

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR Y DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR EN DOS GRADIENTES ALTITUDINALES

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIA A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORA:

ANDREA PAOLA MAZA LEÓN

DIRECTOR:

ING. ROLANDO ENRIQUE CÉLLERI ALVEAR, PhD

TUTOR:

ING. MARIO ANDRÉS CÓRDOVA MORA

CUENCA –ECUADOR
2016



RESUMEN

La estimación de la radiación solar (R_S) y el déficit de presión de vapor (VPD) constituyen un proceso necesario cuando se carece de registros en una región, siendo este el caso de las zonas de montaña como los Andes, donde su medición es escasa debido a que es difícil y costosa. Estas variables son importantes en términos ecológicos y económicos y son importantes para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0). En este estudio se realizó un estudio comparativo de 5 modelos empíricos de estimación de R_S (Hargreaves-Samani, Allen, Annandale, Chen y Ertekin-Yaldiz) y 5 modelos de VPD (FAO56 y 4 modelos de Castellví) basados en temperatura del aire. Se utilizaron datos diarios de R_S y VPD de 6 estaciones meteorológicas en dos gradientes altitudinales; Observatorios Ecohidrológicos de Quinuas y Zhurucay (Azuay, Ecuador). Los criterios de validación se realizaron mediante distintos estimadores estadísticos. Los resultados mostraron que los modelos de R_S originales necesitan ser calibrados y validados antes de su aplicación. La calibración de los modelos de R_S mejoró las estimaciones notablemente en las dos gradientes. El modelo Chen presentó los mejores resultados para todas las estaciones en las dos gradientes. Los resultados de los modelos de VPD mostraron en la estación Balzay (zona urbana) un comportamiento distinto. Solo para la estación meteorológica Campamento no se obtuvieron resultados favorables con ningún modelo. El estudio ha proporcionado ecuaciones calibradas que pueden ser utilizadas en la zona andina del sur del Ecuador para la estimación de R_S y VPD.

Palabras clave: radiación solar, déficit de presión de vapor, temperatura del aire, modelos, calibración, clima, Quinuas, Zhurucay.



ABSTRACT

The estimation of solar radiation (R_S) and vapor pressure deficit (VPD) are a necessary process when there are no measurements of these variables in a region. This is the case in mountainous areas such as the Andes where there are insufficient measurements because of the cost and difficulty to obtain them. These variables are important in ecological and economic terms, and also to estimate reference evapotranspiration (ET_0). This thesis presents a comparative study of 5 empirical models to estimate R_S (Hargreaves-Samani, Allen, Annandale, Chen and Ertekin-Yaldiz) and 5 models to estimate VPD (FAO56 and 4 models Castellvi), all of them based on air temperature. Daily R_S and VPD data from 6 meteorological stations were used in two altitudinal gradients located in the Quinuas and Zhurucay Ecohydrological Observatories (Azuay, Ecuador). The validation criteria were performed using different statistical indices. The results showed that the original R_S models need calibration and validation before they provide valid estimations. The calibrated R_S models resulted in improved estimates in the two gradients. The Chen model showed the best results for all stations in the two gradients. The results of VPD models showed in Balzay (urban) a distinct performance. Favorable results were not obtained with any model only at weather station Campamento. This study has provided calibrated equations that can be used in the Andes of southern Ecuador for estimating R_S and VPD.

Keywords: solar radiation, vapor pressure deficit, air temperature, models, calibration, climate, Quinuas, Zhurucay.



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	11
Objetivos.....	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos.....	14
2. MATERIALES Y MÉTODOS	15
2.1. Descripción del área de estudio.....	15
2.2. Mediciones de datos Meteorológicos	17
2.3. Metodología	18
2.4. Revisión de Modelos.....	19
2.4.1. Modelos de estimación de Radiación Solar.....	19
2.4.1.1. Hargreaves-Samani.....	19
2.4.1.2. Allen.....	21
2.4.1.3. Annandale	21
2.4.1.4. Chen.....	21
2.4.1.5. Ertekin-Yaldiz.....	22
2.4.2. Modelos para la estimación del déficit de presión de vapor	22
2.4.2.1. Modelos para estimar VPD.....	22
2.4.2.1.1. FAO 56.....	22
2.4.2.1.2. Modelo 1.....	23
2.4.2.1.3. Modelo 2.....	23
2.4.2.2. Modelos para estimar HR.....	23
2.4.2.2.1. Modelo 1 HR.....	23
2.4.2.2.2. Modelo 2 HR.....	24
2.5. Criterios para la evaluación de resultados	24
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25



3.1. Modelos de Radiación Solar (R_S).....	25
3.1.1. Evaluación de modelos de estimación de R_S	25
3.1.2. Calibración de los modelos de estimación de R_S	29
3.2. Modelos de Déficit de Presión de Vapor (VPD)	39
3.2.1. Evaluación de modelos de estimación de VPD	39
4. CONCLUSIONES.....	46
Trabajo futuro	48
5. REFERENCIAS.....	49
ANEXOS	53



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ilustración geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.	17
Figura 2 Comparación de valores de los promedios mensuales de radiación solar diaria observada y estimada por los diferentes modelos para el Observatorio Ecohidrológico Quinuas	26
Figura 3 Comparación de valores de los promedios mensuales de radiación solar diaria observada y estimada por los diferentes modelos para el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay.....	27
Figura 4 Comparación de valores de los promedios mensuales de radiación solar diaria observada y estimada por los diferentes modelos calibrados y validados para el Observatorio Ecohidrológico Quinuas	31
Figura 5 Comparación de valores de los promedios mensuales de radiación solar diaria observada y estimada por los diferentes modelos calibrados y validados para el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay	32
Figura 6 Comparación de valores de los promedios mensuales de déficit de presión de vapor diaria observada y estimada por los diferentes modelos calibrados y validados para el Observatorio Ecohidrológico Quinuas.....	40
Figura 7 Comparación de valores de los promedios mensuales de déficit de presión de vapor diaria observada y estimada por los diferentes modelos calibrados y validados para el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay	41



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.	16
Tabla 2 Características climáticas promedio	18
Tabla 3 Resultados estadísticos entre los valores diarios medidos de la R_S y los estimados por los modelos empíricos en cada estación para los Observatorios de Quinuas y Zhurucay.	28
Tabla 4 Ecuaciones calibradas de los modelos empíricos de R_S para cada estación y análisis estadístico para el Observatorio Ecohidrológico Quinuas.....	33
Tabla 5 Ecuaciones calibradas de los modelos empíricos de R_S para cada estación y análisis estadístico para el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay.	35
Tabla 6 Resultados estadísticos promedios de la radiación solar estimada para cada modelo calibrado.	36
Tabla 7 Valores de k_{R_S} para las estaciones del Observatorio Ecohidrológico Quinuas.....	37
Tabla 8 Valores de k_{R_S} para las estaciones del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay.	37
Tabla 9 Análisis estadístico y ecuación calibrada y única de cada modelo empírico de R_S para toda la gradiente del Observatorio Ecohidrológico Quinuas en el periodo de 2 años.	37
Tabla 10 Análisis estadístico y ecuación calibrada y única de cada modelo empírico de R_S para toda la gradiente del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay en el periodo de 2 años.....	38
Tabla 11 Resultados estadísticos entre los valores diarios observados de déficit de presión de vapor y los valores estimados por los modelos empíricos para las diferentes estaciones en los Observatorios Quinuas y Zhurucay.....	43
Tabla 12 Resultados estadísticos promedios generales del déficit de presión de vapor estimada para cada modelo para los Observatorios Quinuas y Zhurucay. .	44
Tabla 13 Resultados estadísticos promedios del déficit de presión de vapor estimada para cada modelo para el Observatorios Ecohidrológico Quinuas.	44
Tabla 14 Resultados estadísticos promedios del déficit de presión de vapor estimada para cada modelo para el Observatorios Ecohidrológico Zhurucay.	45



Yo, Andrea Paola Maza León, autora del trabajo de titulación “ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR Y DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR EN DOS GRADIENTES ALTITUDINALES”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora

Cuenca, 03 de Mayo de 2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Andrea Paola Maza León", written over a horizontal line.

Andrea Paola Maza León

C.I: 0302146121



Yo, Andrea Paola Maza León autora del trabajo de titulación “ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR Y DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR EN DOS GRADIENTES ALTITUDINALES”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 03 de Mayo de 2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Andrea Paola Maza León", written over a horizontal line.

Andrea Paola Maza León

C.I: 0302146121



AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera especial al Ing. Rolando Céleri Alvear, PhD por su dirección y acertada guía, quien con su gran conocimiento y calidad humana me motivó para el desarrollo de este trabajo de titulación y al Ing. Mario Córdova, quien me brindo su ayuda desde el inicio y siempre estuvo presto para resolver dudas e inconvenientes a lo largo de la realización de esta investigación. Al personal del Departamento de Recurso Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca que colaboró con el monitoreo meteorológico. Al personal del proyecto Loma Larga, la Comunidad de Chumblín y la Fundación Jardín del Cajas por su apoyo logístico durante la instalación de las estaciones y la recolección de datos. Al proyecto “Ciclos meteorológicos y evapotranspiración a lo largo de una gradiente altitudinal en el Parque Nacional Cajas”, financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC) y la Empresa Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA-EP). A la Secretaria Ecuatoriana de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) y Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP-Hidropaute por el financiamiento a través del proyecto (No. PIC-11-715).

Andrea Maza León,

Cuenca, Abril de 2016

1. INTRODUCCIÓN

El clima es el comportamiento de la atmósfera en un determinado periodo de tiempo representado por un patrón promedio de las condiciones atmosféricas, normalmente en un periodo de 30 años definido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2007), de diferentes variables meteorológicas (Baede, 1990). Las principales variables meteorológicas monitoreadas son la temperatura del aire, precipitación, dirección del viento, velocidad del viento, humedad relativa del aire, radiación solar y presión atmosférica. De las cuales, de acuerdo a la literatura (Córdova et al., 2015), la radiación solar y la humedad relativa del aire, son las menos monitoreadas por el costo de los sensores y dificultad de medirlas. Motivo por el cual se amerita que estas variables sean estudiadas con mayor profundidad.

La radiación solar (R_s) es un recurso natural muy importante y el conocimiento de la misma permite su aprovechamiento, ya que ejerce una influencia sobre la producción primaria y en su potencial aprovechamiento energético (Besharat et al., 2013). El estudio espacial y temporal de esta variable es importante en la planificación de actividades como agricultura, turismo, planificación territorial y su utilización como fuente de energía renovable (Ovando & Rodríguez, 2003). Por lo tanto la radiación solar que incide en un lugar determinado tiene una enorme importancia en términos ecológicos y económicos. Un ligero cambio en la cantidad de R_s en la superficie terrestre puede generar cambios significativos en el clima de una zona (König-Langlo et al., 2013).

El déficit de presión de vapor de agua (VPD) es una propiedad de gran importancia para describir el contenido de humedad en la atmósfera. La presión de vapor de agua es una variable básica para estimar la evapotranspiración de los cultivos (Castellví et al., 1996), siendo este un componente importante del ciclo hidrológico (Richard G. Allen, 2006); además influye en la programación de riego de cultivos, que es un elemento básico en la modelación del crecimiento de cultivos (Cervantes, 2013). También juega un papel importante en la

determinación de ciertas propiedades físicas, termodinámicas y procesos físico-químicos del agua (Ricardo & Haber, 1998).

En particular, la radiación solar y el déficit de presión de vapor, son fundamentales para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) en ecosistemas andinos debido a que en ausencia de estos datos se generan grandes errores (Córdova et al., 2015). La ET_0 es esencial para varias aplicaciones como la planificación agrícola y la gestión de recursos hídricos (Cervantes, 2013), donde la falta de precisión en la estimación de su valor puede causar problemas de sobreestimación o de subestimación del recurso hídrico (Córdova et al., 2013).

La cordillera de los Andes atraviesa la franja occidental de Sudamérica, incluyendo al Ecuador. Los ecosistemas ubicados en los Andes son importantes en la producción de agua (Buytaert et al., 2006), biodiversidad y oferta de servicios ecosistémicos (Célleri & Feyen, 2009). El principal problema en el estudio de las variables climáticas en esta zona es que su investigación científica y su monitoreo son escasos; además las zonas de montaña presentan retos adicionales debido a su topografía compleja que causa alta variabilidad climática en distancias horizontales muy cortas impidiendo definir un límite de altitud para su identificación (Vásconez, 2013). La mejor manera de determinar variables como R_S o VPD en un sitio en particular es instalar instrumentos de medición como piranómetros, pirheliómetros o diferentes sensores de humedad, que además de ser costosos tienen la dificultad adicional de su operación, mantenimiento y calibración (Katiyar & Pandey, 2010). Incluso en lugares donde estas variables sean medidas podría haber datos faltantes por alguna falla del equipo o problemas de operación (Tabari et al., 2014). Otros problemas que pueden presentarse son la baja densidad de estaciones que no nos permiten abarcar mayor superficie monitoreada y la diferencia de altitud. Estas dificultades hacen que obtener estos datos sea aún más complicado en países en vías de desarrollo y en zonas de montaña (Droogers & Allen, 2002; Exner-Kittridge & Rains, 2010). Por lo tanto, el uso de modelos empíricos de estimación (ecuaciones derivadas empíricamente y

basadas en otros parámetros que permiten estimar el valor de la variable que se necesita) es una alternativa necesaria cuando se carece de registros o equipos. Por ello se han desarrollado varios modelos para la estimación de la radiación solar y el déficit de presión de vapor.

Para solucionar este problema se han desarrollado varios métodos para la estimación diaria de R_S y VPD utilizando datos meteorológicos fácilmente disponibles en la mayoría de estaciones meteorológicas. Los modelos empíricos de R_S se pueden clasificar en 4 categorías en función de los parámetros meteorológicos empleados: modelos basados en la duración de la insolación, nubosidad, temperatura u otros parámetros meteorológicos (precipitación, humedad relativa, temperatura de punto de rocío, temperatura del suelo) (Besharat et al., 2013). Los modelos de estimación de R_S basados en la duración de la insolación y nubosidad en general son más precisos que los que implican otras observaciones meteorológicas como la temperatura (Baigorria et al., 2004; Besharat et al., 2013). Sin embargo los datos de insolación y nubosidad no son fácilmente disponibles como los datos de temperatura del aire en estaciones meteorológicas estándar (Abraha & Savage, 2008; Rahimikhoob, 2010). Los modelos basados en temperatura son los más simples de aplicar y pueden ser utilizados en la mayoría de las estaciones ya que la temperatura es uno de los parámetros monitoreados en casi todas las estaciones; sin embargo son menos precisos, pero estos dependen de la zona en los que se utilicen ya que varias investigaciones han mostrado que son efectivos en diferentes sitios como España, Estados Unidos e Irán (Almorox, 2011; Besharat et al., 2013; Tabari et al., 2014). Uno de los métodos más comunes para estimar R_S es el modelo de Hargreaves-Samani (Hargreaves & Samani, 1985); además existen 2 modelos que modifican el modelo propuesto por Hargreaves-Samani y son: Allen (1995) y Annandale et al. (2002). Adicionalmente se proponen los modelos de Chen et al. (2004), que sugiere una relación logarítmica basada en la temperatura máxima y mínima, y el modelo propuesto por Ertekin & Yaldiz (1999) basado en la temperatura promedio del día. En cuanto al déficit de presión de vapor, ha sido modelado de diferentes



maneras (Doorenbos & Pruitt, 1977; Jensen et al., 1990). Sin embargo, la FAO recomienda un procedimiento estándar para el cálculo de VPD que utiliza temperatura del aire dependiendo, más que la disponibilidad de los datos y la complejidad de los modelos, de la calidad de datos disponibles y el clima donde se requiera el estudio (Allen, 2006). Para estimar VPD se utilizan modelos que tienen como base el modelo propuesto por la FAO56 pero con modificaciones en su ecuación presentados por Castellví et al. (1996) en su estudio realizado en España. Finalmente, el objetivo de este estudio es utilizar modelos basados en temperatura y determinar su desempeño en ecosistemas de montaña en dos gradientes altitudinales de los Andes del sur del Ecuador. Siendo prioritario identificar la relación de los modelos para estimar R_s y VPD que puedan funcionar apropiadamente en toda la zona.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el desempeño de diferentes modelos para la estimación de radiación solar y déficit de presión de vapor, a lo largo de dos gradientes altitudinales.

Objetivos específicos

- Identificar el mejor modelo para la estimación de la radiación solar a lo largo de los gradientes.
- Identificar el mejor modelo para la estimación del déficit de presión de vapor a lo largo de los gradientes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra situada a lo largo de 2 gradientes altitudinales al sur de la región Andina del Ecuador. La primera corresponde a la zona experimental del Observatorio Ecohidrológico Quinuas, ubicado en la cabecera del río Tomebamba que desemboca en el río Amazonas y éste en el Océano Atlántico, con un rango de elevación entre 2600 a 4000 m s. n. m. De acuerdo al mapa Geológico de la República del Ecuador (1982), la cuenca está comprendida por las formaciones Túri y Macuchi. Su geología por encima de los 3000 m s. n. m. comprende de lavas, piroclastos riolíticos, volcánoclastos andesíticos y tobas; por debajo de los 3000 m s. n. m. está comprendido de aluviones, terrazas y tillita. Parte de la cuenca, comprende al Parque Nacional Cajas (3160 a 4445 m s. n. m.) que son áreas protegidas contiguas (Delgad et al., 2006). El parque consiste en un 90% de pastizales de páramo llamados pajonales (Minga & Verdugo, 2007). En el área de páramo se pueden clasificar en cuatro sub-unidades de vegetación: páramos de pastizal, páramo de almohadillas, páramo arbustivo y bosque de *Polylepis*. La región presenta evidencia de glaciación del Pleistoceno con fuertes pendientes, pequeños valles en forma de U y lagos (Astudillo et al., 2015).

La segunda gradiente corresponde a la zona experimental del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay, ubicado en la cabecera del río Jubones que desemboca en el Océano Pacífico con un rango de elevación entre 2800 a 3800 m s. n. m. El clima, en esta gradiente, se encuentra influenciado al oeste por el régimen de la costa del Pacífico, y al este por las masas de aire continentales y tropicales del Atlántico (Vuille et al., 1999). El clima es generalmente frío y nublado, con presencia de lluvia diariamente (Padrón et al., 2015). Su geomorfología es glacial y el valle está rodeado por laderas con pendientes principalmente en un rango de 0%-20% (Mosquera et al., 2015). De acuerdo con el sistema de clasificación de suelos de la FAO, Zhurucay está comprendido principalmente por dos tipo de

suelo: Histosoles y Andosoles (Crespo et al., 2011). Debido a la actividad volcánica en el pasado, las bajas temperaturas y humedad constante, estos suelos son ricos en materia orgánica y muy porosos con una alta capacidad de infiltración y retención de agua de hasta un 90%, húmicos y ácidos de baja densidad aparente y bajo pH (Buytaert & Beven, 2011). La cobertura vegetal en Zhurucay, está dominada por pajonal, almohadillas y bosque de *Polylepis*. El principal uso de la tierra es el pastoreo extensivo de baja densidad animal (Crespo et al., 2011).

El área de estudio consiste de cuatro estaciones meteorológicas en la gradiente Quinuas: 1 Balzay, 2 Chirimachay, 3 Virgen y 4 Toreadora; y dos estaciones meteorológicas en la gradiente Zhurucay: 1 Campamento y 2 Principal (Figura 1). La ubicación y elevación a la que se encuentra cada estación, se encuentran detalladas en la Tabla 1. La estación Balzay corresponde al ecosistema de bosque siempreverde montano bajo, sin embargo esta zona actualmente esta urbanizada y su entorno consiste de diferentes infraestructuras como viviendas y carreteras. Chirimachay y Campamento, corresponde al ecosistema Bosque siempreverde montano alto, sector sur de la cordillera occidental. Las estaciones de Virgen, Toreadora y Principal están ubicadas en el ecosistema de páramo (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).

Tabla 1 Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

OBSERVATORIO ECOHIDROLÓGICO QUINUAS			
Estación	UTM X	UTM Y	Altitud (m s.n.m.)
Balzay	718286,01	9680122,08	2603
Chirimachay	705703,88	9688895,48	3298
Virgen	701110,74	9692382,23	3626
Toreadora	697618,73	9692227,08	3955
OBSERVATORIO ECOHIDROLÓGICO ZHURUCAY			
Campamento	696996,74	9656651,1	3324
Principal	696182,96	9661317,54	3773

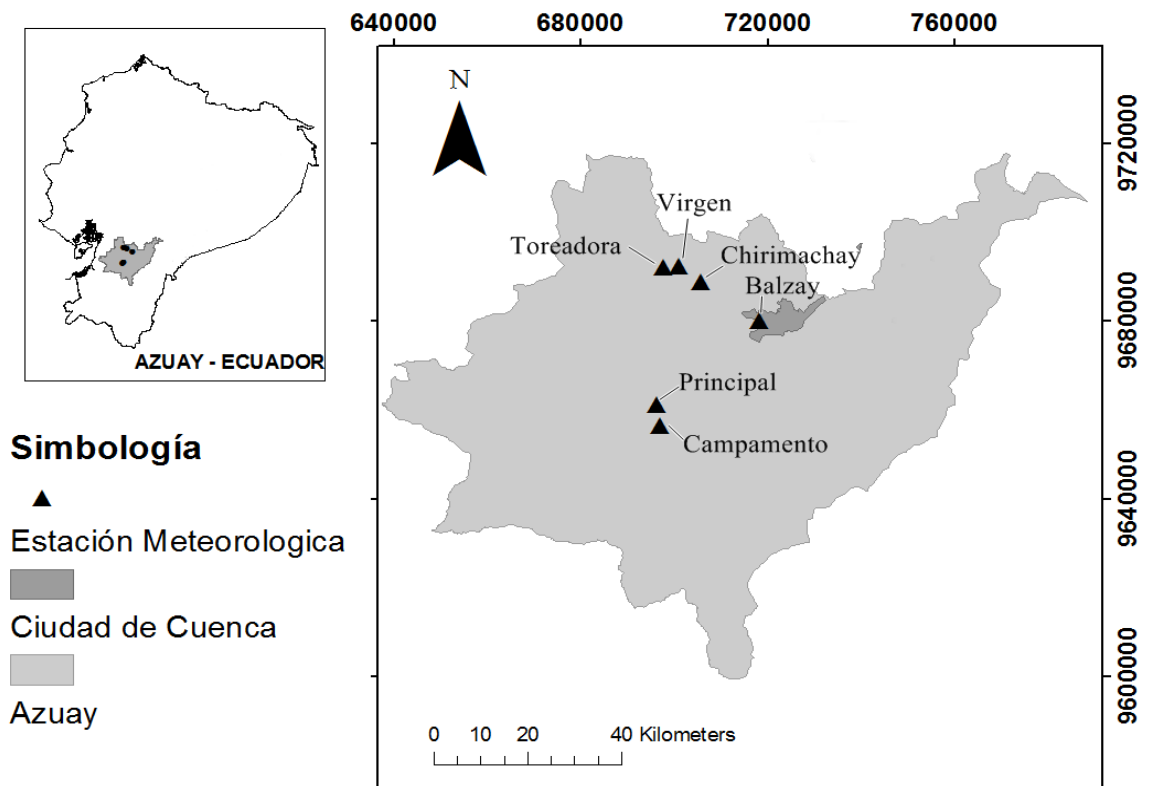


Figura 1 Ilustración geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

2.2. Mediciones de datos Meteorológicos

El estudio se realizó con datos diarios de 6 estaciones meteorológicas, proporcionados por el Centro de Hidrología y Clima del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca. Los datos corresponden a un periodo de 2 años, agosto 2013 – julio 2015 (a excepción de las estaciones de Balzay enero 2014 - julio 2015). Los sensores utilizados en este estudio fueron: un piranómetro CS300 (Campbell Scientific) y un sensor combinado de humedad relativa y temperatura del aire CS2150 (Temperature and Relative Humidity probe, Campbell Scientific). Las estaciones registran valores de temperatura promedio (T_{avg}), temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$), temperatura mínima ($T_{m\acute{i}n}$), humedad relativa promedio (HR), humedad relativa máxima ($HR_{m\acute{a}x}$), humedad relativa mínima ($HR_{m\acute{i}n}$) y radiación solar (R_s), con una frecuencia de 5

minutos. Para el estudio los valores de: temperatura máxima, mínima y promedio, radiación solar, humedad relativa y déficit de presión de vapor; se promediaron en escala diaria. Todas las mediciones son realizadas a 2 m sobre el nivel del suelo. En la Tabla 2 se muestra los promedios de las variables meteorológicas medidas en cada sitio de estudio, así como los valores máximos y mínimos de temperatura.

Tabla 2 Características climáticas promedio durante el periodo agosto 2013 - julio 2015 (Balzay enero 2014 – julio 2015).

OBSERVATORIO ECOHIDROLÓGICO QUINUAS					
ESTACIÓN	Temperatura [°C]			Humedad Relativa [%]	Radiación Solar [MJ/m²*día]
	Máxima	Mínima	Promedio		
Balzay	28,35	2,61	14,47	77,17	14,25
Chirimachay	18,57	-0,75	8,64	92,79	10,06
Virgen	16,95	-2,85	6,52	89,78	11,6
Toreadora	17,21	-2,45	5,27	91,26	11,62

OBSERVATORIO ECOHIDROLÓGICO ZHURUCAY					
Campamento	17,47	2,31	9,43	86,52	13,45
Principal	16,12	-2,79	5,84	94,55	13,25

2.3. Metodología

Con el fin de analizar el desempeño de diferentes modelos para estimar radiación solar (R_S) y déficit de presión de vapor (VPD) se estimó R_S y VPD para cada estación con los modelos propuestos en el periodo de dos años. Para el cálculo de VPD se utilizaron dos procedimientos: primero se usaron los modelos de estimación propuestos directamente y posteriormente, se usaron 2 modelos para estimar humedad relativa (HR) y partiendo de ésta calcular VPD. Las variables utilizadas en el estudio fueron agregadas en una escala temporal diaria para todos los cálculos. Luego se compararon los datos observados con los estimados mediante un análisis estadístico utilizando los índices MBE%, RMSE% y R^2 .

Posteriormente, los parámetros o coeficientes estándar de los modelos de estimación de R_S fueron calibrados para las condiciones de cada estación. El proceso de calibración consistió en encontrar los mejores coeficientes para cada

modelo, buscando minimizar el RMSE y que el MBE alcance valores cercanos a cero. Para ello se utilizó el primer año de datos para calibrar los modelos y el segundo año para validar las ecuaciones calibradas. Luego, con los cálculos obtenidos de los modelos calibrados se realizó un análisis estadístico similar al realizado con los modelos originales. Finalmente, se escogió (i) el mejor modelo para cada estación y (ii) para cada gradiente altitudinal, el modelo que produzca el menor error y la mejor relación lineal.

2.4. Revisión de Modelos

2.4.1. Modelos de estimación de Radiación Solar

2.4.1.1. Hargreaves-Samani, 1985

Este modelo está basado en la diferencia entre la temperatura máxima y mínima del aire ya que a esta se relaciona con el grado de cobertura de nubes en la localidad. Cuando el cielo está despejado, durante el día, se determinan altas temperaturas ($T_{\text{máx}}$) ya que la atmósfera está libre de nubes y permite la entrada de la radiación solar, por otro lado las bajas temperaturas que se presentan en la noche ($T_{\text{mín}}$) es debido a que menos radiación saliente de onda larga es absorbida por la atmósfera. Por otra parte, en condiciones nubladas, $T_{\text{máx}}$ será relativamente menor porque una parte de la radiación solar entrante nunca llega a la superficie de la tierra y es reflejada y absorbida por las nubes. De la misma manera, $T_{\text{mín}}$ será relativamente mayor ya que la cubierta de nubes se comporta como un manto disminuyendo la salida de la radiación de onda larga. Por lo tanto la diferencia entre la temperatura del aire máxima y mínima ($T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$) se puede usar como un indicador de la fracción de la radiación extraterrestre que alcanza la superficie de la tierra. (Hargreaves & Samani, 1985). El modelo de Hargreaves-Samani para estimar R_S es el siguiente:

$$R_s = k_{RS} \sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}} R_a \quad (1)$$

Donde:

- R_a = Radiación extraterrestre [$\text{MJm}^{-2} \text{day}^{-1}$].
- k_{RS} = Factor de ajuste empírico y se diferencia para zonas del “interior” en donde las masas de aire no están influenciadas fuertemente por un cuerpo grande del agua, $k_{RS} \approx 0,16$; y las regiones “costeras” situadas cerca de una masa grande de tierra y donde las masas de aire están influenciadas por un cuerpo de agua cercano, $k_{RS} \approx 0,19$. Para nuestro estudio usamos $k_{RS} = 0,16$.

La Radiación extraterrestre para periodos diarios viene dado por:

$$R_a = 37,6 dr (t \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin t) \quad (2)$$

Donde:

- dr = distancia relativa inversa Tierra-Sol (Ecuación 3)
- t = ángulo de radiación a la puesta del Sol (Ecuación 4) [rad]
- δ = declinación solar (Ecuación 5) [rad]
- φ = latitud [rad]

La distancia relativa inversa Tierra-Sol (dr), ángulo de radiación a la puesta del Sol (t) y la declinación solar (δ) vienen dadas por:

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (3)$$

$$t = \text{arcCos}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (4)$$

$$\delta = 0,4093 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (5)$$

Los valores de J vienen dados por el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

2.4.1.2. Allen, 1995

Allen (1995), continuó con el trabajo de Hargreaves y Samani (1985), y sugirió la estimación de k_{RS} como una función de altitud de la zona, para tener en cuenta el efecto de la elevación en la capacidad de calor volumétrico de la atmósfera.

$$k_{RS} = k_{RA} \left(\frac{P}{P_o} \right)^{0.5} \quad (6)$$

Donde:

- k_{RA} = Coeficiente cuyo valor se toma como 0,17 para las regiones interiores y 0,20 para las regiones costeras.
- P = Presión atmosférica diaria en el sitio (Ecuación 7) [kPa]
- P_o = Presión atmosférica a nivel del mar (101.3) [kPa]

$$P = P_o \left(\frac{293 - 0,0065Z}{293} \right)^{5,26} \quad (7)$$

Donde Z, es la elevación del sitio sobre el nivel del mar [m].

2.4.1.3. Annandale, 2002

Annandale et al. (2002) propuso la introducción de un factor de corrección para el parámetro k_{RS} para dar cuenta de los efectos que tiene la reducción de altura y grosor de la atmósfera sobre R_S , modificando el modelo de Hargreaves-Samani como:

$$k'_{RS} = k_{RS}(1 + 2,7 \times 10^{-5}Z) \quad (8)$$

2.4.1.4. Chen, 2004

Chen et al. (2004) propone el siguiente modelo:

$$R_S = [0,28 \ln(T_{máx} - T_{mín}) - 0,15] \times R_a \quad (9)$$

2.4.1.5. Ertekin-Yaldiz, 1999

Ertekin y Yaldiz (1999) sugieren que R_S puede ser calculada con la siguiente ecuación (Tabari et al., 2014):

$$R_S = -4,46 + 0,477R_a + 0,226T_{avg} \quad (10)$$

Donde T_{avg} , es la temperatura del aire promedio [°C].

2.4.2. Modelos de estimación del déficit de presión de vapor

Para estimar VPD es necesario calcular la presión de saturación de vapor (e), la cual está en función de la temperatura del aire. La relación entre las dos variables se expresa como:

$$e(T) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right] \quad (11)$$

Donde e , es la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire [kPa]; T , es la temperatura del aire [°C] y \exp , es la base del logaritmo natural (2,7183) (Allen, 2006).

2.4.2.1. Modelos para estimar VPD:

El primer modelo es el propuesto por la FAO para la estimación de datos faltantes, donde asume que la temperatura de rocío (T_d) es similar a T_{\min} , asumiendo que a la salida del sol, cuando la temperatura del aire es casi la mínima, la humedad relativa esta cercana a 100% ya que el aire se encuentra saturado (Allen, 2006).

2.4.2.1.1. FAO 56

$$VPD = \frac{e(T_{\max}) + e(T_{\min})}{2} - e(T_{\min}) \quad (12)$$

En su estudio, Castellví et al. (1996) propone los siguientes modelos para estimar

VPD (Ecuaciones 13 y 14):

2.4.2.1.2. Modelo 1

$$VPD = e(T_a) - e(T_d) \quad (13)$$

Donde T_a , se calcula evaluando el área total debajo de la función $e(T) - e(T_d)$ por medio de un método trapezoidal (Anexo 1), siendo T la temperatura del aire en el rango entre la T_{\min} y T_{\max} .

2.4.2.1.3. Modelo 2

$$VPD = e(T_{avg}) - e(T_d) \quad (14)$$

Donde T_{avg} , es la temperatura promedio del día (Allen, 2006).

2.4.2.2. Modelos para estimar HR:

Castellví et al. (1996) propone los siguientes modelos para estimar HR_{media} (Ecuación 16 y 17). A partir de HR se calculó e para la temperatura máxima y mínima (Ecuación 15), y a partir de estos resultados se calculó VPD por la ecuación propuesta por la FAO (Ecuación 11).

$$\frac{e(T_{\max}) + e(T_{\min})}{2} = \frac{e(T_{\min})}{HR_{media}} \times 100 \quad (15)$$

2.4.2.2.1. Modelo 1 HR

$$HR = \frac{e(T_d)}{e(T_{avg})} \quad (16)$$

2.4.2.2.2. Modelo 2 HR

$$HR = 100 \frac{e(T_d)}{\frac{1}{2}[e(T_a) + e(T_{avg})]} \quad (17)$$

Donde se asume $T_d = T_{\min}$ para todos los modelos, por lo propuesto por la FAO.

2.5. Criterios para la evaluación de resultados

Para validar y comparar entre si los distintos modelos se usaron los siguientes estimadores estadísticos: *Coficiente de Determinación* [R^2] que es la medida de qué tan bien la línea de regresión se aproxima a los puntos en la dispersión, un modelo es más eficiente cuando R^2 es más cercano a 1 (Ecuación 17); *Error medio cuadrático porcentual* [$RMSE\%$] que indica el rendimiento de los modelos, comparando la actual desviación entre los valores estimados y observados, si RMSE es menor, refleja un mejor rendimiento del modelo (Ecuación 18); *Error medio de sesgo porcentual* [$MBE\%$] al igual que RMSE indica el rendimiento de los modelos y además indica si un determinado modelo tiene una tendencia a la sobreestimar o subestimar los valores (Ecuación 19).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)(x_o - \bar{x}_o)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2][\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)^2]}} \right)^2 \quad (17)$$

$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_o|^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{x_o}{n}} \times 100 \quad (18)$$

$$MBE\% = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_o)}{\sum_{i=1}^n x_o} \times 100 \quad (19)$$

Donde el coeficiente de determinación esta dado por R^2 ; x_i , es el dato estimado por el modelo; x_o , es el dato observado o medido; n , es el numero de datos; \bar{x}_i , es el promedio de los datos estimados por el modelo; \bar{x}_o , es el promedio de los datos observados o medidos. Las unidades dependen de la variable analizada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Modelos de Radiación Solar (R_s)

3.1.1. Evaluación de modelos de estimación de R_s

Las Figuras 2 y 3 comparan la radiación solar observada (R_{SO}) y la radiación solar estimada con los diferentes modelos empíricos para las estaciones de los Observatorios Quinuas y Zhurucay.

En la gradiente Quinuas (Figura 2), se puede observar que R_{SO} en las estaciones Chirimachay, Virgen y Toreadora presenta un comportamiento similar en el período estudiado; por ejemplo todos presentan los menores valores de R_{SO} en el mismo mes (may-14) y los mayores valores de R_{SO} en el mismo mes (oct-14). Para la estación de Balzay, no es posible comparar con las otras estaciones de la gradiente ya que el periodo de estudio es distinto. Se puede observar que en la gradiente Quinuas, en todas las estaciones los modelos sobreestiman el valor de R_s . Ertekin-Yaldiz y Allen son los modelos que más se aproximan a las observaciones de R_{SO} , pero la línea de regresión del modelo Ertekin-Yaldiz no coincide con los puntos de dispersión de R_{SO} . También se puede observar que el comportamiento de los modelos es similar en la mayoría de las estaciones y no varía con la altura.

En la gradiente Zhurucay (Figura 3), se puede observar que R_{SO} en las dos estaciones estudiadas (Campamento y Principal) tienen un comportamiento distinto en el mismo periodo de tiempo. En la estación Principal, todos los modelos de radiación sobreestiman R_{SO} , en cambio en la estación Campamento, Hargreaves-Samani, Annandale y Ertekin-Yaldiz sobreestiman R_{SO} , pero los modelos Allen y Chen subestiman el valor de R_{SO} en los periodos jul-13 – nov-13, may-14 – ago-14, mar-15 – jul-15. En esta gradiente el comportamiento de los modelos depende más de los datos observados en cada estación ya que R_{SO} presenta comportamientos distintos que pueden ser influenciados por la

orientación opuesta de cada gradiente y a las condiciones climáticas de la gradiente, particularmente la nubosidad.

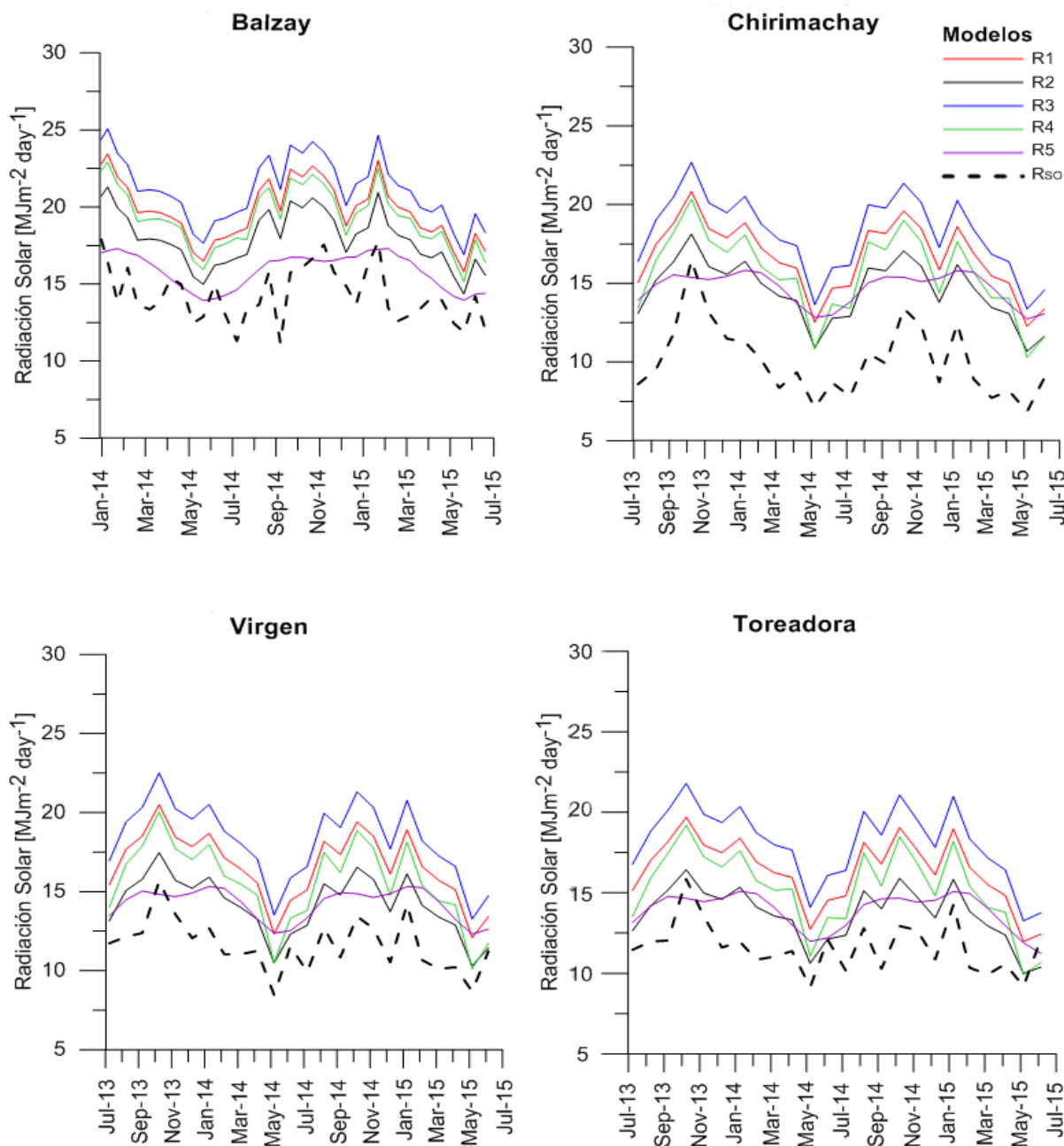


Figura 2 Comparación de valores de los promedios mensuales de radiación solar diaria observada y estimada por los diferentes modelos para el Observatorio Ecohidrológico Quinuas en el periodo agosto 2013 – julio 2015 (Balzay enero 2014 - julio 2015). Donde: R1, corresponde al modelo Hargreaves-Samani; R2, Allen; R3, Annandale; R4, Chen; R5, Ertekin-Yaldiz; R_{SO} es la radiación solar observada.

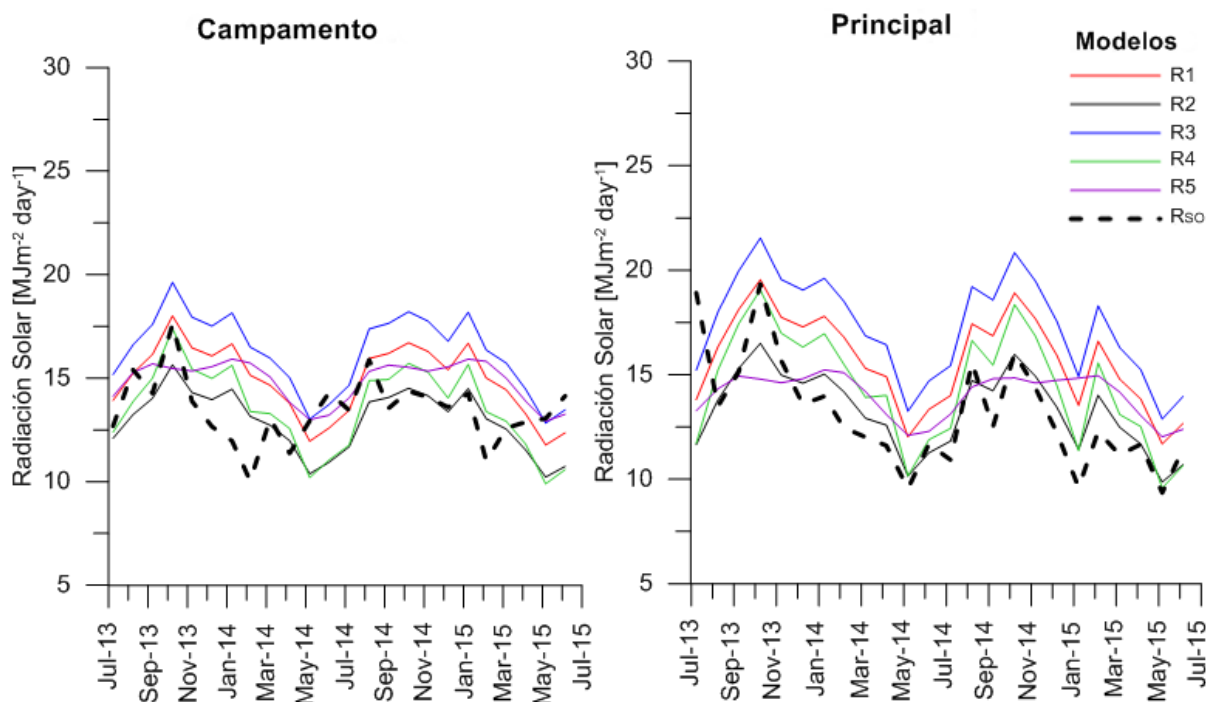


Figura 3 Comparación de valores de los promedios mensuales de radiación solar diaria observada y estimada por los diferentes modelos para el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay en el periodo agosto 2013 – julio 2015. Donde: R1, corresponde al modelo Hargreaves-Samani; R2, Allen; R3, Annandale; R4, Chen; R5, Ertekin-Yaldiz; R_{SO} es la radiación solar observada.

El resumen estadístico y coeficiente de determinación R^2 para los observatorios de Quinuas y Zhurucay se presenta en la Tabla 3. Como se muestra en la Tabla 3 en la gradiente de Quinuas la mayor parte de modelos presentaron un coeficiente de determinación R^2 mayor a 0,5 (excepto el modelo de Ertekin-Yaldiz). Por otro lado, la gradiente de Zhurucay presentó resultados de R^2 por debajo de 0,5. El modelo Ertekin-Yaldiz, que relaciona R_S con la temperatura promedio del día (T_{avg}), presentó resultados de R^2 por debajo de 0,01 en todas las estaciones. En el estudio realizado por Tabari et al. (2014) en Irán el modelo Ertekin-Yaldiz obtuvo resultados diarios de R^2 superiores a 0,7 por lo tanto R_S y T_{avg} presenta una baja relación entre valores diarios en ecosistemas húmedos y fríos como los estudiados pero en ecosistemas áridos como en Irán presenta una buena relación. Las figuras de correlación [R^2] entre los valores de R_S estimado y observado se muestran en el Anexo 2. De acuerdo a las Figuras 1 y 2 y la Tabla 3 casi todos los modelos

sobreestimaron el valor de la R_S con MBE% positivos, excepto en la estación Campamento en Zhurucay, donde para el modelo de Allen MBE% es negativo.

Tabla 3 Resultados estadísticos entre los valores diarios medidos de la R_S y los estimados por los modelos empíricos en cada estación para los Observatorios de Quinuas y Zhurucay en el periodo de 2 años.

MODELO	OBSERVATORIO ECOHIDROLÓGICO	ESTACIÓN	R^2	RMSE [%]	MBE [%]
Hargreaves-Samani	Quinuas	Balzay	0,58	42,90	38,55
		Chirimachay	0,63	72,29	65,95
		Virgen	0,56	50,44	43,32
		Toreadora	0,51	49,07	40,88
	Zhurucay	Campamento	0,25	29,85	10,84
		Principal	0,47	37,68	18,93
Allen	Quinuas	Balzay	0,58	32,09	25,89
		Chirimachay	0,63	53,72	44,39
		Virgen	0,56	34,16	22,14
		Toreadora	0,51	32,34	17,57
	Zhurucay	Campamento	0,25	27,95	-3,72
		Principal	0,47	33,33	0,34
Annandale	Quinuas	Balzay	0,58	51,84	48,28
		Chirimachay	0,63	85,98	80,73
		Virgen	0,56	63,04	57,35
		Toreadora	0,51	62,37	55,93
	Zhurucay	Campamento	0,25	34,88	20,79
		Principal	0,47	44,80	31,04
Chen	Quinuas	Balzay	0,57	39,85	35,04
		Chirimachay	0,59	65,89	55,13
		Virgen	0,54	44,25	34,24
		Toreadora	0,49	43,24	31,41
	Zhurucay	Campamento	0,28	28,08	0,86
		Principal	0,47	33,78	9,45
Ertekin-Yaldiz	Quinuas	Balzay	0,06	30,38	11,25
		Chirimachay	0,10	65,22	45,82
		Virgen	0,07	43,82	22,32
		Toreadora	0,05	42,21	19,34
	Zhurucay	Campamento	0,01	33,77	10,34
		Principal	0,08	43,16	5,44

El modelo de Annandale mostró errores más altos de R_s en todas las estaciones; este modelo introduce un factor de corrección para el coeficiente (k_{R_s}) de la ecuación de Hargreaves-Samani, basado en la altitud del lugar. Al contrario, al utilizar el modelo de Allen se obtuvieron mejores resultados en todas las estaciones, pese a que también introduce un factor de corrección para k_{R_s} pero con respecto a la presión atmosférica de la zona y la presión atmosférica a nivel del mar. El Anexo 3 muestra el promedio de los errores en las 6 estaciones para realizar un análisis general y para cada observatorio para realizar un análisis por gradiente. Para las 6 estaciones el modelo propuesto por Allen (1995) presenta mejores resultados con un RMSE del 35,60% , MBE del 17,77% promedio, seguido por el modelo de Chen con un RMSE de 42,52% , MBE del 27,69%. En un análisis general, para los observatorios de Quinuas y Zhurucay, Allen fue el mejor modelo con un RMSE del 38,08%, MBE del 27,50% y RMSE del 30,64%, MBE del -1,69% respectivamente. Sin embargo los errores en general y para las dos gradientes fueron relativamente altos por lo que se identificó la necesidad de calibrar las ecuaciones para intentar obtener mejores resultados.

3.1.2. Calibración de los modelos de estimación de R_s

La calibración es una herramienta necesaria para incrementar la precisión de estimación y la adaptación de los mejores modelos para las condiciones climáticas (locales) de cada estación. En base a los resultados presentados en la sección 3.1.1, se seleccionó los modelos propuestos por Hargreaves-Samani, Allen, Annandale y Chen para ser calibrados. El modelo Ertekin-Yaldiz se descartó ya que presentó resultados muy bajos de R^2 . El modelo propuesto por Chen (2004) fue calibrado tomando en cuenta el rango recomendado por el autor para los coeficientes a y b , lo cual se detalla en el Anexo 4.



3.1.2.1. Calibración de los modelos R_S para cada estación.

Las Figuras 4 y 5 comparan R_{SO} y la radiación solar estimada con los diferentes modelos calibrados y validados, para las estaciones de los Observatorios Quinuas y Zhurucay. En las dos gradientes, se puede observar que los modelos mejoraron aproximándose más a la línea de dispersión de R_{SO} . Para los modelos Hargreaves-Samani, Allen y Annandale se observa que sus puntos de dispersión son los similares. Por el contrario el modelo Chen presenta un comportamiento diferente en todas las estaciones y fue el que mejor se aproxima a los valores extremos de los datos observados ya sean máximos o mínimos en comparación a los otros 3 modelos. En la gradiente Quinuas el comportamiento de los modelos en el periodo de validación es similar al comportamiento del periodo de calibración. A lo largo de la gradiente no se observa una influencia de la altura en el desempeño de los modelos ni en la calibración. Para la gradiente de Zhurucay, en la estación Principal se puede observar que el comportamiento de los modelos calibrados se ajusta mejor a los datos observados que la estación Campamento presentan una diferencia muy notable. En la estación Campamento tanto en el periodo de calibración y validación hay meses en los que el valor estimado no se ajusta a la radiación solar observada; por ejemplo en el periodo nov-13 – abr-14 y may-14 – sep-14, los valores estimados de R_S presentan un comportamiento totalmente contrario con respecto a los datos observados.

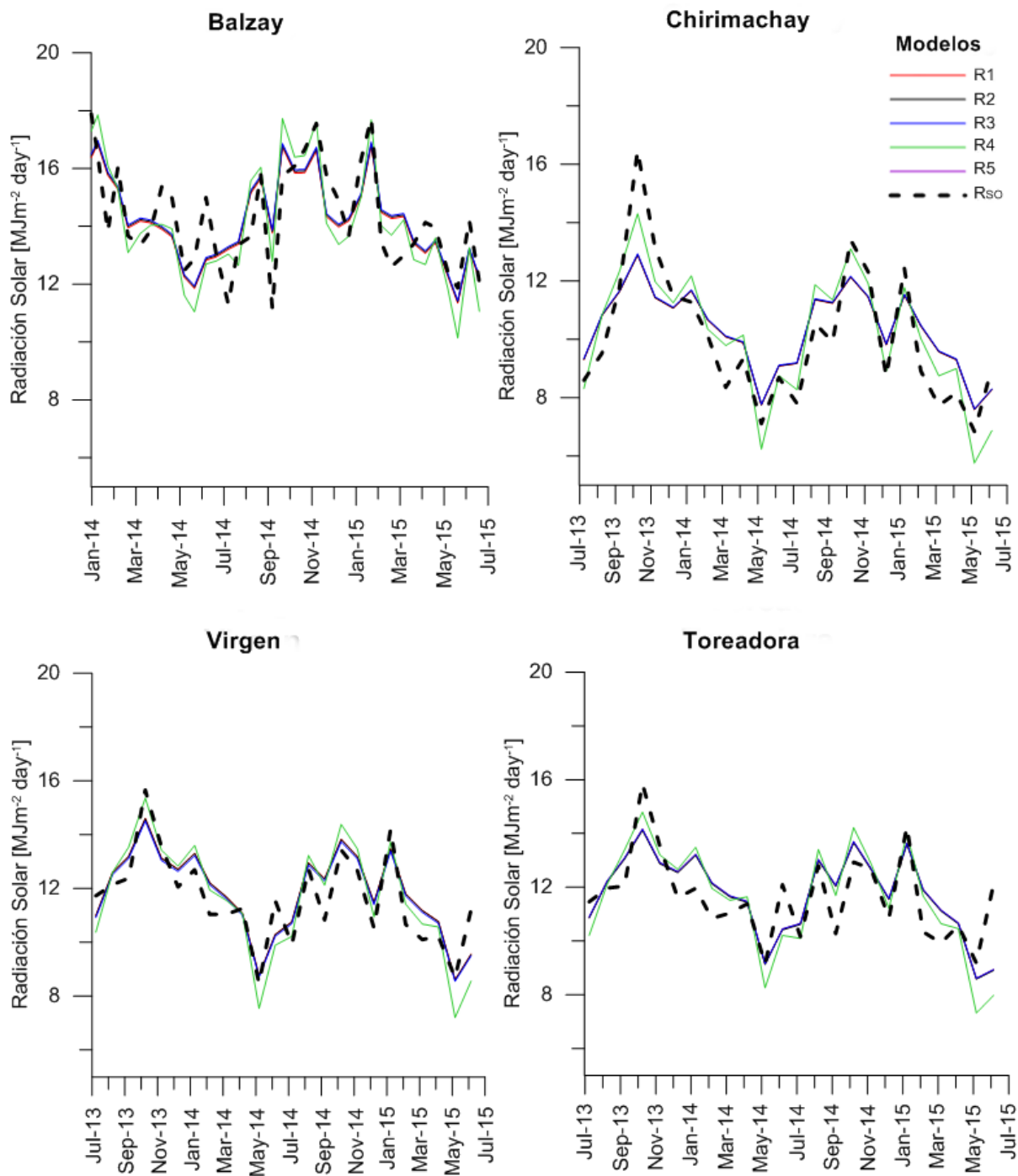


Figura 4 Comparación de valores de los promedios mensuales de radiación solar diaria observada y estimada por los diferentes modelos calibrados y validados para el Observatorio Ecohidrológico Quinuas en el periodo agosto 2013 – julio 2015 (Balzay enero 2014 - julio 2015). Donde: R1, corresponde al modelo Hargreaves-Samani; R2, Allen; R3, Annandale; R4, Chen; R5, Ertekin-Yaldiz; R_{SO} es la radiación solar observada.

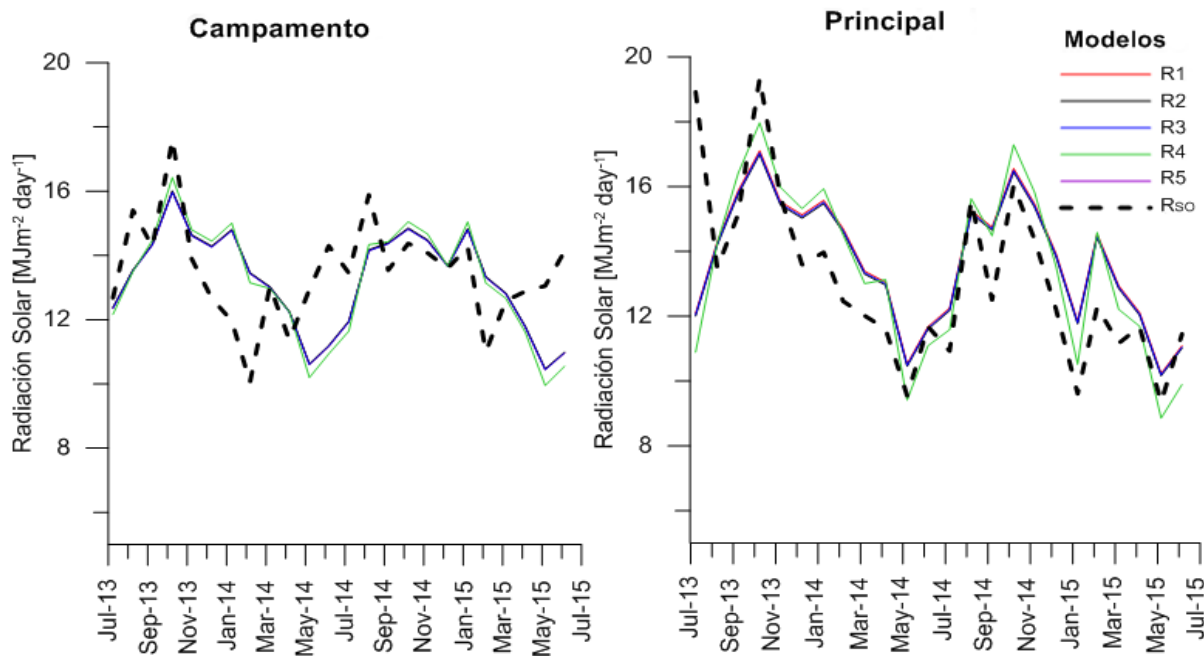


Figura 5 Comparación de valores de los promedios mensuales de radiación solar diaria observada y estimada por los diferentes modelos calibrados y validados para el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay en el periodo agosto 2013 – julio 2015. Donde: R1, corresponde al modelo Hargreaves-Samani; R2, Allen; R3, Annandale; R4, Chen; R5, Ertekin-Yaldiz; R_{SO} es la radiación solar observada.

En la Tabla 5 y 6 se puede observar que el coeficiente R^2 no se vio afectado luego de realizar la calibración; sin embargo, $RMSE\%$ y $MBE\%$ mejoraron notablemente. Incluso, en el periodo de validación, en la mayoría de las estaciones los valores estadísticos $RMSE\%$ mejoraron. En las dos gradientes, los modelos Hargreaves-Samani, Allen y Annandale presentan diferencias similares entre el periodo de calibración y validación para todas las estaciones.

Como se muestra en la Tabla 4 para la gradiente de Quinuas, $RMSE\%$ validado mejora en casi todas las estaciones excepto en la estación Toreadora. Los mejores resultados de $MBE\%$ se dieron en la estación de Balzay con la menor diferencia entre el periodo de calibración y validación a excepción del modelo Chen con una variación de MBE de 3,46%, siendo el modelo menos favorable para esta estación. Para las estaciones de Chirimachay, Virgen y Toreadora el modelo con los mejores resultados fue el propuesto por Chen, presentando la

menor diferencia de MBE% entre el periodo de calibración y validación. El coeficiente calibrado utilizado en el modelo Hargreaves-Samani y corregido por Allen y Annandale presentó valores similares en las estaciones Balzay, Virgen y Toreadora. En la estación Chirimachay el coeficiente de Hargreaves-Samani y los coeficientes para el modelo Chen variaron su valor después de ser calibrados con respecto a las otras 3 estaciones de la gradiente, asumiendo que se debe a las condiciones climáticas de la zona influenciada por su ecosistema diferente.

Como se muestra en la Tabla 5 para la gradiente de Zhurucay los modelos mejoraron en el valor de RMSE% entre el periodo de calibración y validación para las dos estaciones, pero el valor de MBE% presentó variaciones mayores que la gradiente de Quinuas. En la estación Campamento todos los modelos subestimaron el valor de R_S para el periodo de validación con la ecuación calibrada. Para la estación Principal ocurrió lo contrario, todos los modelos sobreestimaron el valor de R_S para el periodo de validación con la ecuación calibrada. En general el modelo de Chen fue el que mostró mejores resultados para las dos estaciones ya que fue el que tuvo menor diferencia entre el periodo validado y calibrado de MBE%.

Tabla 4 Ecuaciones calibradas de los modelos empíricos de R_S para cada estación y análisis estadístico para el Observatorio Ecohidrológico Quinuas

ESTACIÓN	MODELO		ECUACIÓN	R^2	RMSE (%)		MBE (%)	
	Hargreaves-Samani	Ec. Org	$R_S = 0,16\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,58	42,90		38,55	
		Ec. Cal	$R_S = 0,115\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,58	20,69*	(18,39)	-0,25*	(-0,64)
Balzay	Allen	Ec. Org	$K_{RS} = 0,17\left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,5}$	0,58	32,09		25,89	
		Ec. Cal	$K_{RS} = 0,135\left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,5}$	0,58	20,67*	(18,33)	0,14*	(-0,26)
	Annandale	Ec. Org	$K'_{RS} = K_{RS}(1 + 2,7 \times 10^{-5}Z)$	0,58	51,84		48,28	
		Ec. Cal	$K'_{RS} = K_{RS}(1 - 1,06 \times 10^{-4}Z)$	0,58	20,66*	(18,35)	0,49*	(0,09)
	Chen	Ec. Org	$R_S = [0,28 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,15] \times R_a$	0,59	39,85		35,04	
		Ec. Cal	$R_S = [0,327 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,41] \times R_a$	0,59	18,80*	(17,54)	0,17*	(-3,29)
Chirimachay	Hargreaves-Samani	Ec. Org	$R_S = 0,16\sqrt{T_{max} - T_{min}}R_a$	0,63	72,29		65,95	
		Ec. Cal	$R_S = 0,099\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,63	33,86*	(33,35)	0,26*	(5,38)

Allen	Ec. Org	$K_{RS} = 0,17 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,5}$	0,63	53,72	44,39	
	Ec. Cal	$K_{RS} = 0,121 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,5}$	0,63	33,85*	(33,36)	0,34* (5,47)
Annandale	Ec. Org	$K'_{RS} = K_{RS}(1 + 2,7 \times 10^{-5}Z)$	0,63	85,98	80,73	
	Ec. Cal	$K'_{RS} = K_{RS}(1 - 1,15 \times 10^{-4}Z)$	0,63	33,83*	(33,37)	0,58* (5,72)
Chen	Ec. Org	$R_S = [0,28 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,15] \times R_a$	0,59	63,89	55,13	
	Ec. Cal	$R_S = [0,253 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,245] \times R_a$	0,59	30,84*	(31,42)	0,41* (1,61)
Hargreaves-Samani	Ec. Org	$R_S = 0,16\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,56	50,44	43,32	
	Ec. Cal	$R_S = 0,114\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,56	28,42*	(25,19)	0,68* (3,66)
Allen	Ec. Org	$K_{RS} = 0,17 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,5}$	0,56	34,16	22,14	
	Ec. Cal	$K_{RS} = 0,142 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,5}$	0,56	28,42*	(25,18)	0,59* (3,56)
Annandale	Ec. Org	$K'_{RS} = K_{RS}(1 + 2,7 \times 10^{-5}Z)$	0,56	63,04	57,35	
	Ec. Cal	$K'_{RS} = K_{RS}(1 - 8,06 \times 10^{-5}Z)$	0,56	28,45*	(25,14)	0,01* (2,97)
Chen	Ec. Org	$R_S = [0,28 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,15] \times R_a$	0,54	44,25	34,24	
	Ec. Cal	$R_S = [0,235 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,165] \times R_a$	0,54	27,65*	(25,01)	0,06* (1,02)
Hargreaves-Samani	Ec. Org	$R_S = 0,16\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,51	49,07	40,88	
	Ec. Cal	$R_S = 0,115\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,51	27,32*	(28,11)	0,68* (1,89)
Allen	Ec. Org	$K_{RS} = 0,17 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,5}$	0,51	32,34	17,57	
	Ec. Cal	$K_{RS} = 0,146 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,5}$	0,51	27,33*	(28,10)	0,39* (1,61)
Annandale	Ec. Org	$K'_{RS} = K_{RS}(1 + 2,7 \times 10^{-5}Z)$	0,51	62,37	55,93	
	Ec. Cal	$K'_{RS} = K_{RS}(1 - 7,1 \times 10^{-5}Z)$	0,51	27,32*	(28,11)	0,74* (1,96)
Chen	Ec. Org	$R_S = [0,28 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,15] \times R_a$	0,50	43,24	31,41	
	Ec. Cal	$R_S = [0,229 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,147] \times R_a$	0,50	26,73*	(28,69)	0,31* (0,42)

Los valores con asterisco * corresponden al periodo de calibración; los valores entre paréntesis () corresponden al periodo de validación; Ec. Org, es la ecuación original del modelo; Ec. Cal, es la ecuación calibrada.

Tabla 5 Ecuaciones calibradas de los modelos empíricos de R_s para cada estación y análisis estadístico para el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay.

ESTACIÓN	MODELO	ECUACIÓN	R ²	RMSE (%)	MBE (%)	
Campamento	Hargreave s-Samani	Ec. Org $R_s = 0,16\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,25	29,85	10,84	
		Ec. Cal $R_s = 0,142\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,25	28,69* (26,82)	0,05* (-3,23)	
	Allen	Ec. Org $K_{RS} = 0,17\left(\frac{P}{P_o}\right)^{0,5}$	0,25	27,95	-3,72	
		Ec. Cal $K_{RS} = 0,174\left(\frac{P}{P_o}\right)^{0,5}$	0,25	28,69* (26,80)	0,23* (-3,06)	
	Annandale	Ec. Org $K'_{RS} = K_{RS}(1 + 2,7 \times 10^{-5}Z)$	0,25	34,88	20,79	
		Ec. Cal $K'_{RS} = K_{RS}(1 - 3,4 \times 10^{-5}Z)$	0,25	28,69* (26,83)	-0,04* (-3,29)	
	Chen	Ec. Org $R_s = [0,28 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,15] \times R_a$	0,28	28,08	0,86	
		Ec. Cal $R_s = [0,232 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,07] \times R_a$	0,28	28,49* (26,88)	0,02* (-3,75)	
	Principal	Hargreave s-Samani	Ec. Org $R_s = 0,16\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,47	37,68	18,93
			Ec. Cal $R_s = 0,14\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	0,47	37,48* (27,15)	0,65* (7,73)
Allen		Ec. Org $K_{RS} = 0,17\left(\frac{P}{P_o}\right)^{0,5}$	0,47	33,33	0,34	
		Ec. Cal $K_{RS} = 0,175\left(\frac{P}{P_o}\right)^{0,5}$	0,47	37,50* (26,99)	-0,02* (7,01)	
Annandale		Ec. Org $K'_{RS} = K_{RS}(1 + 2,7 \times 10^{-5}Z)$	0,47	44,80	31,04	
		Ec. Cal $K'_{RS} = K_{RS}(1 - 3,4 \times 10^{-5}Z)$	0,47	37,49* (27,06)	0,28* (7,33)	
Chen		Ec. Org $R_s = [0,28 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,15] \times R_a$	0,47	33,78	9,45	
		Ec. Cal $R_s = [0,271 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,158] \times R_a$	0,47	36,81* (25,76)	0,11* (4,86)	

Los valores con asterisco * corresponden al periodo de calibración; los valores entre paréntesis () corresponden al periodo de validación; Ec. Org, es la ecuación original del modelo; Ec. Cal, es la ecuación calibrada.

La Tabla 6 muestra el promedio de los errores de los modelos calibrados en las 6 estaciones para hacer un análisis general y para cada observatorio para hacer un análisis por gradiente. Los resultados de RMSE% y MBE% han mejorado en todos los casos en más de un 35% RMSE y más de un 90% MBE como se indica en el Anexo 5. Se puede observar que en general el mejor modelo calibrado fue el propuesto por Chen. La única limitación del modelo Chen es que la mínima diferencia entre la temperatura máxima y mínima del día debe ser 1,7 °C ya que diferencias menores resultan en datos de radiación negativos; esto se debe a la limitación del logaritmo natural (ln) en su ecuación. En nuestro estudio esto no fue una limitante ya que en la estación que mayor presentó este caso fue en Chirimachay con 7 datos negativos de 730, sin embargo es un factor que se debe

tomar en consideración para futuras aplicaciones de esta ecuación. Para el estudio realizado por Besharat et. al (2013) en la ciudad Yazd-Irán, el modelo propuesto por Chen resultó ser el mejor de los modelos empíricos basados en temperatura con valores diarios. Por lo tanto se puede concluir que el modelo de Chen puede ser aplicado después de ser calibrado en zonas áridas como Irán y para ecosistemas húmedos y fríos como los páramos andinos, para estimar valores de R_S diarios.

Tabla 6 Resultados estadísticos promedios de la radiación solar estimada para cada modelo calibrado.

MODELO		RMSE [%]		MBE [%]	
Hargreaves-Samani	Promedio General	30,33*	(26,63)	0,35*	(4,03)
	Promedio Quinuas	27,57*	(26,26)	0,34*	(2,57)
	Promedio Zhurucay	33,09*	(26,99)	0,35*	(5,48)
Allen	Promedio General	30,34*	(26,58)	0,25*	(3,82)
	Promedio Quinuas	27,57*	(26,24)	0,37*	(2,60)
	Promedio Zhurucay	33,10*	(26,91)	0,13*	(5,04)
Annandale	Promedio General	30,33*	(26,60)	0,31*	(4,00)
	Promedio Quinuas	27,57*	(26,24)	0,46*	(2,69)
	Promedio Zhurucay	33,09*	(26,95)	0,16*	(5,31)
Chen	Promedio General	29,33*	(26,00)	0,17*	(2,13)
	Promedio Quinuas	26,01*	(25,67)	0,26*	(-0,06)
	Promedio Zhurucay	32,65*	(26,32)	0,07*	(4,31)

Los valores con asterisco * corresponden al periodo de calibración; los valores entre paréntesis () corresponden al periodo de validación.

3.1.2.2. Calibración de los modelos R_S para cada gradiente

El modelo Hargreaves-Samani es uno de los más usados y recomendado por la FAO-56 (Allen et al., 2006). Este modelo utiliza un factor de ajuste empírico (k_{RS}). El factor k_{RS} al ser calibrado dio resultados diferentes a lo largo de las dos gradientes como se muestra en la Tabla 7 y 8. En la gradiente de Quinuas, k_{RS} calibrado fue similar para las estaciones de Balzay, Virgen y Toreadora (0,115

aproximadamente), pero en la estación de Chirimachay disminuyó un 13,16% (0,099). Esta variación corresponde a que Chirimachay es un ecosistema diferente (Bosque siempreverde montano alto) a Balzay que es una zona urbana y Virgen y Toreadora que pertenecen a páramo. En la gradiente de Zhurucay, k_{RS} calibrado fue similar en las estaciones del Campamento y Principal.

Tabla 7 Valores de k_{RS} para las estaciones del Observatorio Ecohidrológico Quinuas.

	BALZAY	CHIRIMACHAY	VIRGEN	TOREADORA
k_{RS}	0,115	0,099	0,114	0,115

Tabla 8 Valores de k_{RS} para las estaciones del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay.

	CAMPAMENTO	PRINCIPAL
k_{RS}	0,142	0,14

Los resultados similares de k_{RS} nos ayudaron a poder generar una sola ecuación de cada modelo para las dos gradientes presentadas en las Tablas 9 y 10. Para los modelos de Hargreaves-Samani, Allen y Annandale, se promedió los coeficientes. En el modelo de Chen se obtuvieron nuevos coeficientes a y b calibrados para todas las estaciones de la gradiente.

Tabla 9 Análisis estadístico y ecuación calibrada y única de cada modelo empírico de R_s para toda la gradiente del Observatorio Ecohidrológico Quinuas en el periodo de 2 años.

MODELO	ECUACIÓN	ESTACIÓN	R2	RMSE (%)	MBE (%)
Hargreaves-Samani	$R_s = 0,111\sqrt{T_{max} - T_{min}}R_a$	Balzay	0,58	20,46	-3,88
		Chirimachay	0,63	35,68	15,13
		Virgen	0,56	27,06	-0,57
		Toreadora	0,51	27,95	-2,26
Allen	$K_{RS} = 0,136\left(\frac{P}{P_o}\right)^{0.5}$	Balzay	0,58	19,86	0,71
		Chirimachay	0,63	35,81	15,51
		Virgen	0,56	27,26	-2,29
		Toreadora	0,51	28,67	-5,94
Annandale	$K'_{RS} = K_{RS}(1 - 9,315 \times 10^{-5}Z)$	Balzay	0,58	20,26	4,95
		Chirimachay	0,63	35,63	14,97
		Virgen	0,56	27,82	-5,09
		Toreadora	0,51	30,43	-11,02

Chen	$R_S = [0,23 \ln(T_{max} - T_{min}) - 0,17] \times R_a$	Balzay	0,58	19,17	-0,80
		Chirimachay	0,59	32,81	10,68
		Virgen	0,54	26,70	-4,25
		Toreadora	0,49	28,34	-6,52

Tabla 10 Análisis estadístico y ecuación calibrada y única de cada modelo empírico de R_S para toda la gradiente del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay en el periodo de 2 años.

MODELO	ECUACIÓN	ESTACIÓN	R2	RMSE (%)	MBE (%)
Hargreaves-Samani	$R_S = 0,141\sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}R_a$	Campamento	0,25	27,80	-2,32
		Principal	0,47	33,52	4,81
Allen	$K_{RS} = 0,174\left(\frac{P}{P_o}\right)^{0.5}$	Campamento	0,25	27,74	-1,45
		Principal	0,47	33,42	3,36
Annandale	$K'_{RS} = K_{RS}(1 - 3,4 \times 10^{-5}Z)$	Campamento	0,25	27,76	-1,69
		Principal	0,47	33,43	3,67
Chen	$R_S = [0,27 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,15] \times R_a$	Campamento	0,25	28,14	-4,17
		Principal	0,47	32,56	4,09

Para la gradiente de Quinuas, el modelo calibrado que en general presentó mejores resultados en promedio fue el propuesto por Chen (Ecuación 20), con 26,76% RMSE en promedio y -0,22% MBE en promedio para toda la gradiente.

$$R_S = [0,23 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,17] \times R_a \quad (20)$$

Lo mismo ocurrió para la gradiente de Zhurucay, donde el modelo de Chen (Ecuación 21), obtuvo 30,35% RMSE en promedio y -0,04% MBE en promedio para toda la gradiente.

$$R_S = [0,27 \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - 0,15] \times R_a \quad (21)$$

En general, los resultados obtenidos en este estudio indican que en la gradiente de Quinuas, influenciada por el Amazonas y el Océano Atlántico, los valores de R_S puede ser estimados con los modelos empíricos basados solo en temperatura después de ser calibrados. En esta gradiente los resultados fueron favorables en todos los casos, proponiendo como el mejor modelo el de Chen et. al (2004). Para la gradiente de Zhurucay, contraria su orientación a Quinuas e influenciada por el Océano Pacífico, los resultados muestran que su comportamiento es diferente y

que se debe buscar otros métodos para estimar R_S , aunque los resultados de MBE% y RMSE% fueron aceptables, presenta una correlación R^2 menor al 50% en todas las estaciones. Por lo tanto la relación entre la temperatura máxima y mínima con la radiación solar para la gradiente de Zhurucay es baja, y se recomienda utilizar otros modelos basados en parámetros meteorológicos distintos.

3.2. Modelos de Déficit de Presión de Vapor (VPD)

3.2.1. Evaluación de modelos de estimación de VPD

En las Figuras 6 y 7 se puede observar que en la mayoría de las estaciones el comportamiento de los modelos y del déficit de presión de vapor observado (VPD_O) es similar, excepto para la estación Campamento donde la línea de regresión de los modelos presenta diferente comportamiento en el periodo de tiempo con respecto a VPD_O . En la mayoría de las estaciones se puede observar al menos un modelo que se ajusta mejor a VPD_O . En la gradiente Quinuas, para las estación Balzay los modelos FAO 56 y el Modelo 1 son los que más se aproximan a VPD_O , por el contrario en las estaciones Chirimachay y Virgen los modelos que más se aproximan a VPD_O son Modelo 2 y Modelo 1 HR, y en Toreadora el Modelo 2 HR. Para la gradiente Zhurucay, en la estación Principal los modelos que más se aproximan son Modelo 2 y Modelo 1 HR similar a Chirimachay y Virgen en la gradiente Quinuas. Para la estación Campamento, los modelos presentan diferencias con respecto a VPD_O en casi todo el periodo de estudio, a excepción de algunos periodos como sep-13, feb, 14 y jun-15.

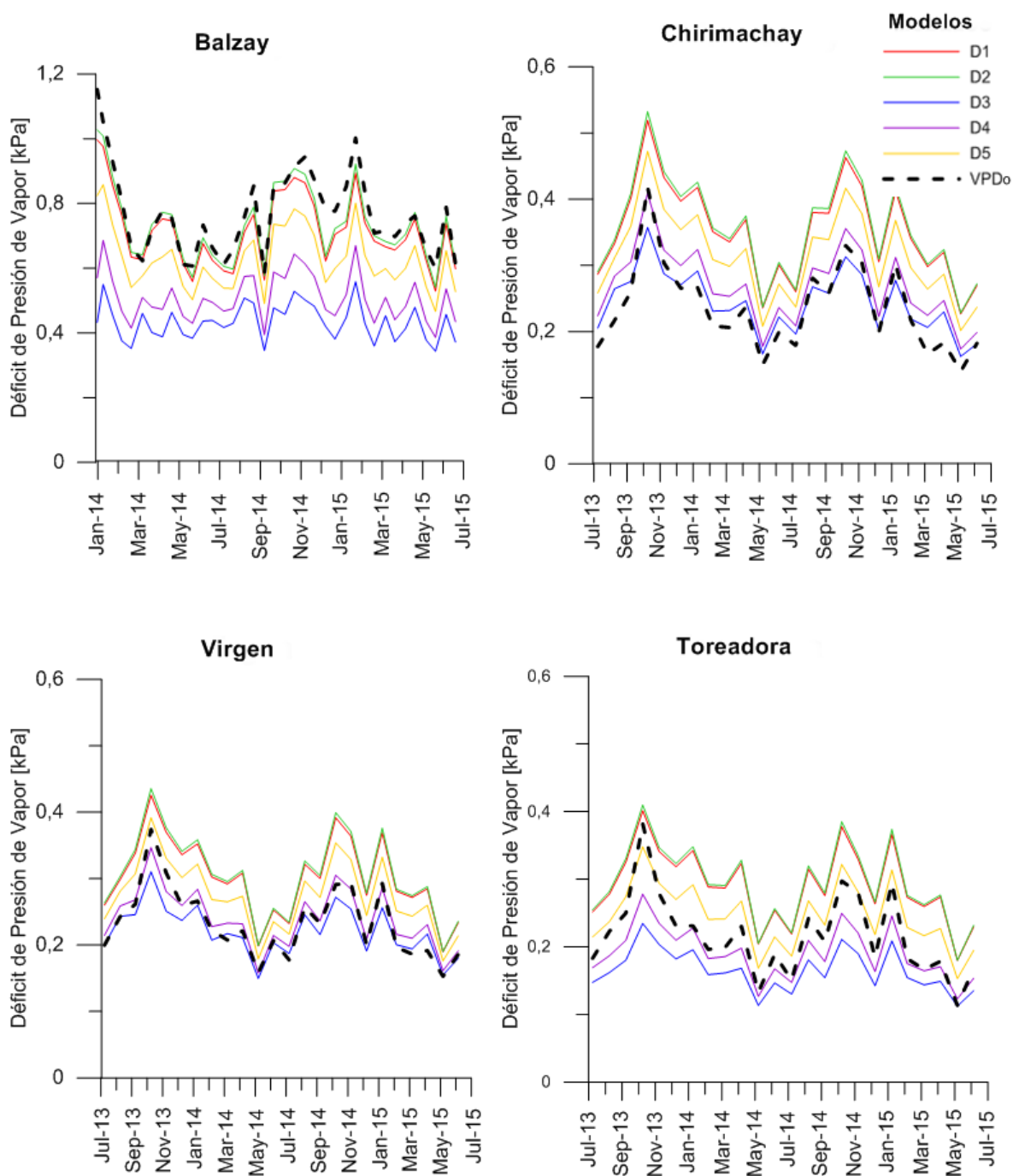


Figura 6 Comparación de valores de los promedios mensuales de déficit de presión de vapor diaria observada y estimada por los diferentes modelos calibrados y validados para el Observatorio Ecohidrológico Quinuas en el periodo agosto 2013 – julio 2015 (Balzay enero 2014 - julio 2015). Donde: D1, corresponde al modelo FAO 56; D2, Modelo 1; D3, Modelo2; D4, Modelo 1 HR; D5, Modelo 2 HR; VPD_o, es el déficit de presión de vapor observada.

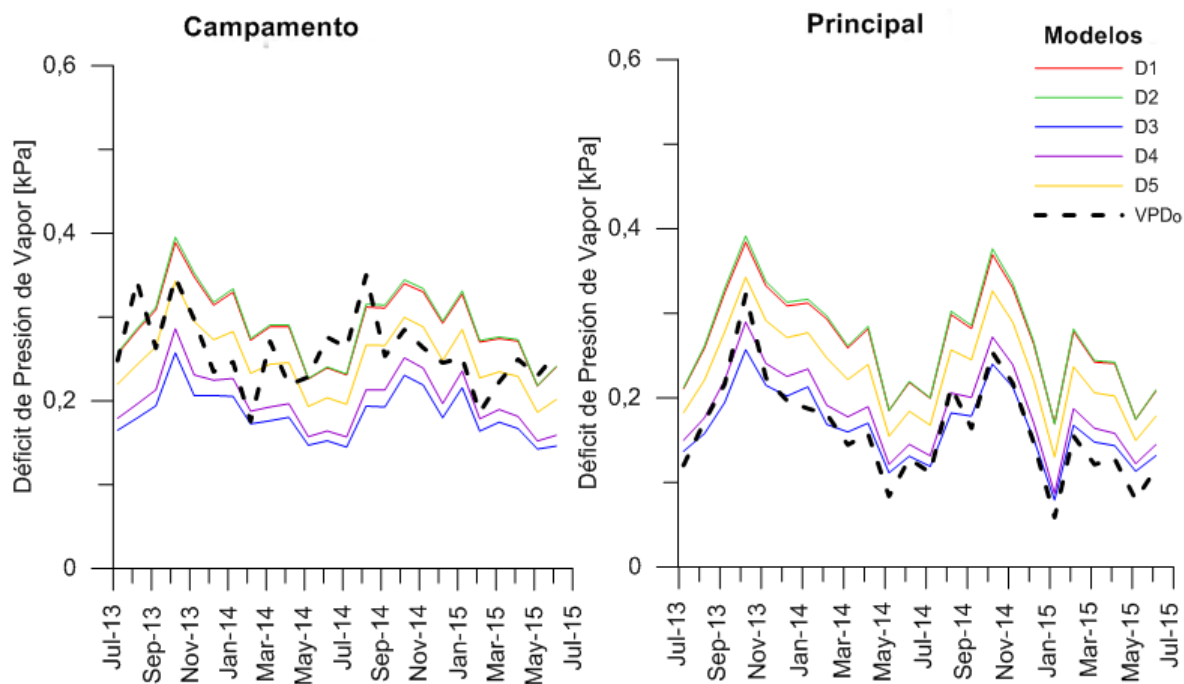


Figura 7 Comparación de valores de los promedios mensuales de déficit de presión de vapor diaria observada y estimada por los diferentes modelos calibrados y validados para el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay en el periodo agosto 2013 – julio 2015. Donde: D1, corresponde al modelo FAO 56; D2, Modelo 1; D3, Modelo2; D4, Modelo 1 HR; D5, Modelo 2 HR; VPD_o , es el déficit de presión de vapor observada.

El resumen estadístico y coeficiente de determinación R^2 de los modelos empíricos de estimación de VPD para los observatorios de Quinuas y Zhurucay se presentan en la Tabla 11. Las figuras de correlación [R^2] entre los valores de VPD estimado y observado se muestran en el Anexo 6. El Modelo 1, que calcula la temperatura T_a por el método trapezoidal, y el modelo propuesto por la FAO 56, basado en temperatura máxima y mínima, presentaron resultados de R^2 iguales en todas las estaciones y poca diferencia en los valores de RMSE% y MBE%. En las Figuras 6 y 7 se puede observar que en todas las estaciones estos modelos están muy cerca el uno del otro. Para la gradiente Quinuas, los modelos FAO 56 y el Modelo 1 fueron los que presentaron mejores resultados de R^2 en las 4 estaciones, sin embargo los valores de RMSE% y MBE% fueron más altos que los otros modelos para la estaciones de Chirimachay, Virgen y Toreadora. Por lo tanto para elegir el mejor modelo para cada estación se tomó en cuenta los

mejores resultados de RMSE%, MBE% y que R^2 sea mayor a 0,5. En la estación de Balzay el mejor modelo fue el Modelo 1, basado en la temperatura media (T_{med}) entre la temperatura máxima ($T_{máx}$) y temperatura mínima ($T_{mín}$) del día. Para la estación de Chirimachay el mejor modelo fue el Modelo 2, basado en la temperatura promedio del día (T_{avg}), seguido del Modelo 1 HR, basado también en T_{avg} . Para la estación de la Virgen el mejor modelo fue el Modelo 1 HR. Para la estación Toreadora el mejor modelo fue el Modelo 2 HR, basado en la temperatura promedio del día (T_{avg}) y la temperatura T_a calculada por el método trapezoidal; seguido del Modelo 1 HR. Por lo tanto se puede ver que la estación Balzay tiene mejor relación entre la temperatura máxima y mínima y VPD, que las otras tres estaciones que presentan una mejor relación entre la temperatura promedio del día y VPD, esto puede ocurrir porque la diferencia entre T_{avg} y T_{med} es mayor en la estación Balzay que en las otras 3 estaciones, como se puede observar en el Anexo 7.

En la gradiente de Zhurucay para la estación Campamento los resultados de R^2 fueron menores a 0,5 con todos los modelos, diferente a la estación Principal donde los resultados de R^2 fueron mayores a 0,5 con todos los modelos. Esta diferencia en la misma gradiente puede venir dada a que la estación del Campamento pertenece a un ecosistema (Bosque siempreverde montano alto) diferente a la Principal (Páramo). A pesar que la estación de Chirimachay en la gradiente de Quinuas también pertenece al mismo ecosistema que el Campamento, la influencia climática es diferente, principalmente la cantidad de nubosidad, lo que también podría afectar a la relación entre la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor en esta estación.

Por lo tanto para la estación Campamento no se puede recomendar ninguno de los modelos utilizados por que como se muestra en la Figura 7 la relación entre los datos observados y estimados es muy baja. Para la estación Principal el mejor modelo fue el Modelo 2 y el Modelo 1 HR.

Tabla 11 Resultados estadísticos entre los valores diarios observados de déficit de presión de vapor y los valores estimados por los modelos empíricos para las diferentes estaciones en los Observatorios Quinuas y Zhurucay en el periodo de 2 años.

OBSERVATORIO ECOHIDROLÓGICO	ESTACIÓN	MODELO	R ²	RMSE [%]	MBE [%]
Quinuas	Balzay	FAO 56	0,86	12,41	-6,50
		Modelo 1	0,86	11,65	-3,99
		Modelo 2	0,46	48,15	-43,32
		Modelo 1 HR	0,61	66,47	-27,01
		Modelo 2 HR	0,80	62,46	-10,02
	Chirimachay	FAO 56	0,85	55,23	49,76
		Modelo 1	0,85	57,93	52,22
		Modelo 2	0,59	35,33	3,59
		Modelo 1 HR	0,69	34,39	14,35
		Modelo 2 HR	0,80	42,58	33,97
	Virgen	FAO 56	0,82	36,65	29,78
		Modelo 1	0,82	38,62	31,64
		Modelo 2	0,60	29,21	-5,05
		Modelo 1 HR	0,68	26,40	3,29
		Modelo 2 HR	0,78	28,71	17,86
Toreadora	FAO 56	0,87	40,47	34,44	
	Modelo 1	0,87	42,07	36,26	
	Modelo 2	0,75	42,08	-23,62	
	Modelo 1 HR	0,81	31,22	-11,83	
	Modelo 2 HR	0,87	26,11	13,74	
Zhurucay	Campamento	FAO 56	0,45	34,02	12,11
		Modelo 1	0,45	34,59	13,15
		Modelo 2	0,36	44,41	-28,94
		Modelo 1 HR	0,39	39,80	-22,35
		Modelo 2 HR	0,44	31,85	-3,87
	Principal	FAO 56	0,82	69,04	62,86
		Modelo 1	0,82	70,88	64,69
		Modelo 2	0,66	38,97	1,60
		Modelo 1 HR	0,71	37,88	13,40
		Modelo 2 HR	0,80	50,10	40,30

En la Tabla 12 se muestra el promedio de los valores estadísticos RMSE% y MBE% en las 6 estaciones con los datos estimados de VPD, para realizar un análisis general. El mejor modelo en promedio es el Modelo 1 HR, que presenta

mejores resultados en casi todas las estaciones, a excepción de la estación Balzay. En las Tablas 13 y 14 están los resultados de un análisis de los modelos para cada gradiente, y en las dos gradientes se encuentra que el mejor modelo es Modelo 1 HR. Por ello se recomienda utilizar el Modelo 1 HR para cualquiera de las gradientes, a excepción de la estación de Balzay que pertenece a zona urbana, concluyendo que es mejor utilizar modelos basados en la temperatura máxima y mínima del día para zonas con influencia humana o urbana.

Tabla 12 Resultados estadísticos promedios generales del déficit de presión de vapor estimada para cada modelo para los Observatorios Quinuas y Zhurucay en el periodo de 2 años.

PROMEDIO GENERAL (Quinuas y Zhurucay)			
MODELO	R²	RMSE [%]	MBE [%]
FAO 56	0,78	41,30	30,41
Modelo 1	0,78	42,63	32,33
Modelo 2	0,57	39,69	-15,95
Modelo 1 HR	0,65	39,23	-4,75
Modelo 2 HR	0,75	40,30	15,33

Tabla 13 Resultados estadísticos promedios del déficit de presión de vapor estimada para cada modelo para el Observatorio Ecohidrológico Quinuas en el periodo de 2 años.

PROMEDIO OBSERVATORIO QUINUAS			
MODELO	R²	RMSE [%]	MBE [%]
FAO 56	0,85	36,19	26,87
Modelo 1	0,85	37,57	29,03
Modelo 2	0,60	38,69	-17,10
Modelo 1 HR	0,70	39,62	-5,03
Modelo 2 HR	0,81	39,96	13,89



Tabla 14 Resultados estadísticos promedios del déficit de presión de vapor estimada para cada modelo para el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay en el periodo de 2 años.

PROMEDIO OBSERVATORIO ZHURUCAY			
MODELO	R²	RMSE [%]	MBE [%]
FAO 56	0,63	51,53	37,49
Modelo 1	0,63	52,74	38,92
Modelo 2	0,51	41,69	-13,67
Modelo 1 HR	0,55	38,84	-4,48
Modelo 2 HR	0,62	40,98	18,22

4. CONCLUSIONES

El monitoreo meteorológico es indispensable para la ejecución o desarrollo de diferentes proyectos. Las variables meteorológicas que presentan mayor problema al ser medidas son la radiación solar (R_S) y el déficit de presión de vapor (VPD). Existen distintos modelos empíricos basados en diferentes parámetros meteorológicos para estimar estas variables. Sin embargo, estos modelos no han sido probados en condiciones de alta montaña y particularmente en los Andes, por lo que se desconoce el efecto de su utilización. Este estudio tuvo como objetivo analizar el desempeño de diferentes modelos para la estimación de R_S y VPD, a lo largo de dos gradientes altitudinales, utilizando modelos basados en temperatura del aire debido a que esta es una variable comúnmente medida en muchas estaciones meteorológicas y a que el rendimiento de los diferentes modelos para R_S y VPD varía significativamente según el clima del sitio. Con este fin, 5 modelos de estimación de R_S , específicamente Hargreaves-Samani, Allen, Annadale, Chen y Ertekin-Yaldiz, fueron evaluados, calibrados y validados; y 5 modelos de VPD, FAO56 y 4 modificaciones propuestas por Castellví et al (1996), fueron evaluados en dos gradientes ubicadas en los Observatorios Ecohidrológicos Quinuas y Zhurucay al sur de los Andes del Ecuador. Mediante distintos índices estadísticos se compararon los modelos entre sí estableciendo sus capacidades predictivas.

Los resultados de los modelos de R_S mostraron que el modelo no calibrado con las mejores estimaciones es Allen para las dos gradientes. En general, en la gradiente Zhurucay el modelo Allen presenta mejores valores de MBE% y RMSE% que en la gradiente Quinuas, pero en Quinuas presenta un mejor coeficiente de determinación R^2 , por lo tanto para decidir cuál es el mejor modelo se tomo en cuenta los valores MBE y RMSE. Los índices RMSE% y MBE% fueron altos y además indicaron una sobreestimación de R_S en casi todas las estaciones. De esta manera se concluye que es necesario calibrar los modelos antes de que puedan ser utilizados para estimar R_S .

El modelo Ertekin-Yaldiz presentó un R^2 por debajo del 10% y se descartó su calibración, concluyendo que este modelo no es recomendado para estimaciones de R_S diarias en zonas húmedas y frías y que la temperatura promedio (T_{avg}) del día no tiene una relación significativa con R_S .

Para la calibración de los modelos de R_S se buscó minimizar el RMSE% y que el MBE% alcance valores cercanos a cero. Después de la calibración, los modelos mejoraron su desempeño, reduciendo el error de MBE. El mejor modelo calibrado fue Chen en todas las estaciones para las dos gradientes, obteniendo estimaciones muy buenas. Con esto podemos concluir que el modelo Chen puede ser aplicado después de ser calibrado en ecosistemas húmedos y fríos a cualquier altitud para estimar valores de R_S diarios. También fue posible identificar un modelo general óptimo para cada gradiente. Esto se consiguió al optimizar los parámetros de los diferentes modelos, promediando los coeficientes de las ecuaciones y generar una ecuación única para cada gradiente. Se encontró que el modelo de Chen calibrado y promediado fue el mejor en las 2 gradientes. Sin embargo, los resultados de R^2 que presenta en la gradiente de Zhurucay son relativamente bajos por lo que se recomienda evaluar otros modelos de estimación.

Los mejores modelos de estimación de VPD para la gradiente Quinuas son diferentes para cada estación; para la estación Balzay el mejor modelo fue el Modelo 1, para Chirimachay el Modelo 2 y el Modelo 1 HR, para Virgen el Modelo 1 HR y Toreadora el Modelo 1 HR y el Modelo 2 HR. El Modelo 1 y FAO56, para promedios diarios, son matemáticamente equivalentes por lo tanto se puede utilizar cualquiera de los dos modelos. En la gradiente Zhurucay, para la estación Campamento ningún modelo presentó resultados de estimación favorables con R^2 menor al 50%. Para la estación Principal los mejores modelos son el Modelo 2 y el Modelo 1 HR. Al igual que para R_S , también fue posible identificar un modelo general óptimo para cada gradiente. El mejor modelo para la gradiente de Quinuas es el Modelo 1 HR, sin embargo para zonas urbanas como Balzay se recomienda



utilizar el Modelo 1 o FAO56. En la gradiente Zhurucay no se puede generalizar un solo modelo debido a que solo se cuenta con dos estaciones y en una de ellas ningún modelo presentó estimaciones favorables.

Los resultados presentados en este trabajo permiten estimar valores de R_S y VPD diarios en el caso de perder datos observados de R_S o HR o de no disponer de sensores que midan estas variables.

Trabajo futuro

Se han identificado las siguientes actividades de investigación que darán continuidad al presente estudio.

1. Analizar otros modelos de estimación de R_S y VPD basados en temperatura u otras variables meteorológicas para la gradiente Zhurucay que genere mejores resultados que los obtenidos en este trabajo.
2. Validar las ecuaciones calibradas en otras gradientes o en otros sitios de altura en los Andes.
3. Validar las ecuaciones calibradas para su uso con diferente tipo de datos: horarios, anuales, etc.
4. Utilizar modelos basados en otros parámetros meteorológicos diferente a temperatura del aire y comparar la diferencia de estimación.
5. Estudiar el impacto de los modelos de estimación de la radiación solar y déficit de presión de vapor en la estimación de la ETo.

5. REFERENCIAS

- Abraha, M. G., & Savage, M. J. (2008). Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(3), 401–416. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.10.001>
- Allen, R. G. (1995). Evaluation procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature. *United Nations Food and Agricultural Organization (FAO)*, (Rome).
- Allen, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de agua de los cultivos. *Fao*, 297.
- Almorox, J. (2011). Estimating global solar radiation from common meteorological data in Aranjuez, Spain. *Turkish Journal of Physics*, 35(1), 53–64. <http://doi.org/10.3906/fiz-0912-20>
- Annandale, J., Jovanovic, N., Benadé, N., & Allen, R. (2002). Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrigation Science*, 21(2), 57–67. <http://doi.org/10.1007/s002710100047>
- Astudillo, P. X., Tinoco, B. a, & Siddons, D. C. (2015). The avifauna of Cajas National Park and Mazán Reserve, southern Ecuador, with notes on new records. *Cotinga*, 37(December), 1–11.
- Baede, M. (1990). Annex I. *Biomass, mixi*, 941–954.
- Baigorria, G. A., Villegas, E. B., Trebejo, I., Carlos, J. F., & Quiroz, R. (2004). Atmospheric transmissivity: Distribution and empirical estimation around the central Andes. *International Journal of Climatology*, 24(9), 1121–1136. <http://doi.org/10.1002/joc.1060>
- Besharat, F., Dehghan, A. a., & Faghih, A. R. (2013). Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 798–821. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.043>
- Buytaert, W., & Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25(11), 1784–1799. <http://doi.org/10.1002/hyp.7936>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean p??ramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53–72. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Castellví, F., Perez, P. J., Villar, J. M., & Rosell, J. I. (1996). Analysis of methods for estimating vapor pressure deficits and relative humidity. *Agricultural and Forest*



- Meteorology*, 82(1-4), 29–45. [http://doi.org/10.1016/0168-1923\(96\)02343-X](http://doi.org/10.1016/0168-1923(96)02343-X)
- Célleri, R., & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355. <http://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Cervantes-osornio, R. (2013). Comparación de modelos para estimar la presión real de vapor de agua. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, IV, 37–54.
- Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S., & Zhao, W. (2004). Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and Management*, 45(11-12), 1759–1769. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.019>
- Córdova, M., Carrillo, G., & Rolando, C. (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, 14–22.
- Cordova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., & Celleri, R. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data Application to the Wet Paramo of Southern Ecuador. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230–239. <http://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-14-0024.1>
- Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücken, A., Breuer, L., Frede, H.-G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1-4), 164–174. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Delgado, O., López, F., Aguilar, M., & Cordero, M. (2006). Componente geomorfología glaciar del Parque Nacional Cajas – Ecuador. *Unpublished Report, Universidad(Cuenca-Ecuador)*.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 154.
- Droogers, P., & Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under. *Irrigation and Drainage Systems*, 16, 33–45.
- Ertekin, C., & Yaldız, O. (1999). Estimation of monthly average daily global radiation on horizontal surface for Antalya (Turkey). *Renewable Energy*, 17(1), 95–102. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00109-8](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00109-8)
- Exner-Kittridge, M., & Rains, M. (2010). Case study on the accuracy and cost/effectiveness in simulating reference evapotranspiration in West-Central Florida. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(9), 696–703. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000239](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000239)
- George H. Hargreaves, & Zohrab A. Samani. (1985). Reference Crop Evapotranspiration



- from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <http://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). Evapotranspiration, Irrigation Water Requirements. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices*, 70(American Society for Civil Engineers, New York), 360.
- Katiyar, a. K., & Pandey, C. K. (2010). Simple correlation for estimating the global solar radiation on horizontal surfaces in India. *Energy*, 35(12), 5043–5048. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.014>
- König-Langlo, G., Sieger, R., Schmithüsen, H., Bücker, A., Richte, F., & Dutton, E. G. (2013). Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Update of the Technical Plan for BSRN Data Management. *Worlds Meteorological Organization*, 30. Retrieved from <http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/gcos-174.pdf>
- Minga, D., & Verdugo, A. (2007). Riqueza florística y endemismo del Parque Nacional Cajas. *Unpublished Report, Herbario A(Cuenca-Ecuador)*.
- Ministerio de Ambiente del Ecuador. (2012). Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural (a), 143. Retrieved from http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEYENDA-ECOSISTEMAS_ECUADOR_2.pdf
- Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Céleri, R., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2015). Catena Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, 125, 120–128. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>
- OMM. (2007). FUNCIÓN DE LAS NORMALES CLIMATOLÓGICAS EN UN CLIMA CAMBIANTE. *Organización Meteorológica Mundial*, 61(Ginebra), 1.
- Ovando, G., & Rodríguez, A. (2003, August). GLOBAL EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA ,. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32(Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), 45–61.
- Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P., & Céleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985–996. <http://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Rahimikhoob, A. (2010). Estimating global solar radiation using artificial neural network and air temperature data in a semi-arid environment. *Renewable Energy*, 35(9), 2131–2135. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.029>
- Ricardo, J. A., & Haber, J. R. G. (1998). Ecuaciones generales para la presión de vapor en rangos amplios de temperaturas. *Tecnología Química. Universidad de Oriente*, 18(Cuba), 3–11.
- 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*, (September 2014), 141217125340005. <http://doi.org/10.1080/02626667.2014.947293>

Vásconez, P. M. (2013). Montañas y agua en la mitad del mundo. *EcoCiencia*, (Páramo Andino), 1–44.

Vuille, M., Bradley, R., & Keimig, F. (1999). Climate Variability in the Andes of Ecuador and Its Relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies. *Journal of Climate*, 13(Hastenrath 1981), 2520–2535. [http://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2)

ANEXOS

Anexo 1. Cálculo de T_a .

La temperatura T_a , se calcula evaluando el área total por debajo de la función $e(T) - e(T_d)$ entre $T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$ por medio del método trapezoidal. Por lo tanto la temperatura T incrementa desde $T_{\text{mín}}$ en un proceso iterativo y el área correspondiente entre T y $T_{\text{mín}}$, se calcula en cada paso. Cuando este valor alcanza una superficie total media con una diferencia de menos el 1%, el proceso se detiene y se obtiene T_a como el valor de la temperatura (Figura A1). Desde un punto de vista físico T_a nos permite estimar la presión de saturación del día $e(T_a)$:

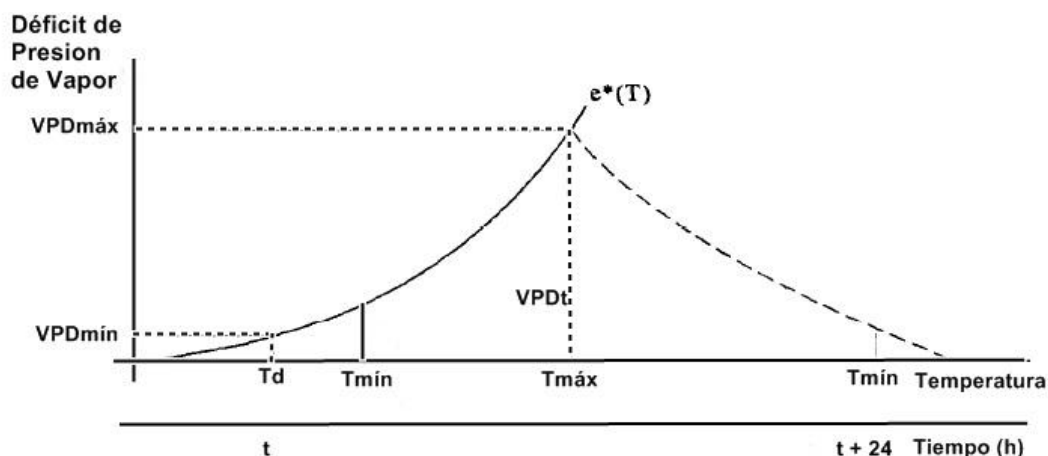
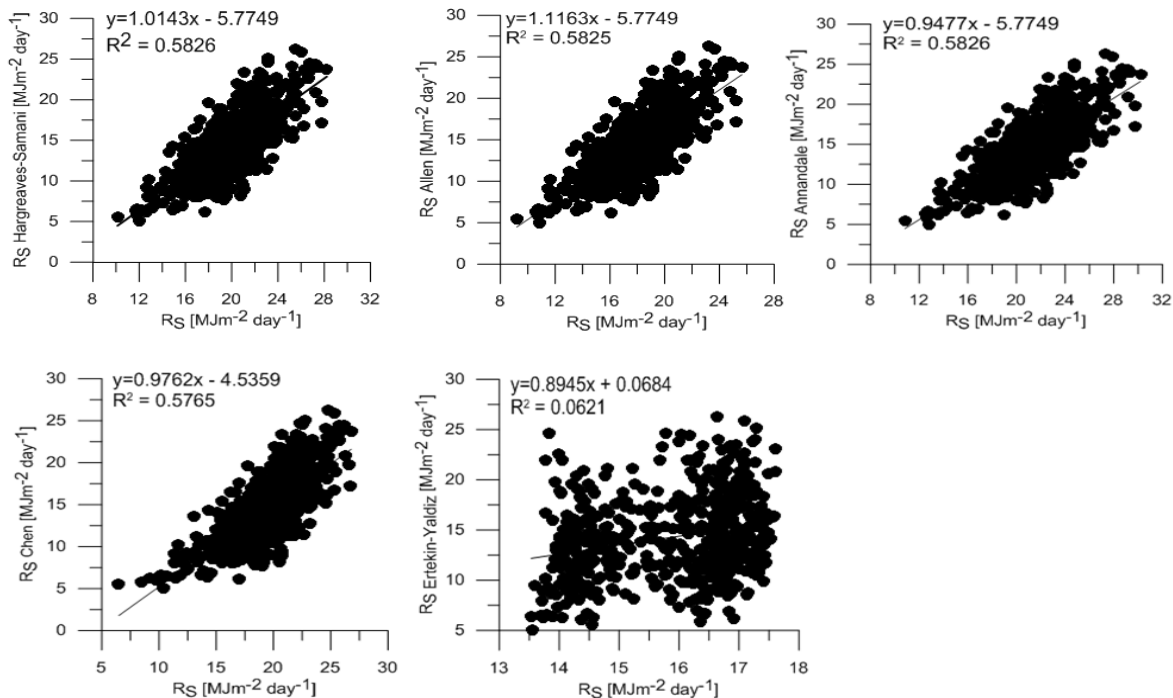


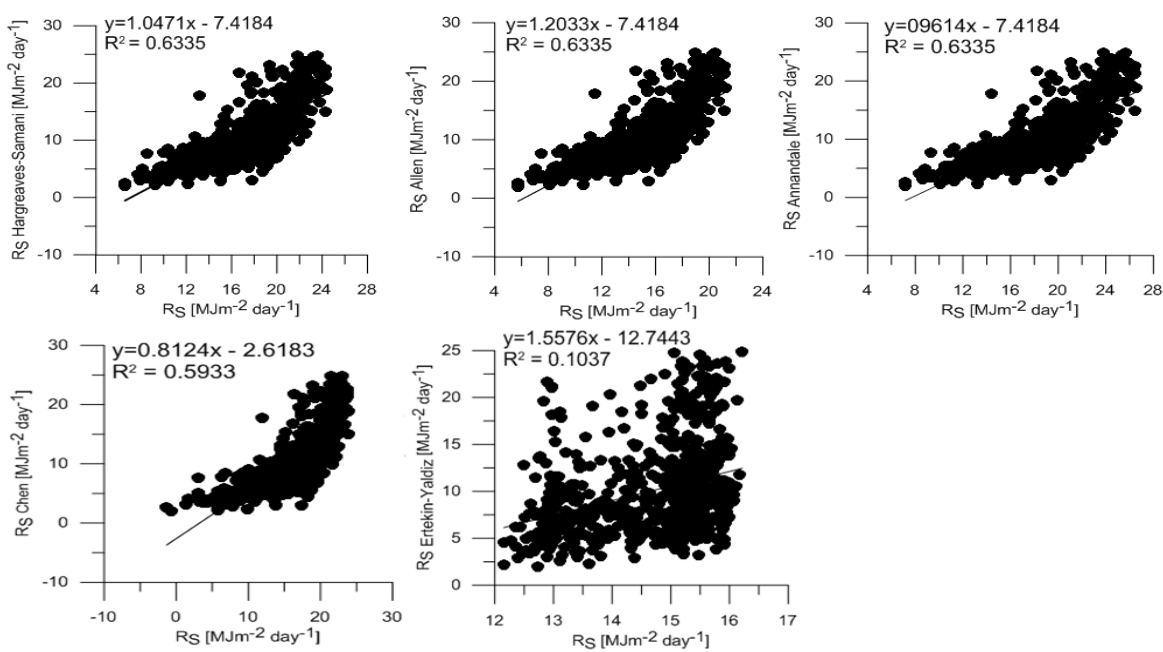
Figura A1: Variación teórica de presión de vapor durante un día usando la hipótesis de simetría, para el cálculo de la temperatura T_a . El origen a sido tomado en $e^*(T_d)$. Donde $VPD_{\text{máx}}$ es el déficit de presión de vapor a la temperatura máxima del día $T_{\text{máx}}$ y $VPD_{\text{mín}}$ es el déficit de presión de vapor a la temperatura mínima del día $T_{\text{mín}}$.

Anexo 2. Correlación entre las estimaciones de R_s por los modelos empíricos y los valores de R_s observados en cada estación.

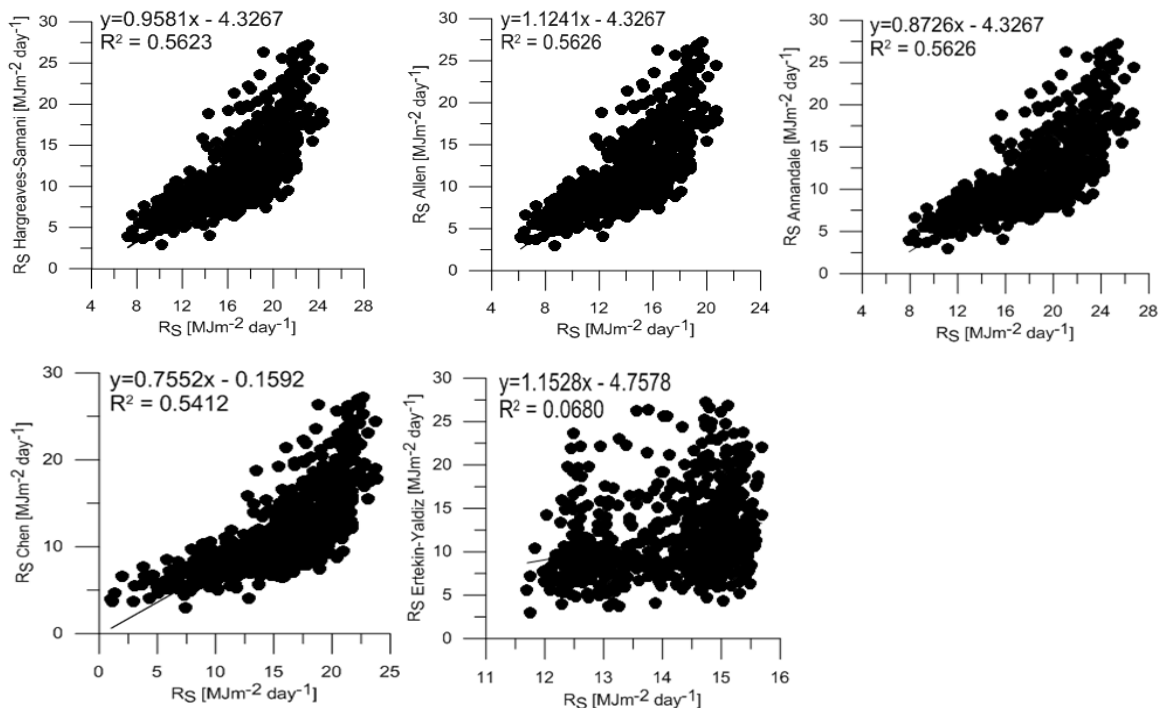
Balzay



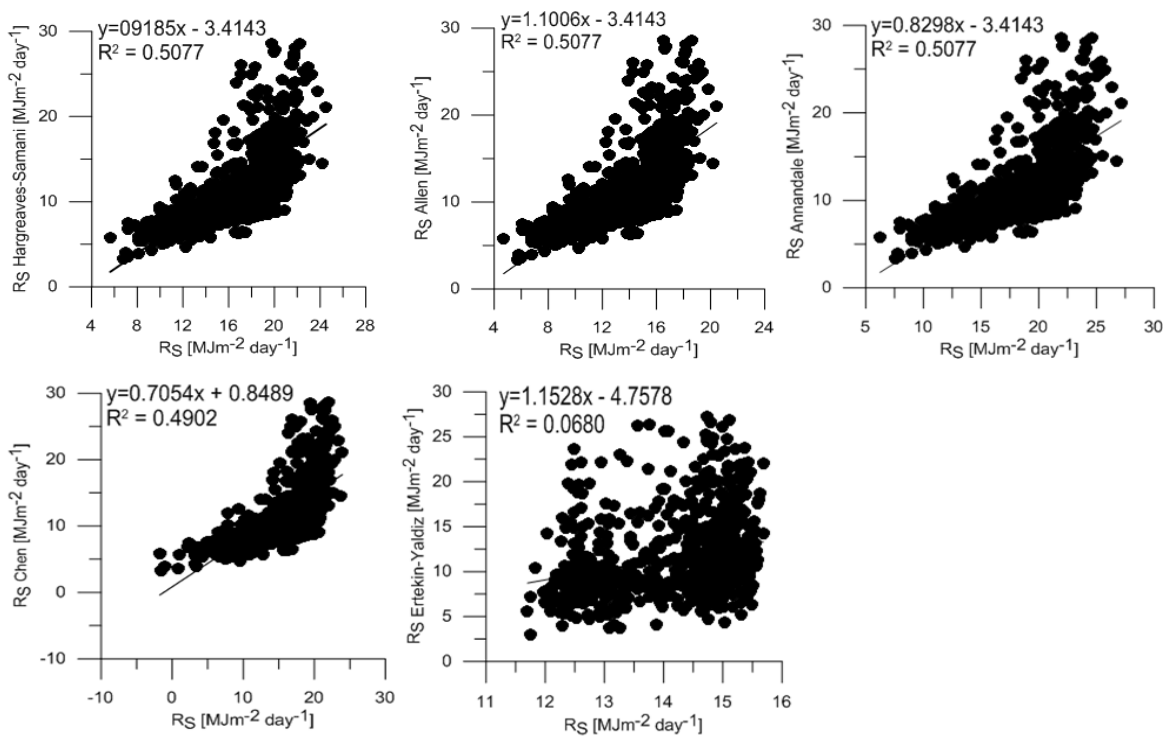
Chirimachay



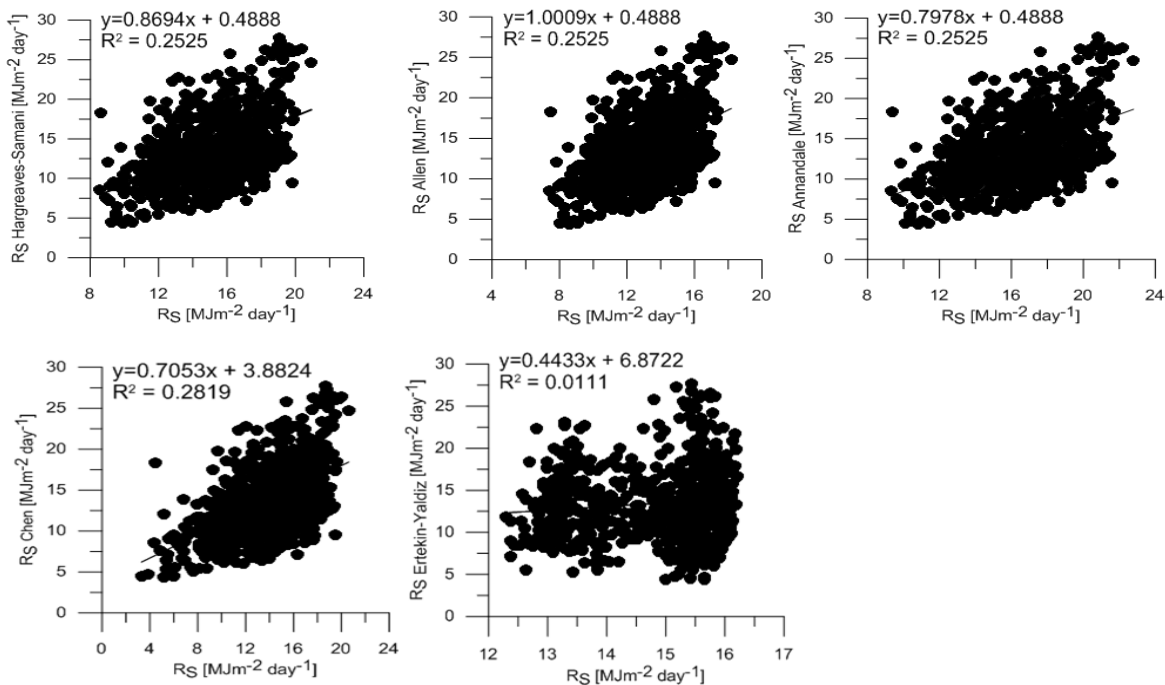
Virgen



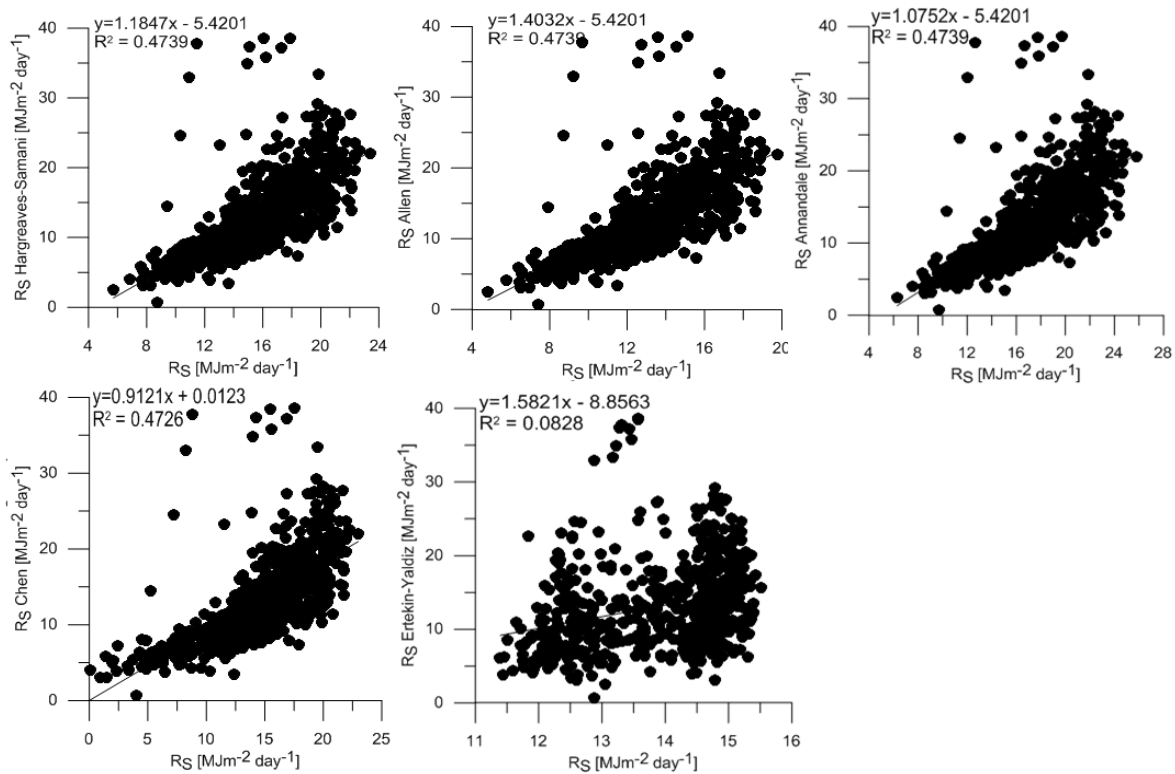
Toreadora



Campamento



Principal



Anexo 3. Resultados estadísticos promedios de la radiación solar estimada para cada modelo de su calibración.

MODELO		RMSE [%]	MBE [%]
Hargreaves-Samani	Promedio General	47,04	36,41
	Promedio Quinuas	53,68	47,18
	Promedio Zhurucay	33,77	14,89
Allen	Promedio General	35,60	17,77
	Promedio Quinuas	38,08	27,50
	Promedio Zhurucay	30,64	-1,69
Annandale	Promedio General	57,15	49,02
	Promedio Quinuas	65,81	60,57
	Promedio Zhurucay	39,84	25,92
Chen	Promedio General	42,52	27,69
	Promedio Quinuas	48,31	38,95
	Promedio Zhurucay	30,93	5,16
Ertekin-Yaldiz	Promedio General	43,09	19,09
	Promedio Quinuas	45,41	24,68
	Promedio Zhurucay	38,47	7,89

Anexo 4. Rangos de calibración para el Modelo Chen.

Para la calibración del modelo de Chen et al. (2004) se tomo en cuenta el rango sugerido para los coeficientes a y b en su investigación en 48 estaciones meteorológicas en China. La ecuación original es:

$$R_S = [a \ln(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) - b] \times R_a$$

Donde el coeficiente a , varía en un 0,16 a 0,42, y el valor medio es 0,28; el coeficiente b varía desde -0,45 hasta 0,12 con un valor promedio de) -0,15.

Para la calibración se tomo en cuenta estos rangos y generar la nueva ecuación calibrada.

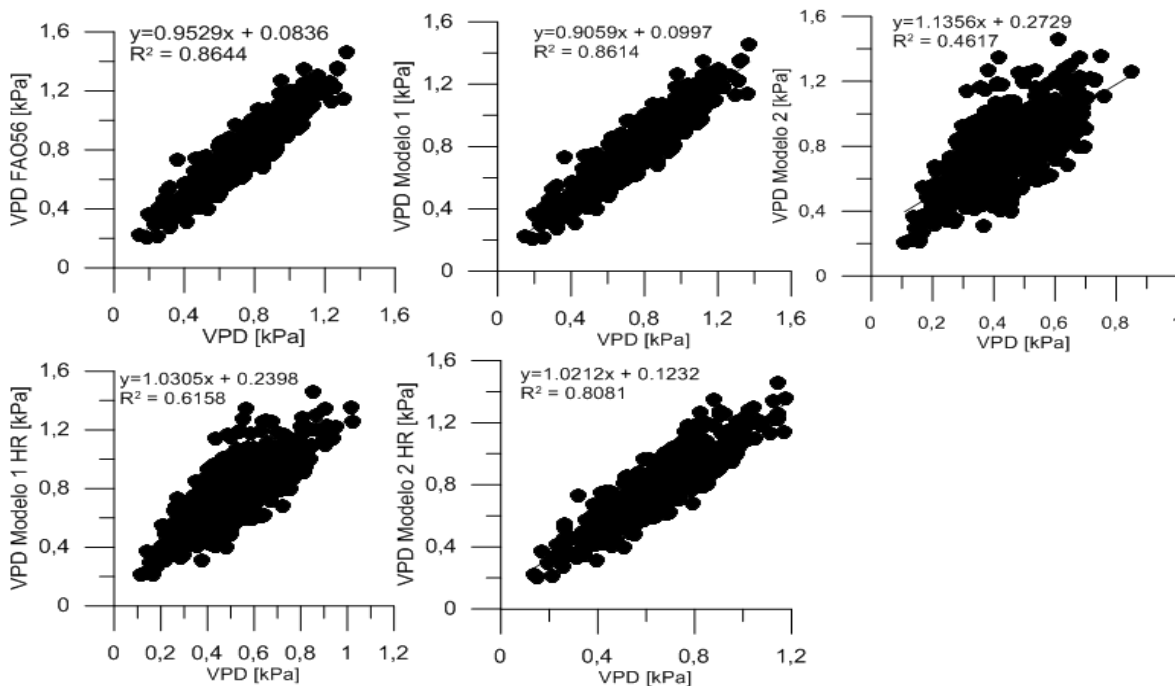
Anexo 5. Diferencia en porcentaje [%] de la disminución de RMSE y MBE de los modelos originales propuestos y los modelos calibrados para cada estación.

OBSERVATORIO	ESTACIÓN	MODELO	CRMSE [%]	VRMSE [%]	CMBE [%]	VMBE [%]
Quinuas	Balzay	Hargreaves-Samani	51,77	57,13	99,35	98,33
		Allen	35,59	42,88	99,46	98,99
		Annandale	60,15	64,60	98,98	99,81
		Chen	52,83	55,98	99,51	90,61
	Chirimachay	Hargreaves-Samani	53,16	53,87	99,61	91,84
		Allen	36,99	37,90	99,23	87,68
		Annandale	60,65	61,19	99,28	92,91
		Chen	53,19	52,31	99,25	97,08
	Virgen	Hargreaves-Samani	43,66	50,06	98,43	91,55
		Allen	16,80	26,29	97,33	83,92
		Annandale	54,87	60,12	99,98	94,82
		Chen	37,51	43,48	99,82	97,02
	Toreadora	Hargreaves-Samani	44,32	42,71	98,34	95,38
		Allen	15,49	13,11	97,78	90,84
		Annandale	56,19	54,93	98,68	96,50
		Chen	38,18	33,65	99,01	98,66
Zhurucay	Campamento	Hargreaves-Samani	3,89	10,15	99,54	70,20
		Allen	2,65	4,11	93,82	17,74
		Annandale	17,75	23,08	99,81	84,18
		Chen	1,42	4,27	97,67	-
	Principal	Hargreaves-Samani	0,53	27,95	96,57	59,17
		Allen	12,51	19,02	94,12	-
		Annandale	16,32	39,60	99,10	76,39
		Chen	8,97	23,74	98,84	48,57

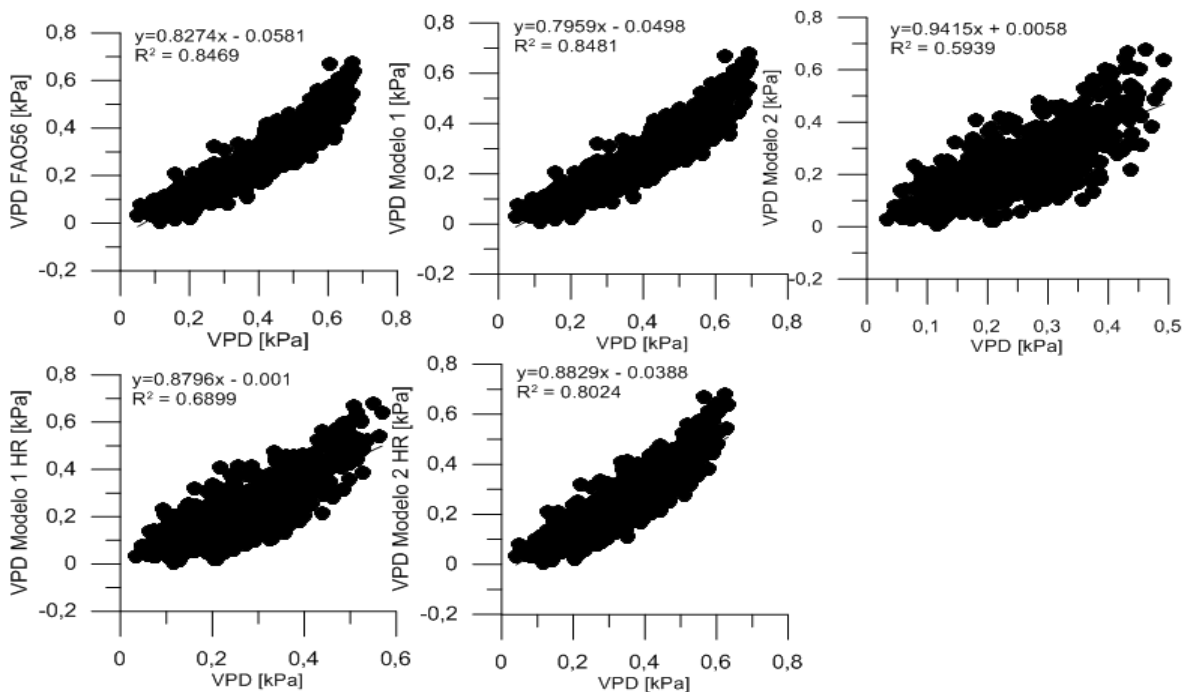
CRMSE es el % de disminución de RMSE calibrado; VRMSE es el % de disminución de RMSE validado; CMBE es el % de disminución de MBE calibrado y VMBE es el % de disminución de MBE validado.

Anexo 6. Correlación entre las estimaciones de VPD por los modelos empíricos y los valores de VPD observados en cada estación.

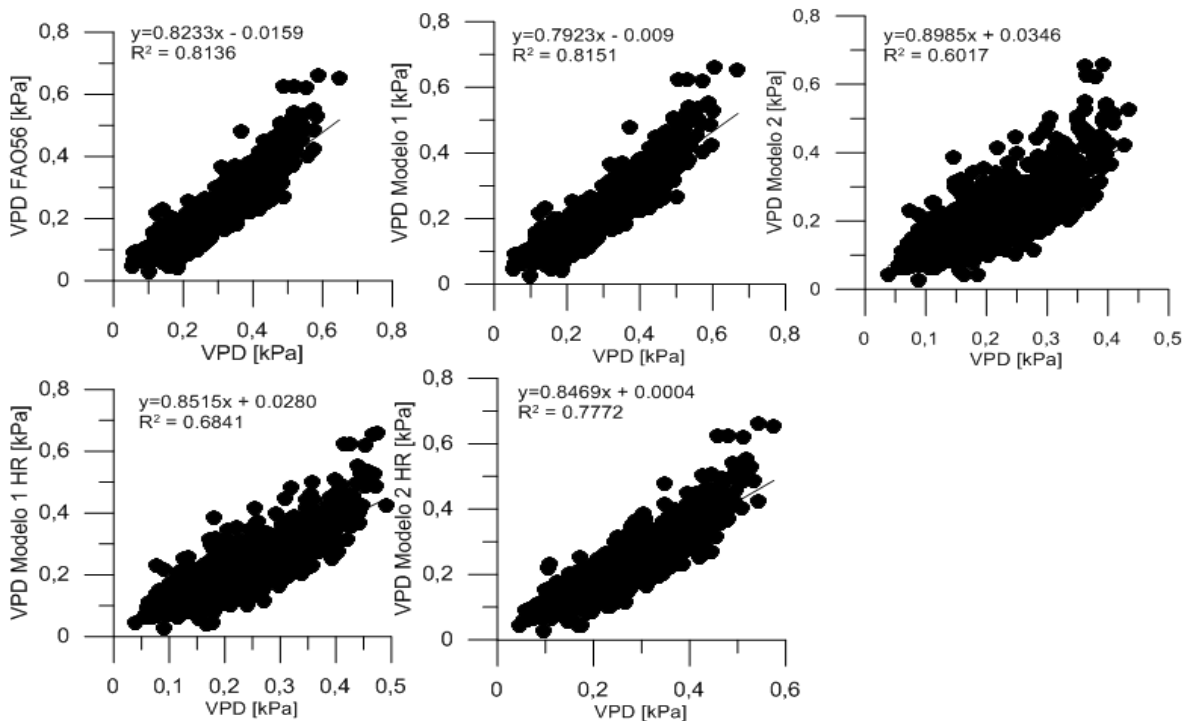
Balzay



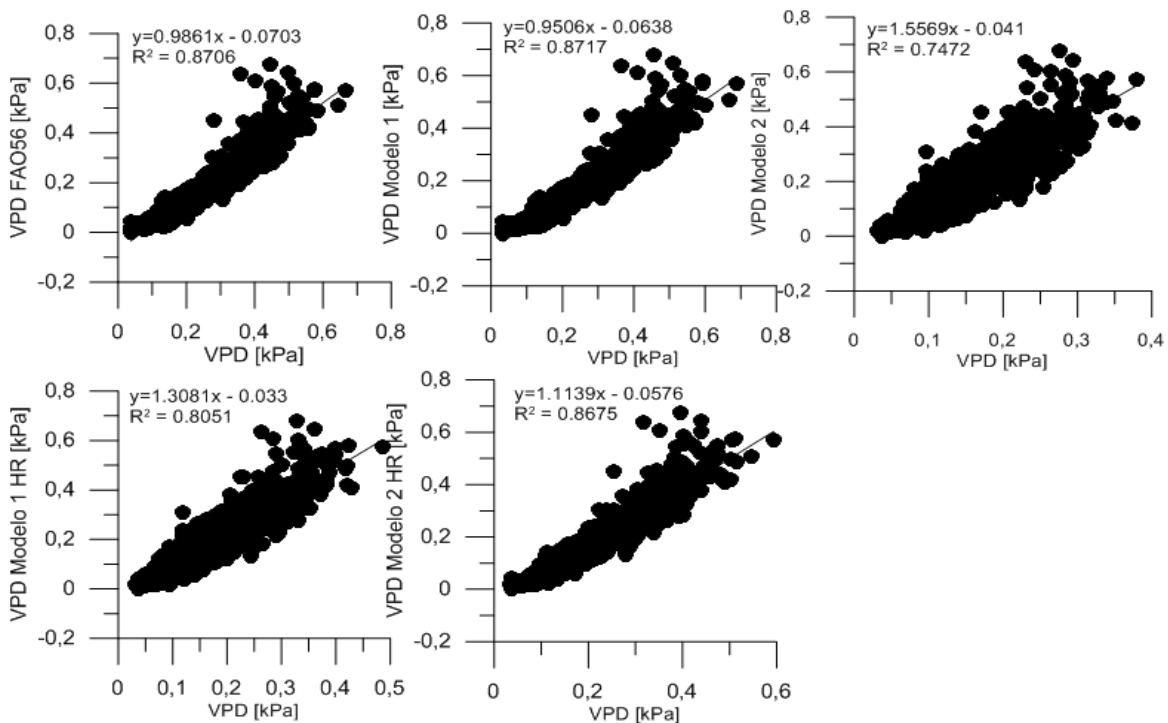
Chirimachay



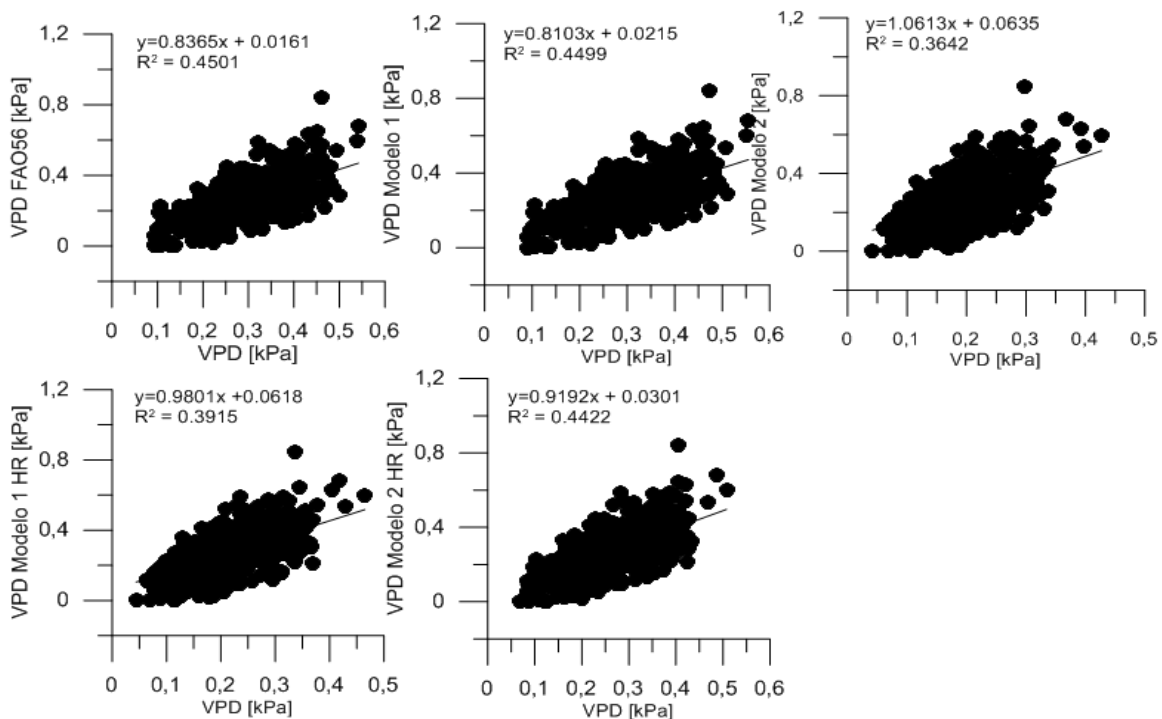
Virgen



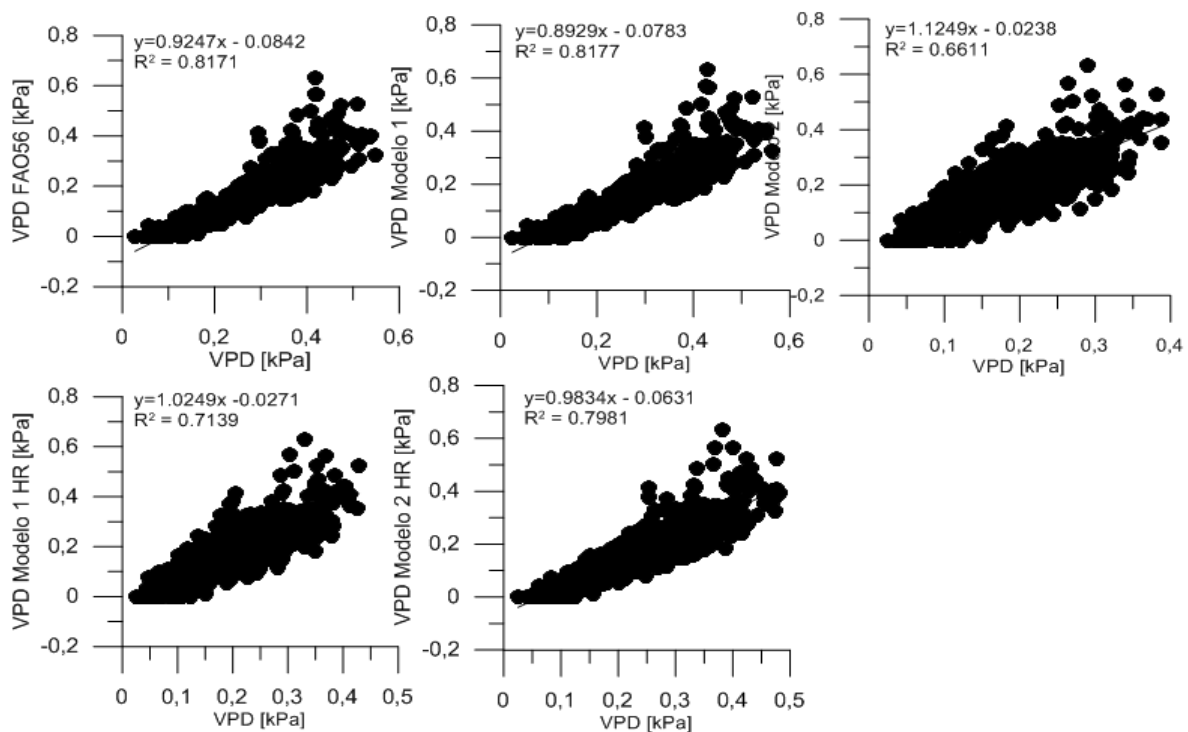
Toreadora



Campamento



Principal



Anexo 7. Diferencia entre la temperatura promedio (T_{avg}) y el promedio entre $T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n}$ (T_{med}) en las estaciones del Observatorio Ecohidrológico Quinuas.

