO EN LA TEMPERATURA DEL AIRE Y EN LA RADIACIÓN SOLAR.

## 1. OBJETIVO ESPECÍFICO

Estimación de la radiación neta horaria a partir de un modelo basado en la temperatura (2 m) y en la radiación solar a nivel superficial, y comparación con datos observados en radiómetros netos; de las estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Quinoas (Parque Nacional Cajas).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Descripción

Para cumplir con el segundo objetivo, se emplearon ecuaciones indicadas por Food and Agriculture Organization en FAO-56 (Allen et al., 2006):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

- $R_n$ : Radiación neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ ).
- $R_{ns}$ : Radiación neta solar ( $\text{MJm}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ ).
- $R_{nl}$ : Radiación terrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ ).

$$R_{ns} = R_s (1 - \alpha) \quad (\text{Ec. 15})$$



Donde:

- $\alpha$ : Albedo= 0,23
- $R_s$ : Radiación solar ( $\text{MJm}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ )\*.

$$R_{nl} = \sigma (T^4) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

- $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann =  $2,043 \times 10^{-10} \text{ MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$
- $T$ : Temperatura en la hora (K).
- $e_a$ : Presión de vapor real (kPa).
- $R_s$ : Radiación solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ ).
- $R_{so}$ : Radiación en un día despejado ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ ).

$$e_a = \frac{\left[ e^\circ(T_{\min}) \left( \frac{HR_{\max}}{100} \right) + e^\circ(T_{\max}) \left( \frac{HR_{\min}}{100} \right) \right]}{2} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

- $e^\circ(T_{\min})$  y  $e^\circ(T_{\max})$ : Temperatura de saturación de vapor a la temperatura máxima y mínima (kPa).
- $HR_{\max}$  y  $HR_{\min}$ : Humedad relativa máxima y mínima (%).

$$e^\circ(T) = 0,6108 \exp\left[\frac{17,27 * T}{T+273,3}\right] \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

- $e^\circ(T)$ : Temperatura de saturación de vapor a la temperatura del aire (kPa).
- $T$ : Temperatura del aire ( $^\circ\text{C}$ ).

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5}z) R_a \quad (\text{Ec. 19})$$





Donde:

- z: Elevación de la estación sobre el nivel del mar (m).
- Ra: Radiación solar extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ )\*.

*\*Las estimaciones de  $R_s$  se obtienen mediante la metodología indicada en el capítulo III (Ec. 4). Los valores de la radiación solar extraterrestre, para el periodo de estudio octubre-diciembre 2014 se calculan con la ecuación 6 del capítulo III.*

### **3. CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

#### **3.1. Información empleada y cálculos**

Para la estimación de la radiación neta fue necesario analizar los datos del periodo octubre-diciembre 2014, según lo explicado en el capítulo II.

Para calcular la radiación neta estimada 1 ( $R_{n_{Krs1}}$ ) (Ec.14), se empleó (Ec. 4) para la estimación de la radiación solar, la radiación terrestre se calculó mediante (Ec.16).

Las observaciones de los sensores piranómetros y la ecuación para la estimación de la radiación terrestre (Ec.16), se emplearon para el cálculo de la radiación neta estimada 2 ( $R_{n_{est}}$ ) (Ec.14).

Es importante mencionar que se ha decidido emplear la ecuación 4, para el cálculo de la radiación solar (que a su vez permite el cálculo de la radiación neta solar, ecuación15) para el cálculo de la radiación neta (Ec. 14). Debido a que la ecuación de Hargreaves-Samani (Ec. 4) es ampliamente empleada para la estimación de la radiación neta, y a su vez, para la estimación de la evapotranspiración, además de ser propuesta por FAO-56 (Allen et al., 2006).



Los resultados horarios de  $Rn_{Krs1}$  y  $Rn_{est}$  ( $MJm^{-2} \text{ hora}^{-1}$ ), se analizaron estadísticamente (Ec. 1, 2 y 3) respecto a la radiación neta observada en los radiómetros netos ( $Rn_{obs}$ ).

#### 4. RESULTADOS

A continuación se exponen los resultados obtenidos del análisis anteriormente explicado.

**Tabla 6.-** Análisis estadístico de  $Rn_{Krs1}$  y  $Rn_{est}$ , en la microcuenca del río Quinoas.

	TOREADORA			LA VIRGEN			CHIRIMACHAY		
	$Rn_{Krs1}$	$Rn_{est}$	$Rn_{obs}$	$Rn_{Krs1}$	$Rn_{est}$	$Rn_{obs}$	$Rn_{Krs1}$	$Rn_{est}$	$Rn_{obs}$
<b>Valor máx.</b>	1,40	2,83	3,01	1,32	2,67	3,00	1,35	2,29	3,17
<b>Valor min.</b>	0,05	0,02	-0,20	0,05	0,05	-0,20	0,06	0,03	-0,18
<b>Promedio</b>	0,56	0,75	0,60	0,52	0,75	0,63	0,51	0,60	0,61
<b>RMSE</b>	0,45	0,20		0,54	0,20		0,60	0,25	
<b>MBE</b>	-0,04	0,14		-0,11	0,12		-0,10	-0,01	
<b>RMSE %</b>	75,28	33,70		85,60	32,26		98,84	41,89	
<b>MBE %</b>	-7,07	23,98		-18,01	19,41		-16,61	-1,51	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,53	0,95		0,47	0,96		0,42	0,97	

*Análisis para las estaciones: Toreadora, La Virgen y Chirimachay.*

*$Rn_{Krs1}$ : radiación neta calculada con la radiación solar con coeficiente de ajuste 0,16.  $Rn_{est}$ : radiación neta calculada con la radiación solar observada en piranómetros.  $Rn_{obs}$ : radiación neta observada en radiómetros netos.*

*Análisis realizado para un periodo de tres meses (octubre-diciembre 2014).*

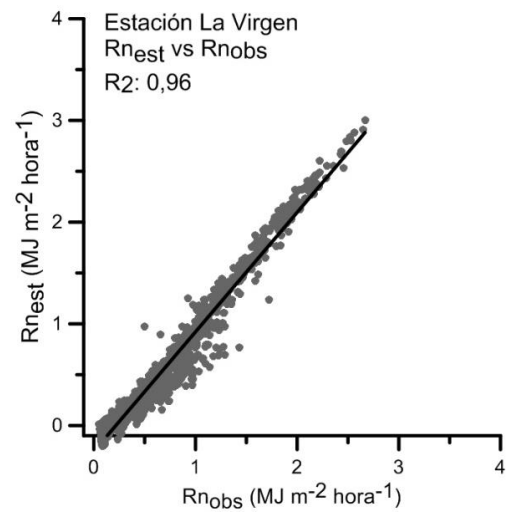
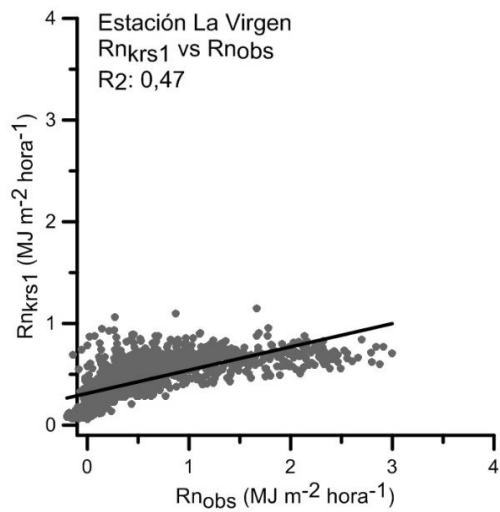
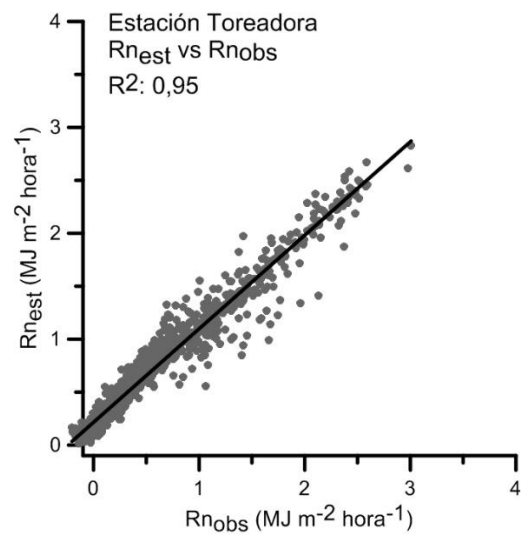
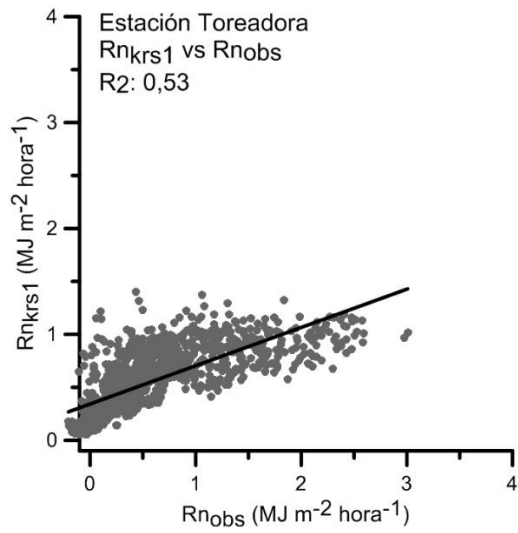


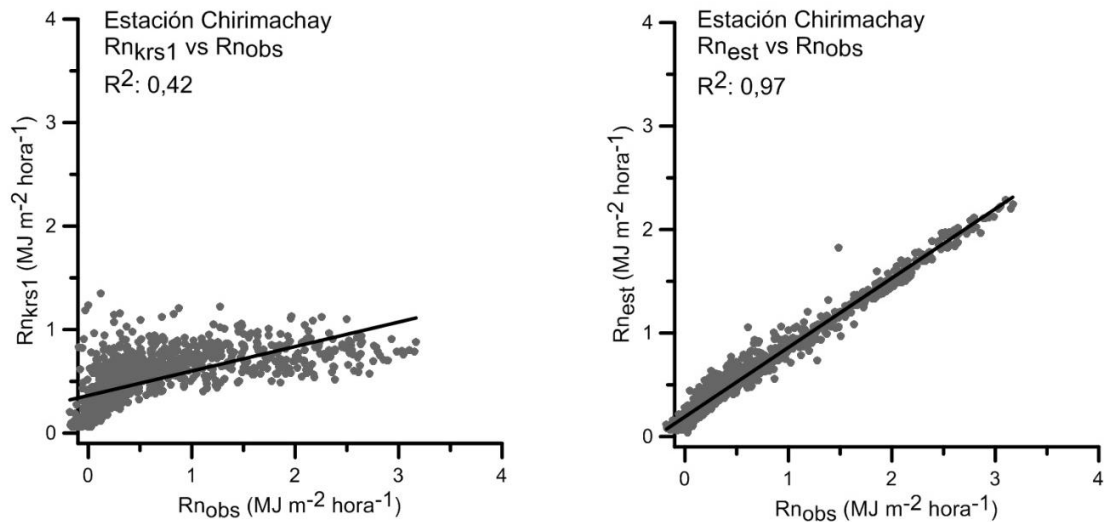
En la Tabla 6 (y en la base de datos del objetivo en estudio), los valores máximos de radiación neta observados se encuentran alrededor del mediodía (11:00:00 y 13:00:00 horas); lo cual se debe a que la radiación solar es mayor a la radiación terrestre; por lo contrario, los menores valores de radiación neta se encuentran en la madrugada (06:00:00-07:00:00 horas) o anochecer (17:00:00-18:00:00 horas), que corresponde a las horas donde la radiación terrestre es mayor a la radiación solar.

Del análisis estadístico, se observa que con  $R_{n_{krs1}}$ , los RMSE% son significativamente mayores a los obtenidos con  $R_{n_{est}}$ , y MBE% presentó subestimaciones en las tres estaciones. En  $R_{n_{krs1}}$ , el estadístico RMSE% obtuvo valores superiores al 75,28% encontrado en Toreadora y el mayor MBE% fue de subestimación -18,01% en La Virgen.

Con respecto a los resultados obtenidos con  $R_{n_{est}}$  (mediante observaciones de radiación solar en sensores piranómetros y la ecuación 16 para radiación terrestre), se observa que el mayor RMSE% fue 41,89% en Chirimachay, mientras que en La Virgen se obtuvo el menor error 32,26%. Respecto a MBE%, se observa que presentó sobrestimaciones en Toreadora y La Virgen, siendo en Toreadora el mayor error 23,98% y en Chirimachay el -1,51%.

A continuación se indican gráficos de dispersión, que indican la relación lineal entre  $R_{n_{krs1}}$  y  $R_{n_{est}}$  con respecto a  $R_{s_{obs}}$  (Figura 4).





**Figura 4.-** Gráficos de dispersión de  $Rn_{krs1}$  y  $Rn_{est}$  respecto a  $Rn_{obs}$ , en la microcuenca del río Quinoas.

*Análisis para las estaciones: Toreadora, La Virgen y Chirimachay.*

*$Rn_{Krs1}$ : radiación neta calculada con la radiación solar con coeficiente de ajuste 0,16.  $Rn_{est}$ : radiación neta calculada con la radiación solar observada en piranómetros.  $Rn_{obs}$ : radiación neta observada en radiómetros.*

*Análisis realizado para un periodo de tres meses (octubre-diciembre 2014).*

De la Figura 4, se observa que la relación lineal entre  $Rn_{krs1}$  y  $Rn_{obs}$  es moderada; por el contrario, entre  $Rn_{est}$  y  $Rn_{obs}$ , se considera excelente, ya que en promedio, para las tres estaciones, el ajuste entre las variables es de 0,96 que corresponde al 96%, considerado excelente.



## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este capítulo tuvo como objetivo estimar la radiación neta horaria a partir de las ecuaciones propuestas por FAO-56, en base a las temperaturas máximas y mínimas del aire (2 m), y en base a las observaciones de radiación solar en sensores piranómetros. Posteriormente se comparó estadísticamente las estimaciones realizadas, con las observaciones de radiómetros netos. El estudio se desarrolló en las estaciones meteorológicas: Toreadora, La Virgen y Chirimachay, ubicadas en la microcuenca del río Quinoas (Parque Nacional Cajas), durante un periodo de tres meses (octubre - diciembre 2014).

$R_{n_{est}}$ , calculado con la radiación solar observada en sensores piranómetros, presentó valores RMSE% y MBE% inferiores a los obtenidos con  $R_{n_{krs1}}$  (calculada con la radiación solar estimada mediante HS). Con  $R_{n_{est}}$ , el mayor valor RMSE% fue 41,89% y el mayor MBE% fue de sobrestimación con 23,98%. Con  $R_{n_{est}}$ , el análisis de ajuste lineal  $R^2$  fue 0,96, considerado alto; mientras que con  $R_{n_{krs1}}$  el ajuste se redujo a 0,47. En una investigación realizada por Ocampo (2013), donde se calculó la radiación neta, en ecosistemas subhúmedos y húmedos, se obtuvo relaciones similares a las encontradas con  $R_{n_{est}}$ . Es necesario indicar que en la investigación de Ocampo (2013), la radiación solar se calculó mediante otra ecuación, propuesta en FAO-56 y la radiación terrestre, al igual que en el presente estudio, se calculó mediante la ecuación 16. Ocampo (2013) demostró que la estimación de la radiación neta propuesta, es una alternativa a emplear en el cálculo de la evapotranspiración. Por otro lado, existen investigaciones en las que se presta mayor atención a la radiación terrestre; como la llevada a cabo por Wang y Liang (2009), en la que estima la radiación neta basándose en el análisis de las superficies de cultivo y nubosidad, en veinticuatro zonas distintas, obteniendo excelentes resultados, con bajos valores RMSE y MBE, con una excelente correlación lineal.



Con respecto al estudio realizado, los resultados encontrados con  $Rn_{krs1}$ , concuerdan con los hallazgos del capítulo III, relacionados con el bajo rendimiento de la ecuación propuesta por HS para el cálculo de la radiación solar, debido a la propagación del error precedente. Por lo tanto, para futuras investigaciones sobre este ecosistema, se recomienda discreción en el empleo de la ecuación de HS para obtener la radiación solar, incluida en el cálculo de la radiación neta; ya que la relación entre la radiación neta observada en los radiómetros y la estimada según las ecuaciones de FAO-56, es considerada pobre para los ecosistemas de páramo.

Los valores de radiación solar observada en los sensores piranómetros, poseen un alto rendimiento; y se consideran como una variable excelente para el cálculo de la radiación neta. Lo mencionado se debe a que, los errores generados en la estimación de la radiación neta, con las observaciones en sensores piranómetros, son significativamente inferiores a las obtenidas en la radiación neta con estimaciones de radiación solar mediante HS.

Se recomienda la estimación de la radiación terrestre probando otros modelos matemáticos, propuestos en bibliografía pertinente; a fin de analizar el comportamiento de la radiación terrestre estimada, respecto a la radiación terrestre observada. Posiblemente el un modelo matemático distinto al empleado en el presente estudio (Ec. 16), permita obtener una mejor estimación de la radiación neta en el ecosistema estudiado.



## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA NUBOSIDAD RESPECTO A LA RADIACIÓN SOLAR, EN EL ÁREA APROXIMADA DE DETECCIÓN DE LOS SENSORES PIRANÓMETROS.**

#### **1. OBJETIVO ESPECÍFICO**

Análisis de la influencia de la nubosidad con respecto a la radiación solar que cubre el área aproximada de detección de los sensores piranómetros, por medio de imágenes satelitales Landsat; en las estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Quinoas (Parque Nacional Cajas).

#### **2. METODOLOGÍA**

##### **2.1. Descripción**

En este capítulo se efectuó un primer acercamiento para análisis de la influencia de la nubosidad con respecto a la radiación solar en ecosistemas de páramo. El análisis se realizó mediante observaciones en imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ SLC Off, generando tres dominios de observación terrestre de la radiación de modo empírico, basado en la representatividad de medición que tienen los piranómetros de las estaciones.

Es preciso señalar que la banda 1 o canal visible (azul), con longitudes de onda de 0,45 a 0,52  $\mu\text{m}$  (U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey, 2013), identifica las nubes bajas, lo se debe a la elevada reflectividad de las nubes (Martinuzzi, Gould, & González, 2007; Massons & Domingo, 1997). Sin embargo la banda 1, no considera los efectos de las sombras proyectadas sobre el suelo.





El nadir sobre la zona de estudio para el satélite Landsat 7 (Path 10 Row 62) se ubica aproximadamente entre las 10:20:00-10:25:00 horas. Durante el periodo de estudio agosto 2013 - julio 2014 se generaron 22 imágenes satelitales. Para el estudio, se estableció un método monoespectral, empleando la banda 1 del paquete de datos de cada imagen satelital; debido a que por análisis visual se determinó que es la banda más representativa en la zona estudiada, con respecto al parámetro a analizar (nubosidad).

### **3. CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

#### **3.1. Información empleada y cálculos**

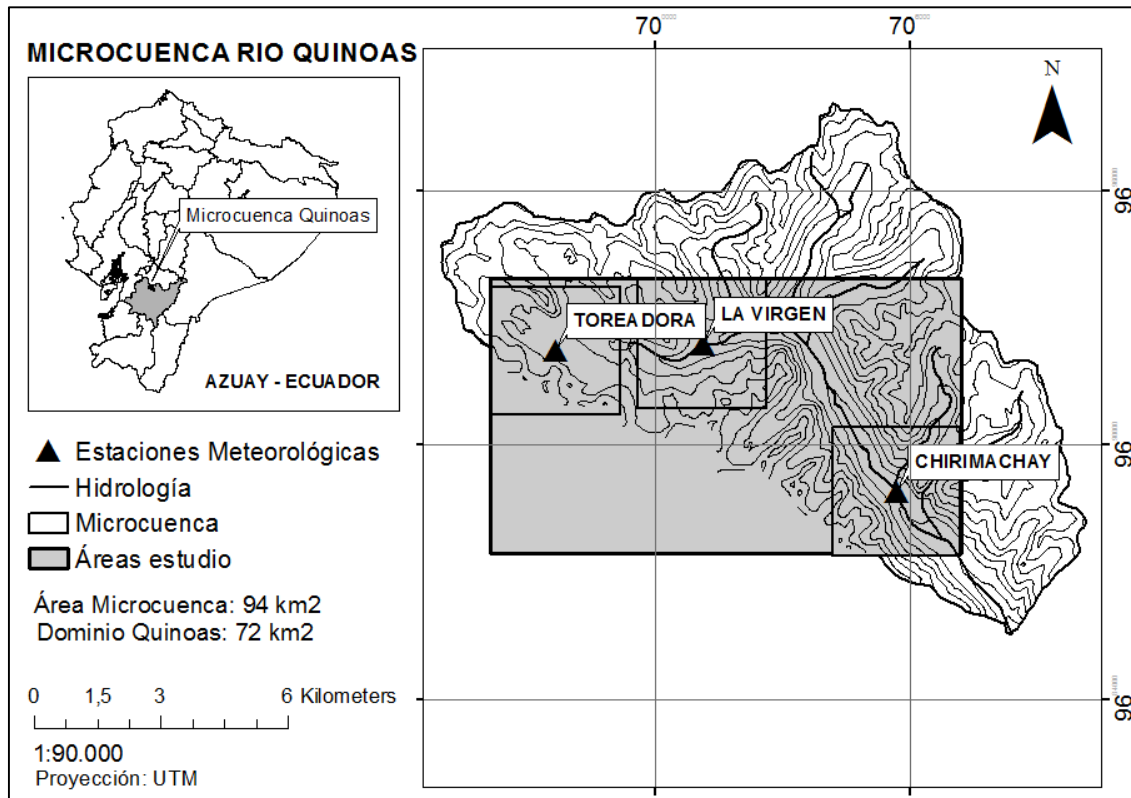
En las imágenes Landsat ETM+ SLC Off, cada pixel de la banda 1 tiene un área de 30 x 30 m, con un nivel digital (ND) entre 0 y 255 (capítulo I). El software ArcGis 10.1 permitió analizar el número de pixeles con un ND igual o mayor a 120, que corresponden a nubosidad en la banda 1 (Martinuzzi et al., 2007).

Posteriormente, se creó una máscara de nubosidad con un radio de 1,5 km alrededor de cada piranómetro; que correspondería al área de detección de los piranómetros en cuya extensión se reduce significativamente la desviación estándar de los errores generados (Moradi et al., 2008). Es la aproximación más adecuada si se considera un análisis plano, que no contempla efectos de la topografía (pendiente y aspecto) en zonas montañosas. El diseño de un experimento incluyendo estas variables, es potencialmente un tema de investigación a futuro.



El área de dominio sobre cada estación correspondió a 9,18 Km<sup>2</sup>; y el dominio conjunto, incluyendo las tres estaciones, el área fue de 72,26 Km<sup>2</sup> (dominio Quinoas) que delimita de manera empírica un área que no genera traslape entre las observaciones de cada estación (Figura 5). Este enfoque no considera los efectos de la topografía del terreno y otras interferencias que podrían estarse generando, es decir, considera el área representativa usando un dominio plano.

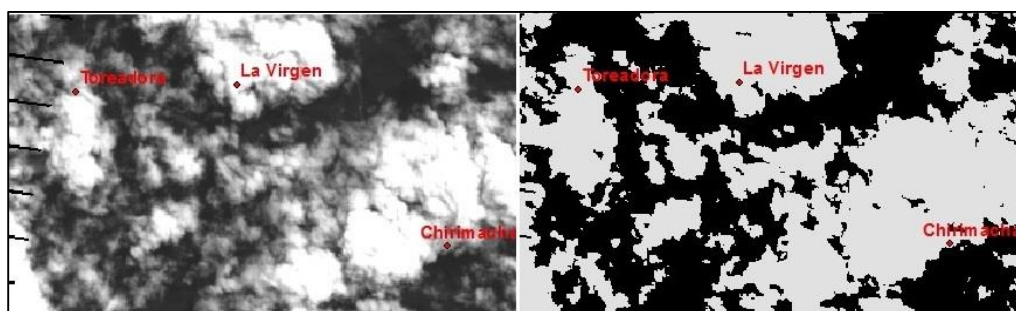
Es necesario mencionar que el bandeo en las imágenes Landsat ETM+ SLC Off (capítulo I), tuvo una variación entre 0,87 y 0,39% para el dominio Quinoas, y entre 6,85 y 3,09% para la estación Treadora; mientras que en las estaciones La Virgen y Chirimachay no se presentó bandeo. Esto se debe a que la mayor parte del área estudiada se encuentra en la parte central de la imagen satelital (capítulo I); lo que disminuyó significativamente influencia del bandeo sobre las áreas en estudio. En base a este análisis previo, se consideró no indispensable realizar corrección alguna al bandeo de las imágenes para el presente estudio.



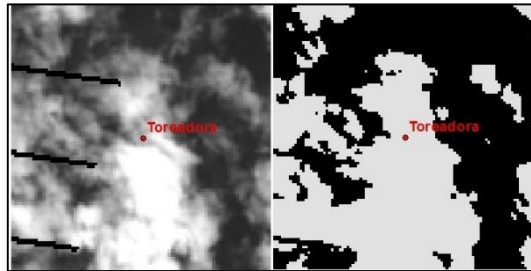
**Figura 5.-** Microcuenca del río Quinoas, áreas en estudio.

*Se indican los cuadrantes estudiados, correspondientes a las estaciones meteorológicas: Toreadora, La Virgen y Chirimachay y dominio Quinoas. Fuente propia.*

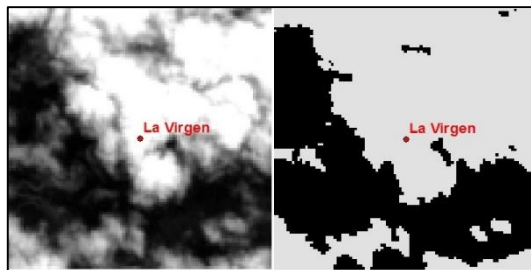
Con la finalidad de ejemplificar lo mencionado, se adjuntaron figuras que indican el análisis de la banda 1 para el dominio Quinoas y las estaciones Toreadora, La Virgen y Chirimachay (Figura 6). Las cuales corresponden a la imagen satelital del 31-05-2014.



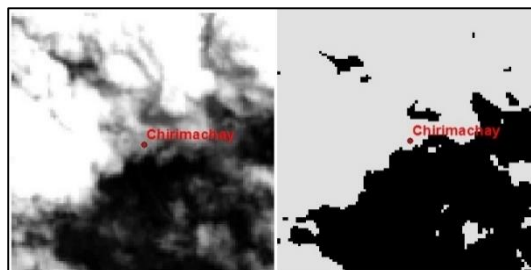
*Izquierda: banda 1. Derecha: máscara de nubosidad.*



*Izquierda: banda 1. Derecha: máscara de nubosidad.*



*Izquierda: banda 1. Derecha: máscara de nubosidad.*



*Izquierda: banda 1. Derecha: máscara de nubosidad.*

**Figura 6.-** Análisis de la nubosidad en la banda 1, imagen satelital Landsat ETM+ SLC Off (B1).

*Análisis para el dominio Quinoas, y las estaciones: Toreadora, La Virgen y Chirimachay.*

*Se indica la banda 1 (izquierda) y la cobertura nubosa detectada (derecha). En las imágenes de la derecha, el color gris corresponde a nubosidad y negro a zonas despejadas.*

*Imagen Landsat ETM+ SLC Off (B1) del día 31-05-2014.*



Posteriormente se analizó la relación entre el porcentaje de cobertura nubosa en cada imagen (Tabla 7), respecto a la fracción efectiva radiación solar en cada área en estudio. La fracción efectiva de radiación solar se calculó con  $R_{SKrs1}$  (Ec. 4) y  $R_{Sobs}$  (piranómetros), representadas con  $R_{SKrs1}Ra^{-1}$  y  $R_{Sobs}Ra^{-1}$  respectivamente. La relación entre los parámetros se realizó para el minuto en el que fue tomada cada imagen satelital.

Para el análisis se empleó  $R_{SKrs1}$  mediante HS (Ec. 4), según lo indicado en el capítulo III. Lo presentado se realiza con la finalidad de observar como varía la fracción efectiva de radiación solar estimada mediante HS, al compararla con la radiación solar observada en los sensores piranómetro; ambos respecto al porcentaje de nubosidad analizada.

Los valores de  $R_a$ ,  $R_{Sobs}$  y  $R_{SKrs1}$  ( $MJ\ m^{-2}\ min^{-1}$ ) se obtuvieron de la base de datos del primer periodo (agosto 2013-julio 2014), de acuerdo al método indicado en el capítulo II, y mediante la aplicación de las ecuaciones del capítulo III. Para obtener  $R_{Sobs}Ra^{-1}$  y  $R_{SKrs1}Ra^{-1}$  del dominio Quinoas, se calculó la media de  $R_{Sobs}$  y  $R_{SKrs1}$  de las tres estaciones.

Para el análisis estadístico se crearon gráficos de dispersión entre el porcentaje de nubosidad y  $R_{SKrs1}Ra^{-1}$  o  $R_{Sobs}Ra^{-1}$  (Figura 7). Finalmente se calculó  $R^2$  entre los dos parámetros meteorológicos (Tabla 8) de cada estación y del dominio Quinoas, con el propósito de observar la relación existente entre los mismos.

#### **4. RESULTADOS**

A continuación se exponen los resultados obtenidos del análisis anteriormente explicado, respecto al porcentaje de nubosidad obtenido en las veintidós imágenes satelitales, sobre cada área estudiada.



Los valores de  $R_{Krs1}Ra^{-1}$  y  $R_{obs}Ra^{-1}$  se indican en el Anexo 2.

**Tabla 7.-** Porcentaje de nubosidad sobre el área de detección se los sensores piranómetros, en la microcuenca del río Quinoas.

N	Fecha	Hora	TOREADORA	LA VIRGEN	CHIRIMACHA Y	DOMINIO QUINOAS
			% Nubosidad	% Nubosidad	% Nubosidad	% Nubosidad
1	16/08/2013	10:22:24	88,49	91,67	100,00	95,02
2	01/09/2013	10:22:35	92,82	99,90	100,00	97,90
3	17/09/2013	10:22:46	77,50	84,94	27,61	74,54
4	03/10/2013	10:22:57	93,47	100,00	100,00	98,49
5	19/10/2013	10:23:08	0,01	0,98	3,77	3,28
6	04/11/2013	10:23:13	0,00	0,00	0,00	0,61
7	20/11/2013	10:23:16	93,21	99,92	100,00	98,27
8	06/12/2013	10:23:26	39,30	3,25	44,48	34,87
9	22/12/2013	10:23:28	36,85	20,61	17,64	29,15
10	07/01/2014	10:23:32	96,05	97,88	90,11	94,52
11	23/01/2014	10:23:50	99,85	100,00	100,00	99,85
12	08/02/2014	10:23:58	97,80	86,09	99,47	97,38
13	24/02/2014	10:23:48	96,90	100,00	100,00	99,44
14	12/03/2014	10:23:55	86,35	99,97	100,00	97,06
15	28/03/2014	10:24:03	19,57	2,50	1,52	7,36
16	13/04/2014	10:24:09	93,15	100,00	100,00	98,38
17	29/04/2014	10:24:19	93,88	100,00	99,19	98,17
18	15/05/2014	10:24:25	98,29	99,96	100,00	99,75
19	31/05/2014	10:24:29	46,79	58,17	60,66	52,82
20	16/06/2014	10:24:29	82,26	93,92	100,00	95,01
21	02/07/2014	10:24:36	1,36	0,23	9,01	2,16
22	18/07/2014	10:24:38	62,77	99,01	99,96	93,14

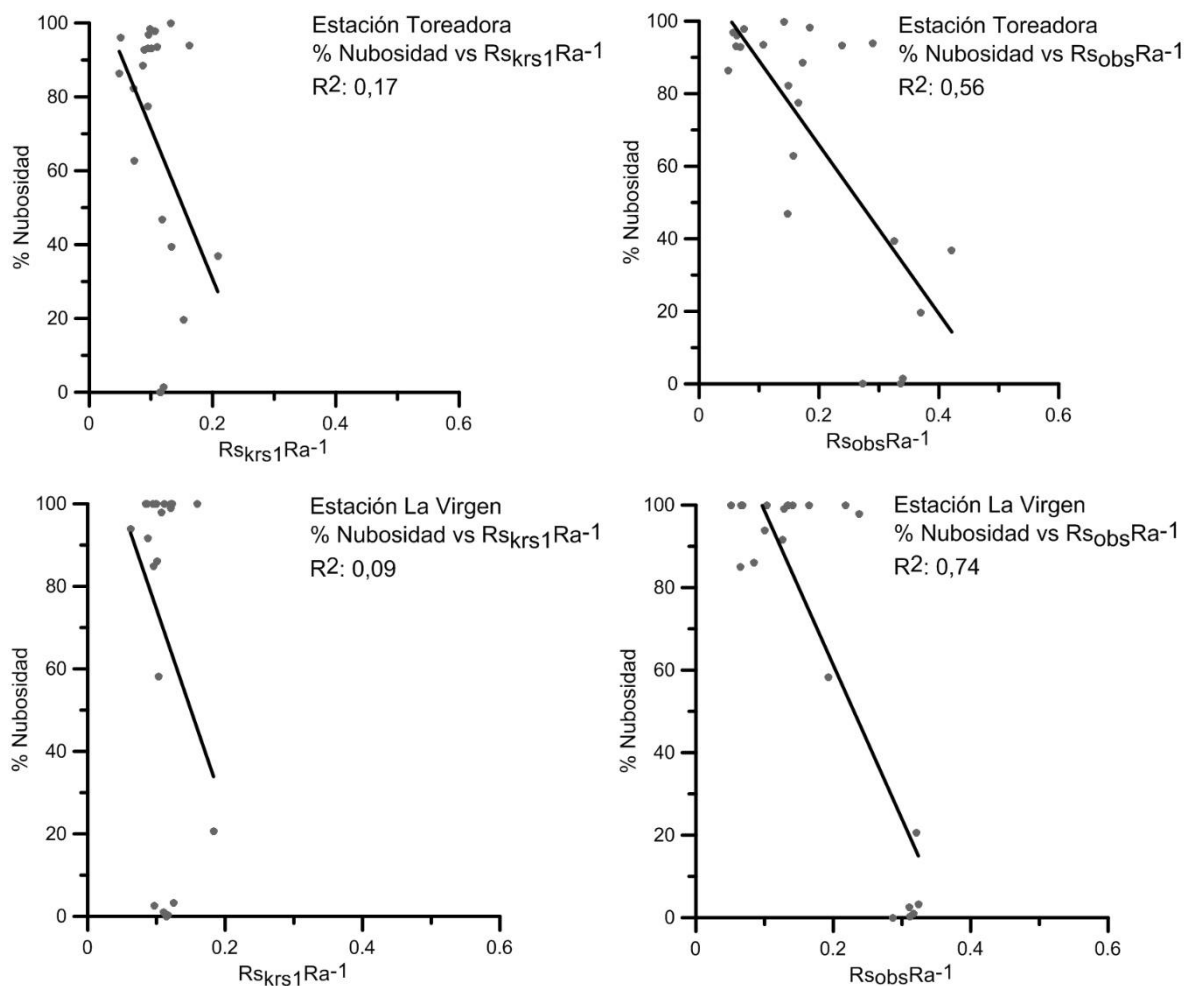
*Porcentaje (%) de Nubosidad obtenido del análisis de las imágenes satelitales Landsat ETM+ (B1) SLC Off, de cada de área de detección de los piranómetros, para las estaciones Toreadora, La Virgen y Chirimachay y el dominio Quinoas.*

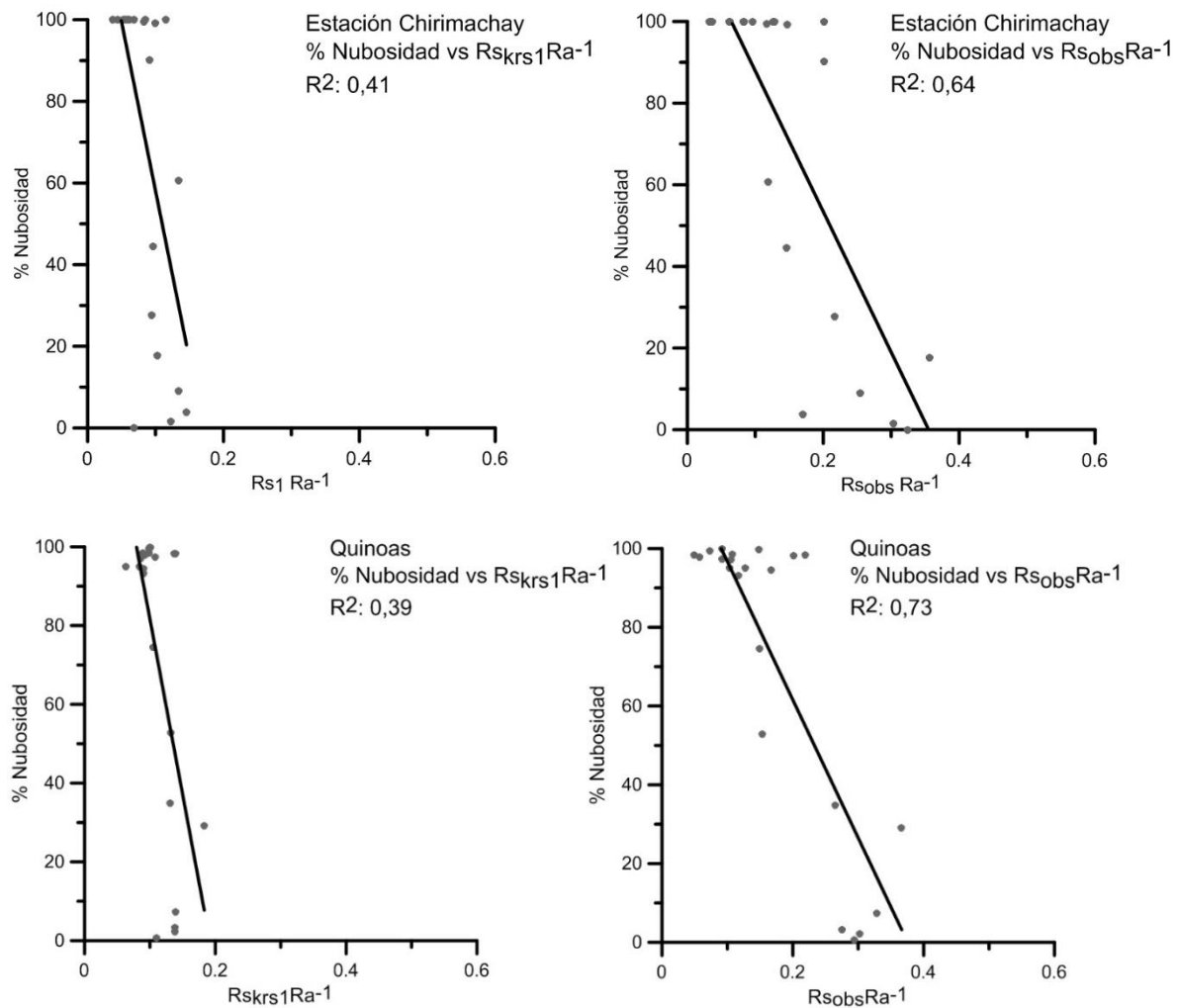
*Análisis de la nubosidad realizado con las 22 imágenes satelitales disponibles para el periodo de un año (agosto 2013-julio 2014).*



Se observa que para la mayoría de las imágenes satelitales, el porcentaje de cobertura nubosa sobre el área de detección de los sensores piranómetros, en cada estación, es similar. Para el dominio Quinoas, catorce imágenes (63,64%) obtuvieron una cobertura nubosa mayor al 90%; mientras que cuatro (18,18%), una cobertura nubosa inferior al 10%.

A continuación se indican gráficos de dispersión de  $R_{Krs1}Ra^{-1}$  y  $R_{Obs}Ra^{-1}$ , con respecto al porcentaje de nubosidad obtenido (Figura 7).





**Figura 7.-** Gráficos de dispersión entre la fracción efectiva de radiación solar y el porcentaje de nubosidad.

*Análisis para las estaciones: Toreadora, La Virgen y Chirimachay y dominio Quinoas.*

*$R_{skrs1}Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con coeficiente de ajuste 0,16.  $R_{sobs}Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con la radiación solar observada en piranómetros.*

*Análisis realizado para el periodo de un año (agosto 2013-julio 2014).*





En la Figura 7, se observa que existe una relación inversamente proporcional entre las variables meteorológicas analizadas; es decir, mientras mayor es la cobertura nubosa sobre el área en estudio, menor es la fracción efectiva de radiación solar.

**Tabla 8.-** Resultados de  $R^2$ , entre la fracción efectiva de radiación solar y el porcentaje de nubosidad, en la microcuenca del río Quinoas.

	TOREADORA		LA VIRGEN		CHIRIMACHAY		DOMINIO QUINOAS	
	$RS_{Krs1}$	$RS_{obs}$	$RS_{Krs1}$	$RS_{obs}$	$RS_{Krs1}$	$RS_{obs}$	$RS_{Krs1}$	$RS_{obs}$
	$Ra^{-1}$	$Ra^{-1}$	$Ra^{-1}$	$Ra^{-1}$	$Ra^{-1}$	$Ra^{-1}$	$Ra^{-1}$	$Ra^{-1}$
$R^2$	0,17	0,56	0,09	0,74	0,41	0,64	0,39	0,73

*Análisis para las estaciones: Toreadora, La Virgen y Chirimachay y dominio Quinoas.*

*$RS_{Krs1}Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con coeficiente de ajuste 0,16.  $RS_{obs}Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con la radiación solar observada en piranómetros.*

*Análisis realizado para el periodo de un año (agosto 2013-julio 2014).*

Con respecto a la fracción de radiación solar estimada con las observaciones en sensores piranómetros, se observa que el porcentaje de nubosidad se relaciona de manera inversamente proporcional en un 73% con  $RS_{obs}Ra^{-1}$  para el dominio Quinoas (abarca las tres estaciones). Para las estaciones analizadas de manera individual, se observa que la relación es de 56% para Toreadora, 74% para La Virgen y 63% Chirimachay.



Cuando la relación lineal es igual o superior a 0,7 se dice que existe relación entre las variables analizadas (Vargas, 1996). Por lo tanto, de los hallazgos presentados con  $R_{obs}Ra^{-1}$ , se infiere que la relación inversamente proporcional es alta para La Virgen y Quinoas; mientras que la relación se considera moderada para las estaciones Toreadora y Chirimachay, según los parámetros indicados por Vargas (1996).

La relación lineal entre las variables, es menos significativa al emplear el método HS para el cálculo de la radiación solar. Se obtuvo una relación entre  $R_{Krs1}Ra^{-1}$  y el porcentaje de nubosidad de 17% para Toreadora, 0,9% para La Virgen 40% para Chirimachay y 39% Quinoas, relaciones encontradas se consideraron pobres.

Es necesario indicar que lo presentado en este capítulo se realizó de manera empírica, pues no existe una investigación similar en zonas de páramo o montaña. Los resultados obtenidos no se comparan al momento con ninguna otra publicación, pero se considera útil para futuras investigaciones referentes a radiación solar, nubosidad y selección del dominio de estudio.

## **5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

El capítulo tuvo como objetivo relacionar la influencia de la nubosidad que cubre el área aproximada de detección de los sensores piranómetros (9,18 km<sup>2</sup>), el dominio que abarca a los tres sensores (72,26 km<sup>2</sup>); por medio del análisis de imágenes satelitales Landsat ETM+ (B1) SLC Off. El porcentaje de nubosidad obtenido, se relacionó con la fracción de radiación solar efectiva del momento en que se obtuvo la imagen satelital. El estudio se realizó en tres estaciones meteorológicas: Toreadora, La Virgen y Chirimachay, ubicadas en la microcuenca del río Quinoas (Parque Nacional Cajas), para el periodo de un año (agosto 2013 - julio 2014).



Para las tres estaciones meteorológicas y el dominio Quinoas, existió una mayor relación con  $R_{\text{obs}}Ra^{-1}$  que con  $R_{\text{Krs1}}Ra^{-1}$ , respecto al porcentaje de nubosidad obtenido. Es decir que, el modelo de HS no genera una correcta estimación de la fracción efectiva de radiación solar, por lo tanto, es preferible analizar los resultados obtenidos con las observaciones en los sensores piranómetros.

En referencia a  $R_{\text{obs}}Ra^{-1}$  con el porcentaje de nubosidad, la mayor relación se encontró en la estación La Virgen con 74% y la menor relación lineal se encontró en la estación Toreadora con 56%. De lo cual se concluye que existe una relación inversamente proporcional, entre el porcentaje de nubosidad y la fracción efectiva de radiación solar. Se considera que a mayor porcentaje de nubosidad, menor cantidad de radiación solar llega a la superficie terrestre; aunque esta observación es dependiente de múltiples factores, como: tipos de nubes y sus características: reflectividad y espesor óptico; así como también de las condiciones atmosféricas a nivel del suelo como: neblina. Por lo tanto, la radiación solar se ve influenciada por la nubosidad presente.

Debido a los escasos estudios referentes a nubosidad en ecosistemas de páramo, es complicado comparar directamente los hallazgos encontrados en la presente investigación, con los de otros autores; sin embargo, existen estudios en los que se han creado algoritmos que identifican la nubosidad en imágenes satelitales mediante composición entre distintas bandas. Por ejemplo, Hughes y Hayes (2014), crearon un algoritmo que identifica la nubosidad y la sombra de las nubes, entre otros aspectos, en imágenes satelitales Landsat, basándose en la geometría solar, composición de las bandas y análisis pixel por pixel, obteniendo muy pocas omisiones. De la misma manera Martinuzzi (2007), elimina la nubosidad de las imágenes satelitales Landsat mediante una composición multiespectral de las bandas 1 y 6.1, y el remplazo de píxeles entre imágenes, para regiones tropicales (Puerto Rico). Cabe mencionar que en los trabajos de Martinuzzi (2007) y Hughes y Hayes (2014), se eliminan las nubes de las imágenes satelitales, debido a que son aspectos que obstaculizan otros



análisis; mientras que en el caso de estudio aquí presentado, es el parámetro meteorológico a analizar.

Del análisis realizado en este capítulo, se recomienda un estudio de la emisividad/transmisividad, y la distinción entre los tipos de nubes, para relacionarlos con la radiación solar a nivel del suelo; a fin de observar con mayor detalle la relación existente entre los parámetros. El uso de modelos de estimación solar más precisos y ajustados con la topografía es también una investigación que puede resultar de interés en un futuro.



## **CAPITULO VI**

### **CONCLUSION GENERAL**

#### **1. OBJETVIO GENERAL**

Estimación de la radiación solar y radiación neta horarias en ecosistemas de páramo mediante ecuaciones basadas en la temperatura, y posterior análisis estadístico empleando observaciones en equipos especializados (radiómetros y piranómetros); así como el análisis de la influencia de la nubosidad sobre la radiación solar de las zonas en estudio.

#### **2. CONCLUSION GENERAL**

El presente estudio tuvo por objetivo estimar la radiación solar, la radiación neta y la influencia de la nubosidad sobre la variable radiación solar, en tres estaciones meteorológicas, ubicadas a distintas altura, en la microcuenca del río Quinoas, del Parque Nacional Cajas, perteneciente a un ecosistema de páramo. Los modelos para la estimación de la radiación solar y radiación neta han sido propuestos por FAO-56 y desarrollados en diferentes investigaciones y/o regiones. Para la estimación de la radiación solar se empleó el modelo de Hargreaves-Samani (HS); basado en las diferencias de temperatura y en la radiación extraterrestre. A fin de observar su comportamiento, el modelo HS y observaciones en sensores piranómetros, fueron empleados como variables en la estimación de la radiación neta y en la estimación de la fracción efectiva de radiación solar.

Las estimaciones de radiación solar horaria mediante HS, se analizaron estadísticamente respecto a las observaciones en sensores piranómetros. Las estimaciones de radiación neta horaria, empleando mediante HS y observaciones en sensores piranómetros, se analizaron respecto a las observaciones en radiómetros netos. Los estadísticos empleados fueron: raíz media cuadrática, error medio de sesgo y el coeficiente de determinación  $R^2$ .



Obteniéndose que la ecuación HS, genera errores considerables en ecosistemas de páramo; mientras que al emplear las observaciones en sensores piranómetros, los errores en la estimación de la radiación neta se redujeron significativamente.

El porcentaje de nubosidad sobre el área de detección de los sensores piranómetros se realizó en imágenes satelitales Landsat ETM+ SLC Off (B1), debido a que la banda 1, o de espectro visible, diferencia la nubosidad sobre las demás características. Los hallazgos se relacionaron mediante gráficos de dispersión y coeficiente de determinación  $R^2$ , respecto a la fracción efectiva de radiación solar observada y estimada. Obteniendo relaciones moderadas a altas al emplear la fracción efectiva de radiación sola observada, relaciones que disminuyeron a pobres al emplear HS para el cálculo de la fracción de radiación solar.

En general el modelo de HS para la estimación de radiación solar, genera resultados cuestionables; sea como factor meteorológico analizado (capítulo III), como parte del cálculo de la radiación neta (capítulo VI), o para el cálculo de la fracción efectiva de la radiación solar (capítulo V). En todos los casos, se considera como una ecuación de pobre rendimiento, cuya aplicación debería ser analizada cuidadosamente en ecosistemas similares.



## **BIBLIOGRAFÍA**

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación*, 56, 1–298.
- Almorox, J., Aguirre, M., Elisei, V., & Commegna, M. (2012). Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, Argentina. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 44(1), 101–109.
- Ambach, W. (1974). The influence of cloudiness on the net radiation balance of a snow surface with high albedo. *Journal of Glaciology*, 13(67), 73–84.
- APOGEE INSTRUMENTS INC. (2014a). *Apogee Instruments Pyranometer models SP-110 and SP-230*. APOGEE INSTRUMENTS INC. (p. 6). Utah, USA: APOGEE INSTRUMENTS INC. Retrieved from [www.apogeeinstruments.com](http://www.apogeeinstruments.com)
- APOGEE INSTRUMENTS INC. (2014b). *Instruction Manual CS215 Temperature and Relative Humidity Probe* (pp. 4–5). Utah, USA: APOGEE INSTRUMENTS INC. Retrieved from [www.campbellsci.com](http://www.campbellsci.com)
- Azorín, C., Baena, R., Echave, I., Connell, B., Vicente, S., López, J., ... Reig, F. (2012). Algoritmo de detección de nubes en imágenes NOAA- AVHRR para el análisis de la variabilidad espacio-temporal de tormentas. In *8º Congreso Internacional Cambio Climático. Extremos Impactos* (Vol. 17, pp. 249– 259). Asociación Española de Climatología.
- Badescu, V. (2008). *Modeling solar radiation at the Earth's surface: Recent advances* (pp. 486–492). Heidelberg: Gueymard, CA.



- Bendix, J., Rollenbeck, R., & Palacios, W. E. (2004). Cloud detection in the Tropics--a suitable tool for climate-ecological studies in the high mountains of Ecuador. *International Journal of Remote Sensing*, 25(21), 4521–4540. <http://doi.org/1431160410001709967>
- Bernier, P. Y., & Plamondon, A. P. (1983). Estimating net short-wave radiation with the Bellani pyranometer. *Agricultural Meteorology*, 30(3), 175–184. <http://doi.org/0002-1571>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bievre, B., & Cisneros, F. (2003). Hidrología del páramo andino: propiedades importancia y vulnerabilidad. *Condesan.org*, 1–26.
- CAMPBELL SCIENTIFIC INC. (2010). *Instruction Manual NR-LITE Net Radiometer* (pp. 5–6). Utah, USA: CAMPBELL SCIENTIFIC INC. Retrieved from [www.campbellsci.com](http://www.campbellsci.com)
- Castillo, M., & Jordán, M. (1999). *Meteorología y clima* (1st ed., pp. 13–25, 33–44). Barcelona: Universidad Técnica de Cataluna.
- Córdova, M. (2013). *Análisis del comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en un ecosistema de páramo mediante la ecuación combinada de Penan-Monteith*. Tesis de pregrado. Carrera de Ingeniería Civil. Universidad de Cuenca.
- Córdova, M., Carrillo, G., & Céleri, R. (2013). Errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia de una zona de páramo andino debidos al uso de datos mensuales, diarios y horarios. *Aqua-LAC*, 5(2), 14–22.
- De Castro Teixeira, A., Bastiaanssen, W., Ahmad, M., Moura, M., & Bos, M. (2008). Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology*, 362(1-2), 110–127. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.08.011>





- De Sousa, J., Dantas, A., Soares, E., Hammecker, C., Lima, S., & Brayner, C. (2013). Calibration of Hargreaves-Samani Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Sub-Humid Region of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, (5), 1–5.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. (J. Wiley, Ed.) (4th ed., pp. 5, 10, 43–44, 48–50). New Jersey: Wiley.
- Flerchinger, G. N., Xaio, W., Marks, D., Sauer, T. J., & Yu, Q. (2009). Comparison of algorithms for incoming atmospheric long-wave radiation. *Water Resources Research*, 45(3), 3–13. <http://doi.org/10.1029/2008WR007394>
- Gubler, S., Gruber, S., & Purves, R. S. (2012). Uncertainties of parameterized surface downward clear-sky shortwave and all-sky longwave radiation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(11), 5077–5098. <http://doi.org/10.5194/acp-12-5077-2012>
- Hughes, M., & Hayes, D. (2014). Automated detection of cloud and cloud shadow in single-date Landsat Imagery using neural networks and spatial post-processing. *Remote Sensing*, 6, 4907–4926. <http://doi.org/10.3390/rs6064907>
- Irish, R. (2000). Landsat 7 automatic cloud cover assessment. In *AeroSense 2000* (pp. 348–355). International Society for Optics and Photonics.
- Kasten, F., & Czeplak, G. (2000). Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, 24, 177–189.
- Katiyar, A., Kumar, A., Kumar P, C., & B.Das. (2010). A comparative study of monthly mean daily clear sky radiation over India. *International Journal of Energy and Environment*, 1(1), 177–182.
- Llambí, L., Werschitz, S., & Alejandra, I. (2012). *Ecología, hidrología y suelos del páramo* (pp. 26–186). Monsalve Moreno.



- Llebot, J. (1994). Bases de la modelización climática. In Agència Catalana de l'Aigua (Ed.), *Escenarios climáticos* (pp. 63–72). Catalunya: Agència Catalana de l'Aigua, Departament de Medi Ambient i Habitatge. <http://doi.org/B-26130-2010>
- Markham, B., Boncyk, W., Helder, D., & Barker, J. (2014). Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus Radiometric Calibration. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 23(4), 318–332. <http://doi.org/10.1080/07038992.1997.10855218>
- Marthews, T. R., Malhi, Y., & Iwata, H. (2011). Calculating downward longwave radiation under clear and cloudy conditions over a tropical lowland forest site: an evaluation of model schemes for hourly data. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 461–477. <http://doi.org/10.1007/s00704-011-0486-9>
- Martínez-Romero, A., Ortega, J., de Juan, J., Tarjuelo, J., & Moreno, M. (2012). Modelos de estimación de radiación solar global con limitación de datos y su distribución espacial en Castilla-La Mancha. *Información Técnica Económica Agraria*, 108(4), 426–449.
- Martinuzzi, S., Gould, W. A., & González, O. M. R. (2007). *Creating cloud-free Landsat ETM+ data sets in tropical landscapes: Cloud and cloud-shadow removal*. *Pacific Northwest Research Station* (pp. 1–18).
- Massons, J., & Domingo, D. (1997). Analisis de nubosidad a partir de imagenes Meteosat. In J. Casanova & J. Sanz (Eds.), *Teledetección: Usos y Aplicaciones. VII Congreso Nacional de Teledetección*. (pp. 507–512). Valladolid, España.
- Mena, P., Castillo, A., Flores, S., Hofstede, R., Josse, C., B, S. L., ... Ortiz, D. (2011). *Páramo: Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado* (pp. 26–30). Quito: EcoCiencia, Editorial Univeritaria Abya-Yala, ECOBONA.



- Moradi, I., Mueller, R., Alijani, B., & Kamali, G. A. (2008). Evaluation of the Heliosat-II method using daily irradiation data for four stations in Iran. *Solar Energy*, 83(2), 150–156. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2008.07.010>
- Muzathik, A. M., Mohd, W., & Wan, N. (2010). Hourly global solar radiation estimates on a horizontal plane. *Physical Science*, 21(2), 51–66.
- Nakajima, T., & King, M. (1990). Determination of the optical thickness and effective particle radii of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(15), 1878–1893.
- Ocampo, D., & Rivas, R. (2013). Estimación de la radiación neta diaria a partir de modelos de regresión lineal múltiple. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 263–271. <http://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.04.031>
- Ohmura, A., Gilgen, H., Hegner, H., Müller, G., Wild, M., Dutton, E. G., ... Dehne, K. (1998). Baseline surface radiation network (BSRN/WCRP): New precision radiometry for climate research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2115–2136.
- Padrón, R. (2013). *Análisis de la estructura de la lluvia de páramo*. Tesis de pregrado. Carrera de Ingeniería Civil. Universidad de Cuenca.
- Raichijk, C., & Taddei, F. (2012). Estudio comparativo de modelos empíricos de estimación de la radiación solar directa horaria. *ASADES*, 16, 23–29.
- Ramsay, P. M., & Oxley, E. R. B. (1996). Fire temperatures and postfire plant community dynamics in Ecuadorian grass páramo. *Kluwer Academic Publishers*, 124(1992), 129–144.



- Rodríguez, R., Capa, A., & Portela, A. (2004). *Meteorología y climatología* (1st ed., pp. 108–111). España: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.
- Rubio, M., Lopez, G., Tovar, J., & F, B. (2003). Estimación de valores horarios de radiación directa mediante una modificación del modelo Heliosat. In R. Pérez & P. Martínez (Eds.), *Teledetección y Desarrollo Regional. X Congreso de Teledetección* (pp. 349–352). Cáceres, España.
- Sicart, J., Hock, R., Ribstein, P., & Chazarin, J. (2010). Sky longwave radiation on tropical Andean glaciers: parameterization and sensitivity to atmospheric variables. *Journal of Glaciology*, 854–860.
- Solano, J., & Vázquez, R. (2013). Modelación espacial de la lluvia y la evapotranspiración teniendo en cuenta parámetros geográficos. *Ciencias de a Tierra y el Espacio*, 14(1), 80–90.
- Tabari, H., Talaei, P. H., Willems, P., & Martinez, C. (2014). Validation and calibration of solar radiation equations for estimating daily reference evapotranspiration at cool semi-arid and arid locations. *Hydrological Sciences Journal*, 37 –42. <http://doi.org/10.1080/02626667.2014.947293>
- U.S. Department of the Interior, & U.S. Geological Survey. (2013). USGS. Retrieved from <http://landsat.usgs.gov>
- Ugwu, A., & Ugwauanyi, J. (2011). Performance assessment of Hargreaves model in estimating solar radiation in Abuja using minimum climatological data. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(31), 7285–7290. <http://doi.org/10.5897/IJPS11.1403>
- Vargas, A. (1996). *Estadística descriptiva e inferencial*. (Servicio de Publicaciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, Ed.) (II, pp. 186–196). Murcia: COMPOBELL.



Wang, K., & Liang, S. (2009). Estimation of Daytime Net Radiation from Shortwave Radiation Measurements and Meteorological Observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(3), 634–643. <http://doi.org/10.1175/2008JAMC1959.1>

## ANEXOS

### **Anexo 1: Especificaciones técnicas de los equipos meteorológicos empleados.**

Los especificaciones de los equipos meteorológicos indicados a continuación han sido tomadas de sus manuales respectivos (APOGEE INSTRUMENTS INC., 2014a, 2014b; CAMPBELL SCIENTIFIC INC., 2010).

#### **1. PYRANOMETER MODEL SP-110**



**Figura 8:** PYRANOMETER MODEL SP-110.

*Fuente: APOGEE INSTRUMENTS INC., 2014a.*

#### **SPECIFICATIONS**

**Sensitivity:** 0.20 mV per  $Wm^{-2}$

**Calibration Factor:** 5.0  $Wm^{-2}$  per mW (reciprocal sensitivity)

**Calibration Uncertainty:**  $\pm 5\%$

**Measurement Repeatability:**  $<1\%$

**Non-linearity:**  $<1\%$  (up to  $1750 Wm^{-2}$ )

**Response Time:**  $<1$  ms

**Field of View:**  $180^{\circ}$

**Spectral Range:** 360 nm to 1120 nm (wavelengths where response is 10% of maximum)



**Directional (cosine) Response:**  $\pm 5\%$  at  $75^\circ$  zenith angle

**Temperature Response:**  $-0.04 \pm 0.04\%$  per C

**Operating Environment:** -40 to 70 C

0 to 100% relative humidity

Can be submerged in water up to depths of 30 m

**Dimensions:** 2.40 cm diameter and 2.75 cm height

**Mass:** 90 g (with 5m of lead wire)

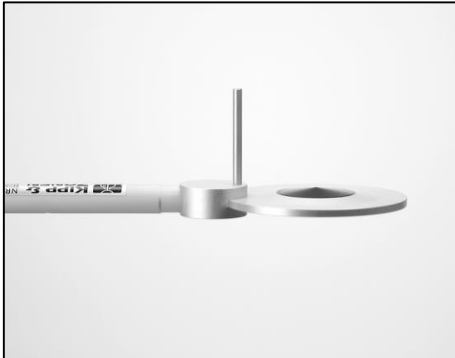
**Cable:** 5m of shielded, twisted/pair wire

Additional cable available in multiples of 5 m

Santoprene rubber jacket (high water resistance, high UV stability,  
flexibility in cold conditions)

Pigtail lead wires

## 2. NET RADIOMETER NR- LITE 2



**Figura 9:** NET RADIOMETER NR- LITE 2.

*Fuente: CAMPBELL SCIENTIFIC INC., 2010.*

### **SPECIFICATIONS**

#### **SPECTRAL**

**Spectral range:** 0.2 to 100  $\mu\text{m}$

**Detector type:** Thermopile

**Detector protection:** Teflon coating

**Detector profile:** Conical

#### **DIRECTIONAL**

**Directional error:** (0 - 60° at 1000 W m<sup>-2</sup>): <30 W m<sup>-2</sup>

**Sensor asymmetry:**  $\pm 5\%$  typical, ( $\pm 10\%$  worst case).

#### **MECHANICAL**

**Housing material:** Anodized aluminum

**Cable material:** Polyurethane

**Weight:** 200 g

**Cable length:** 15 m (can be extended up to 100 m)

#### **Physical Dimensions:**

Sensor: 3.1" (8.0 cm) diameter

Support Arm: 0.6" (1.6 cm) diameter x 31.5" (80 cm) L

**Weight:** 23 oz (635 g)

#### **ENVIRONMENTAL**

**Working temperature:** -30 to +70°C

**Temperature dependence:** 0.12%/°C



### 3. CS215 TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY PROBE



**Figura 10:** CS215 TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY PROBE.

*Fuente: APOGEE INSTRUMENTS INC., 2014b.*

#### **SPECIFICATIONS**

##### **FEATURES**

- Accurate, stable measurements
- Field-changeable element allows on-site recalibration
- Individually calibrated sensor elements require no further adjustment of the probe
- Low power consumption
- Digital SDI-12 output
- Compatible with Campbell Scientific CRBasic dataloggers: CR200(X) series, CR800 series, CR1000, CR3000, and CR5000. Also compatible with Edlog dataloggers: CR500, CR510, CR10(X), and CR23X

**Sensor Element:** Sensirion SHT75

**Supply Voltage:** 6 to 16 Vdc

**Current Consumption:** Typically 120  $\mu$ A quiescent  
1.7 mA during measurement

**Diameter:** 12 mm at sensor tip, maximum 18 mm at cable end

**Length:** 180 mm, including cable strain relief



**Housing Material:** Anodized aluminum

**Filter Material:** Sintered high-density polyethylene, average pore size 13  $\mu\text{m}$

**EMC Compliance:** Tested and conforms to BS EN61326:2002

**Calibration:** Sensirion SHT75 sensor element is individually calibrated during manufacture.

#### **TEMPERATURE MEASUREMENT**

**Operating Range:**  $-40$  to  $+70$   $^{\circ}\text{C}$

**Accuracy:**  $\pm 0.3$   $^{\circ}\text{C}$  at  $25$   $^{\circ}\text{C}$

$\pm 0.4$   $^{\circ}\text{C}$  over  $5$  to  $40$   $^{\circ}\text{C}$

$\pm 0.9$   $^{\circ}\text{C}$  over  $-40$  to  $+70$   $^{\circ}\text{C}$

**Response Time with Filter:** 120 s (63% response time in air moving at 1 m/s)

**Default Units:** Degrees Celsius

#### **RELATIVE HUMIDITY MEASUREMENT**

**Operating Range:** 0 to 100% RH

**Accuracy at  $25^{\circ}\text{C}$ :**  $\pm 2\%$  over 10 to 90%

$\pm 4\%$  over 0 to 100%

**Short-Term Hysteresis:**  $< 1\%$  RH

**Temperature Dependence:** Compensated to better than  $\pm 2\%$  over  $-20$  to  $60$   $^{\circ}\text{C}$

**Typical Long-Term Stability:** Better than  $\pm 1.0\%$  per year

**Response Time with Filter:**  $< 10$  s (63% response time in air moving at 1 m/s at  $< 85\%$  RH)



**Anexo 2: Tablas referentes a las fracciones  $R_{s_{obs}} Ra^{-1}$  y  $R_{s_{krs1}} Ra^{-1}$  y el porcentaje de nubosidad, en las estaciones meteorológicas: Toreadora, La Virgen, Chirimachay y el dominio Quinoas.**

N	FECHA	HORA IMAGEN	TOREADORA					% NUBOSIDAD
			$R_a$	$R_{s_{obs}}$	$R_{s_{krs1}}$	$R_{s_{obs}} Ra^{-1}$	$R_{s_{krs1}} Ra^{-1}$	
1	16/08/2013	10:22:24	0,068	0,012	0,007	0,172	0,000	88,491
2	01/09/2013	10:22:35	0,071	0,005	0,008	0,069	0,107	92,824
3	17/09/2013	10:22:46	0,073	0,012	0,008	0,166	0,113	77,502
4	03/10/2013	10:22:57	0,075	0,008	0,010	0,107	0,131	93,471
5	19/10/2013	10:23:08	0,075	0,025	0,010	0,336	0,139	0,010
6	04/11/2013	10:23:13	0,075	0,020	0,010	0,273	0,137	0,000
7	20/11/2013	10:23:16	0,074	0,018	0,009	0,239	0,120	93,207
8	06/12/2013	10:23:26	0,072	0,023	0,011	0,325	0,159	39,300
9	22/12/2013	10:23:28	0,071	0,030	0,018	0,422	0,248	36,849
10	07/01/2014	10:23:32	0,070	0,004	0,004	0,063	0,060	96,049
11	23/01/2014	10:23:50	0,070	0,010	0,011	0,142	0,157	99,853
12	08/02/2014	10:23:58	0,071	0,005	0,009	0,075	0,128	97,804
13	24/02/2014	10:23:48	0,072	0,004	0,008	0,057	0,115	96,902
14	12/03/2014	10:23:55	0,072	0,004	0,004	0,049	0,058	86,354
15	28/03/2014	10:24:03	0,072	0,027	0,013	0,369	0,182	19,567
16	13/04/2014	10:24:09	0,072	0,004	0,008	0,061	0,113	93,148
17	29/04/2014	10:24:19	0,072	0,021	0,014	0,290	0,193	93,883
18	15/05/2014	10:24:25	0,067	0,012	0,008	0,185	0,118	98,294
19	31/05/2014	10:24:29	0,065	0,010	0,009	0,148	0,140	46,790
20	16/06/2014	10:24:29	0,063	0,009	0,005	0,149	0,085	82,257
21	02/07/2014	10:24:36	0,063	0,021	0,009	0,340	0,144	1,363
22	18/07/2014	10:24:38	0,064	0,010	0,006	0,158	0,086	62,768

$R_{s_{krs1}} Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con coeficiente de ajuste 0,16.  $R_{s_{obs}} Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con la radiación solar observada en piranómetros.

Análisis de la nubosidad realizado con todas las imágenes disponibles para el periodo de un año (agosto 2013-julio 2014).



## LA VIRGEN

N	FECHA	HORA IMAGEN	Ra	Rs <sub>obs</sub>	Rs <sub>krs1</sub>	Rs <sub>obs</sub>	Rs <sub>krs1</sub>	% NUBOSIDAD
			(MJ m <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> )			Ra <sup>-1</sup>	Ra <sup>-1</sup>	
1	16/08/2013	10:22:24	0,068	0,009	0,006	0,126	0,088	91,667
2	01/09/2013	10:22:35	0,071	0,005	0,007	0,068	0,100	99,902
3	17/09/2013	10:22:46	0,073	0,005	0,007	0,065	0,096	84,943
4	03/10/2013	10:22:57	0,075	0,010	0,007	0,134	0,099	100,000
5	19/10/2013	10:23:08	0,075	0,024	0,008	0,317	0,111	0,980
6	04/11/2013	10:23:13	0,075	0,021	0,009	0,286	0,114	0,000
7	20/11/2013	10:23:16	0,074	0,016	0,012	0,218	0,159	99,922
8	06/12/2013	10:23:26	0,072	0,023	0,009	0,324	0,125	3,255
9	22/12/2013	10:23:28	0,071	0,023	0,013	0,321	0,183	20,606
10	07/01/2014	10:23:32	0,070	0,017	0,008	0,238	0,107	97,883
11	23/01/2014	10:23:50	0,070	0,007	0,007	0,103	0,095	100,000
12	08/02/2014	10:23:58	0,071	0,006	0,007	0,084	0,101	86,090
13	24/02/2014	10:23:48	0,072	0,005	0,009	0,065	0,123	100,000
14	12/03/2014	10:23:55	0,072	0,010	0,009	0,141	0,121	99,971
15	28/03/2014	10:24:03	0,072	0,022	0,007	0,311	0,097	2,500
16	13/04/2014	10:24:09	0,072	0,004	0,006	0,051	0,086	100,000
17	29/04/2014	10:24:19	0,072	0,012	0,008	0,165	0,112	100,000
18	15/05/2014	10:24:25	0,067	0,009	0,006	0,134	0,085	99,961
19	31/05/2014	10:24:29	0,065	0,012	0,007	0,192	0,104	58,171
20	16/06/2014	10:24:29	0,063	0,006	0,004	0,100	0,062	93,922
21	02/07/2014	10:24:36	0,063	0,020	0,007	0,312	0,116	0,225
22	18/07/2014	10:24:38	0,064	0,008	0,008	0,129	0,121	99,010

$Rs_{krs1}Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con coeficiente de ajuste 0,16.  $Rs_{obs}Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con la radiación solar observada en piranómetros.

Análisis de la nubosidad realizado con todas las imágenes disponibles para el periodo de un año (agosto 2013-julio 2014).



## CHIRIMACHAY

N	FECHA	HORA IMAGEN	Ra	Rs <sub>obs</sub>	Rs <sub>krs1</sub>	Rs <sub>obs</sub>	Rs <sub>krs1</sub>	% NUBOSIDAD
			(MJ m <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> )			Ra <sup>-1</sup>	Ra <sup>-1</sup>	
1	16/08/2013	10:22:24	0,067	0,006	0,004	0,083	0,001	100,000
2	01/09/2013	10:22:35	0,070	0,003	0,005	0,037	0,001	100,000
3	17/09/2013	10:22:46	0,073	0,016	0,008	0,217	0,002	27,615
4	03/10/2013	10:22:57	0,075	0,006	0,005	0,082	0,001	100,000
5	19/10/2013	10:23:08	0,075	0,013	0,012	0,170	0,003	3,774
6	04/11/2013	10:23:13	0,074	0,024	0,006	0,324	0,001	0,000
7	20/11/2013	10:23:16	0,073	0,015	0,010	0,201	0,002	100,000
8	06/12/2013	10:23:26	0,072	0,010	0,008	0,146	0,002	44,476
9	22/12/2013	10:23:28	0,070	0,025	0,008	0,357	0,002	17,636
10	07/01/2014	10:23:32	0,070	0,014	0,007	0,202	0,002	90,109
11	23/01/2014	10:23:50	0,070	0,002	0,004	0,032	0,001	100,000
12	08/02/2014	10:23:58	0,070	0,008	0,007	0,117	0,002	99,471
13	24/02/2014	10:23:48	0,071	0,007	0,004	0,096	0,001	100,000
14	12/03/2014	10:23:55	0,072	0,009	0,006	0,128	0,001	100,000
15	28/03/2014	10:24:03	0,072	0,022	0,010	0,303	0,002	1,519
16	13/04/2014	10:24:09	0,072	0,002	0,005	0,035	0,001	100,000
17	29/04/2014	10:24:19	0,072	0,011	0,008	0,148	0,002	99,186
18	15/05/2014	10:24:25	0,066	0,008	0,006	0,126	0,002	100,000
19	31/05/2014	10:24:29	0,064	0,008	0,010	0,119	0,003	60,661
20	16/06/2014	10:24:29	0,063	0,004	0,003	0,062	0,001	100,000
21	02/07/2014	10:24:36	0,063	0,016	0,010	0,254	0,003	9,009
22	18/07/2014	10:24:38	0,063	0,004	0,004	0,063	0,001	99,961

$Rs_{Krs1}Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con coeficiente de ajuste 0,16.  $Rs_{obs}Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con la radiación solar observada en piranómetros.

Análisis de la nubosidad realizado con todas las imágenes disponibles para el periodo de un año (agosto 2013-julio 2014).



DOMINIO QUINOAS

N	FECHA	HORA IMAGEN	Ra	Rs <sub>obs</sub>	Rs <sub>krs1</sub>	Rs <sub>obs</sub>	Rs <sub>krs1</sub>	% NUBOSIDAD
			(MJ m <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> )			Ra <sup>-1</sup>	Ra <sup>-1</sup>	
1	16/08/2013	10:22:24	0,068	0,009	0,006	0,127	0,084	95,022
2	01/09/2013	10:22:35	0,071	0,004	0,007	0,058	0,092	97,896
3	17/09/2013	10:22:46	0,073	0,011	0,008	0,149	0,105	74,542
4	03/10/2013	10:22:57	0,075	0,008	0,007	0,108	0,099	98,489
5	19/10/2013	10:23:08	0,075	0,021	0,010	0,275	0,139	3,284
6	04/11/2013	10:23:13	0,075	0,022	0,008	0,294	0,110	0,613
7	20/11/2013	10:23:16	0,073	0,016	0,010	0,219	0,137	98,266
8	06/12/2013	10:23:26	0,072	0,019	0,009	0,265	0,131	34,871
9	22/12/2013	10:23:28	0,071	0,026	0,013	0,366	0,183	29,154
10	07/01/2014	10:23:32	0,070	0,012	0,006	0,167	0,090	94,519
11	23/01/2014	10:23:50	0,070	0,006	0,007	0,092	0,101	99,851
12	08/02/2014	10:23:58	0,071	0,007	0,008	0,092	0,108	97,383
13	24/02/2014	10:23:48	0,071	0,005	0,007	0,073	0,099	99,443
14	12/03/2014	10:23:55	0,072	0,008	0,006	0,106	0,086	97,064
15	28/03/2014	10:24:03	0,072	0,024	0,010	0,328	0,140	7,357
16	13/04/2014	10:24:09	0,072	0,004	0,006	0,049	0,090	98,381
17	29/04/2014	10:24:19	0,072	0,014	0,010	0,201	0,140	98,168
18	15/05/2014	10:24:25	0,067	0,010	0,007	0,148	0,100	99,750
19	31/05/2014	10:24:29	0,065	0,010	0,009	0,153	0,132	52,824
20	16/06/2014	10:24:29	0,063	0,007	0,004	0,104	0,063	95,009
21	02/07/2014	10:24:36	0,063	0,019	0,009	0,302	0,138	2,161
22	18/07/2014	10:24:38	0,064	0,007	0,006	0,117	0,091	93,137

$Rs_{Krs1}Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con coeficiente de ajuste 0,16.  $Rs_{obs}Ra^{-1}$ : fracción de radiación solar calculada con la radiación solar observada en piranómetros.

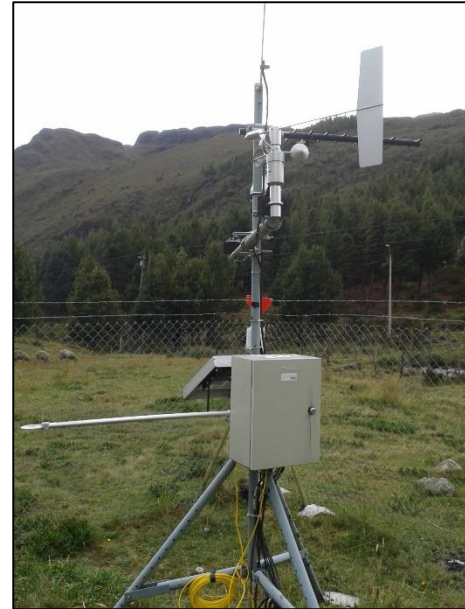
Análisis de la nubosidad realizado con todas las imágenes disponibles para el periodo de un año (agosto 2013-julio 2014).

**Anexo 3: Fotografías de las estaciones meteorológicas Toreadora, La Virgen y Chirimachay, ubicadas en la microcuenca del río Quinoas.**



**Fotografía 1:** Estación Toreadora.

*Fuente propia.*



**Fotografía 2:** Estación La Virgen.

*Fuente propia.*



**Fotografía 3:** Estación Chirimachay.

*Fuente propia.*