



Universidad de Cuenca



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN
DE REFERENCIA (ET_o) EN UN ECOSISTEMA DE PÁRAMO MEDIANTE
LA ECUACIÓN COMBINADA DE PENMAN-MONTEITH**

Proyecto de graduación previo a la
obtención del grado de Ingeniero
Civil

Director: Ing. Rolando Céleri Alvear, PhD

Autor: Mario Córdova Mora

Cuenca-Ecuador

Julio de 2013



Resumen

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es un dato clave en estudios hidrológicos, ecohidrológicos y biohidrológicos y ha sido el parámetro menos estudiado debido a la poca disponibilidad de datos meteorológicos de calidad por lo que se conoce muy poco de su comportamiento en el páramo. La investigación presentada en esta tesis fue realizada con datos meteorológicos muestreados cada 5 minutos por alrededor de 2 años en la estación principal del observatorio hidrometeorológico del Grupo de Ciencias de la Tierra y el Ambiente (GCTA) ubicado en el páramo de Zhurucay. El objetivo fue evaluar el error cometido por distintas causas en la estimación de la ET_o usando la ecuación de Penman-Monteith debido a: (i) el error cometido al promediar las variables meteorológicas en distintas escalas temporales, (ii) la estimación de variables faltantes a partir de otras observadas y (iii) la frecuencia de muestreo de los datos meteorológicos. Se calculó los promedios horario, diario y mensual de las variables para realizar el cálculo de la ET_o en estas 3 escalas y evaluar el error cometido en cada una. En las estimaciones mensuales y diarias de la ET_o los mayores errores resultaron siempre cuando se utilizó valores estimados de variables faltantes, encontrando errores promedio mayores al 40% en el cálculo mensual y mayores al 20% en el cálculo diario de la ET_o. Al disminuir la frecuencia de muestreo se introdujo un error medio siempre menor al 2% en estas dos escalas. Se evaluó además el efecto de la frecuencia de muestreo en el cálculo horario de la ET_o, encontrando una gran incertidumbre en la precisión al elegir frecuencias de muestreo mayores a 5 minutos.

Palabras clave: Evapotranspiración, ET_o, Penman-Monteith, Páramo, Ecuador.



Abstract

Reference evapotranspiration (ET_o) is a key parameter in hydrological, ecohydrological and bihydrological investigations. Nevertheless, it has been the less studied hydrological process because of the lack of high quality meteorological data. Therefore, its behavior in the paramo ecosystem is little known. This research was carried out with meteorological data sampled every 5 minutes during almost 2 years in the main station of the hydrometeorological observatory of Grupo de Ciencias de la Tierra y el Ambiente (GCTA) located in the páramo of Zhurucay. The objective was to assess the errors in the estimation of ET_o due to different reasons: (i) due to the smoothing committed when meteorological variables are averaged in different temporal scales, (ii) due to the estimation of missing variables from other measured and (iii) due to the sampling frequency of meteorological data. Averages of the variables were calculated in an hourly, daily and monthly basis in order to estimate ET_o in those 3 time scales and evaluate the error in each one of them. In monthly and daily estimations of ET_o the biggest errors were observed when missing variables were estimated from others measured, finding average errors higher than 40% in monthly estimations and higher than 20% in daily estimations. Using a smaller sampling frequency resulted always in average error lower than 2% on these 2 scales. Also the effect of the sampling frequency in the hourly estimation of ET_o was evaluated, finding a great uncertainty on the precision when using sampling frequencies higher than 5 minutes.

Keywords: Evapotranspiration, ET_o, Penman-Monteith, Paramo, Ecuador.



Contenido

Capítulo 1. Introducción	10
1. Antecedentes	10
2. Justificación	11
3. Objetivos	12
3.1 General	12
3.2 Específicos	12
4. Datos	12
5. Descripción general del contenido de la tesis	13
6. Referencias	14
Capítulo 2. Determinación de la importancia del uso de datos diarios, subdiarios y mensuales en la estimación de la ETo.....	16
1. Introducción	16
2. Materiales y métodos	18
2.1 Materiales	18
2.2 Métodos	18
3. Resultados	22
3.1 Cálculo del promedio diario mensual de la ETo.....	22
3.2 Cálculo diario de la ETo.....	26
4. Conclusiones	28
5. Referencias	29
Capítulo 3. Determinación de la importancia de las variables meteorológicas en la estimación de la ETo.....	30
1. Introducción	30
2. Materiales y métodos	31
2.1 Materiales	31
2.2 Métodos	31
3. Resultados	34
3.1 Importancia de los datos meteorológicos en la estimación del promedio diario mensual de la ETo.	34
3.2 Importancia de los datos meteorológicos en la estimación del promedio diario de la ETo.	37



4. Conclusiones.....	39
5. Referencias.....	40
Capítulo 4. Error en la estimación de la ETo debido a diferentes frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas	42
1. Introducción.....	42
2. Materiales y métodos.....	43
2.1 Materiales	43
2.2 Métodos	43
3. Resultados	43
3.1 Cálculo del promedio diario mensual de la ETo asumiendo distintas frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas	43
3.2 Cálculo del promedio diario de la ETo asumiendo distintas frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas	47
3.3 Cálculo del promedio horario de la ETo asumiendo distintas frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas	49
4. Conclusiones.....	51
5. Referencias	52
Capítulo 5. Conclusiones	53
5.1 Investigaciones futuras	54
5.2 Referencias.....	55



Universidad de Cuenca

Fundada en 1867

Yo, Mario Córdova Mora, autor de la Tesis, “**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET_o) EN UN ECOSISTEMA DE PÁRAMO MEDIANTE LA ECUACIÓN COMBINADA DE PENMAN-MONTEITH**”, 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 Civil**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 18 de julio de 2013

Mario Córdova Mora

0104905047



Universidad de Cuenca

Fundada en 1867

Yo, Mario Córdova Mora, autor de la Tesis, “**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (E_o) EN UN ECOSISTEMA DE PÁRAMO MEDIANTE LA ECUACIÓN COMBINADA DE PENMAN-MONTEITH**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 18 de julio de 2013

Mario Córdova Mora

0104905047



Agradecimiento

Al Ingeniero Rolando Céleri Alvear por su brillante dirección, su constante aporte de conocimiento y su apoyo en la realización de este proyecto. Al Ingeniero Galo Carrillo Rojas por su continuo aporte de ideas y comentarios que enriquecieron este estudio. Al Grupo de Ciencias de la Tierra y el Ambiente de la Universidad de Cuenca y todos sus integrantes que colaboraron en el proyecto, en el trabajo de campo y la obtención de los datos analizados en esta investigación.

Mario Córdova Mora,
Cuenca, julio de 2013.



Capítulo 1. Introducción

1. Antecedentes

La Cordillera de los Andes atraviesa el callejón occidental de Sudamérica incluyendo al Ecuador, donde esta cadena montañosa configura la región Sierra. En la parte más alta de esta región, debajo de los glaciares, se encuentra el páramo. El páramo es un ecosistema andino que se encuentra aproximadamente entre los 3500 y 5000 metros de altura sobre el nivel del mar (Josse et. al., 2009). Este ecosistema ha sido estudiado con poca profundidad, y a pesar de su importancia en la producción de agua, la biodiversidad o la oferta de los servicios ecosistémicos, la investigación científica en el páramo de los Andes es escasa.

El monitoreo meteorológico en los páramos en el país ha sido deficiente debido a que comúnmente se ha contado solamente con estaciones manuales que requieren la presencia de un operador los 365 días del año. Por este motivo el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) ha tenido mucha dificultad en operar estas estaciones, ya que no es fácil encontrar sitios que presenten las condiciones necesarias para que un operador pueda vivir cerca de una estación. Esto a su vez ha ocasionado que los datos presenten varias deficiencias, como una alta existencia de vacíos, falla de los sensores, entre otros, por lo que las series de datos no son adecuadas para realizar estudios profundos.

La correcta estimación de la evapotranspiración es de gran importancia en estudios hidrológicos, ecohidrológicos y biometeorológicos donde se vincula el clima con el desarrollo de la vegetación, el consumo de agua de los ecosistemas y el cierre del balance hidrológico. Este parámetro no ha podido ser estudiado a profundidad debido a la poca disponibilidad de datos de calidad por lo que se conoce muy poco de sus características, su variabilidad temporal y la sensibilidad a las variables meteorológicas que influyen en su cálculo; es por esto que un monitoreo meteorológico de calidad es de suma importancia para fines hidrológicos, ecohidrológicos y biometeorológicos debido a que es un proceso clave en estos campos de estudio.

La evapotranspiración (ET) es el intercambio de vapor de agua entre la superficie de la tierra y la atmósfera debido a evaporación y transpiración de la capa vegetal. Ésta depende de la radiación solar, velocidad del viento, temperatura del aire, presión atmosférica, flujo de calor en el suelo y humedad relativa. Depende además de las características propias de cada cultivo. La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) asume un cultivo con una altura de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23; este cultivo se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme creciendo activamente, sombreando totalmente el suelo



y con un adecuado aporte de agua (Allen et. al., 2006). Calcular la ETo resulta de gran utilidad porque al depender solamente de variables meteorológicas se pueden realizar comparaciones entre distintas regiones y localidades independientemente del cultivo.

Durante los últimos 50 años se han propuesto varios métodos teóricos y empíricos alrededor del mundo para estimar la evapotranspiración a partir de diferentes variables meteorológicas; entre los más difundidos se encuentran: el método de Hargreaves (Hargreaves et. al., 2003; Mohammadiet al., 2009; EINesr et. al., 2011), el método de Priestley Taylor (Gunston and Batchelor, 1983; Summer and Jacobs, 2004), los métodos basados en la temperatura (Xu and Singh, 2001; Trajkovic, 2005), el método de Tanque Evaporímetro (Allen et. al., 2006; Raghuwanshi and Wallender, 2012), y el método de Penman-Monteith (Allen et. al., 2006; Hauviller et. al, 2006). Se han realizado además varias investigaciones en las cuales se han comparado estos distintos métodos (Yoder et. al., 2005; Alkaeed et. al., 2006). El estudio del funcionamiento, errores y desviaciones realizado con todos los métodos propuestos, ha llevado a la conclusión de que la ecuación combinada de Penman-Monteith describe de mejor manera el comportamiento de la ETo a nivel global, siendo la única que la FAO recomienda para su cálculo (Allen et. al., 2006).

Para realizar un análisis detallado del comportamiento de la ETo se necesita una estación meteorológica automática y que además cuente con todos los sensores necesarios. En la actualidad, para la medición de las variables meteorológicas existen estaciones automáticas que permiten obtener mediciones más exactas y con una mayor frecuencia de muestreo.

El Grupo de Ciencias de la Tierra y el Ambiente (GCTA) cuenta con un sitio de investigación ubicado en el páramo de Zhurucay (17M, 696439, 9661707, 3780 m s.n.m) en el cual se tiene instalada una estación meteorológica automática equipada con sensores para medir la radiación neta, radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa, además de otras variables. La estación se encuentra en funcionamiento desde febrero de 2011 por lo que se cuenta con más de 2 años de datos.

2. Justificación

El páramo es la fuente principal de agua para la sierra ecuatoriana para distintos fines: doméstico, industrial e incluso para generación de energía hidroeléctrica. Para el correcto cálculo del agua disponible para el aprovechamiento humano se debe realizar el balance hidrológico de las cuencas y uno de los componentes esenciales en el cierre de este balance es la evapotranspiración. La evapotranspiración es el parámetro menos estudiado de los involucrados en el balance hidrológico debido a la poca disponibilidad de datos de calidad, por lo que se conoce muy poco de sus



características, variabilidad temporal y la sensibilidad a las variables meteorológicas necesarias para su cálculo.

Una correcta estimación de la evapotranspiración es además un requisito fundamental en el plan de riego de cultivos y en la predicción de la producción agrícola (Hupet and Vanclouster, 2000) por lo que una correcta estimación de la evapotranspiración es primordial para maximizar la producción agrícola. Conocer su comportamiento es ahora parte fundamental en estudios ecohidrológicos y biometeorológicos donde se vincula el clima con el desarrollo de la vegetación, el consumo de agua de los ecosistemas – y por ende su respuesta hidrológica – en épocas secas, la respuesta y resiliencia de los ecosistemas a cambios en el clima para citar los más importantes estudios donde se encuentra la frontera de la ciencia.

Por ello, la aplicación de los resultados obtenidos en este estudio será de vital importancia en la disminución de la incertidumbre del balance hidrológico a cualquier escala espacial y temporal y emprender estudios científicos interdisciplinarios y transdisciplinarios.

3. Objetivos

3.1 General

- Analizar el comportamiento de la ETo en un ecosistema de páramo mediante la ecuación combinada de Penman-Monteith.

3.2 Específicos

- Determinar la importancia del uso de datos subdiarios, diarios y mensuales para la estimación de la ETo
- Determinar la importancia de cada una de las variables meteorológicas en la estimación de la ETo.
- Determinar el efecto de la frecuencia de muestreo de las variables meteorológicas en la estimación de la ETo.

4. Datos

El estudio fue llevado a cabo en el sitio de investigación ubicado en el páramo de Zhurucay del Grupo de Ciencias de la Tierra y el Ambiente que cuenta con un sistema de observatorios ecohidrológicos y meteorológicos en la región. Este sistema tiene varios sitios de estudio con una gran variedad de sensores de alta tecnología instalados: radiómetro neto, piranómetros, disdrómetro láser, sensores de nivel ultrasónicos, entre otros.

La estación meteorológica automática elegida para el presente estudio está ubicada en el páramo de Zhurucay (17M, 696439, 9661707, 3780 m.s.n.m) y está



equipada con los siguientes sensores: para medir la radiación neta se ha utilizado un radiómetro neto (CNR2, Kipp and Zonen), para medir la radiación solar o de onda corta se ha utilizado un piranómetro (CS300, Campbell Scientific), la velocidad del viento se ha medido con un anemómetro que es parte del *Windset* de Campbell Scientific (Met One 034B Windset, Campbell Scientific), las temperaturas (máxima, mínima, promedio) y la humedad relativa se han medido con un sensor de humedad y temperatura (CS2150 Temperature and Relative Humidity probe, Campbell Scientific). Se eligió esta estación debido a que al contar con un radiómetro neto es la más completa de todas las que conforman esta red de monitoreo. Los datos son almacenados en un datalogger (CR1000 Measurement and Control Datalogger, Campbell Scientific) y se han realizado descargas y mantenimiento de manera periódica. La estación fue instalada en febrero de 2011 y se encuentra en funcionamiento continuamente desde la fecha, por lo que se cuenta con más de dos años de datos.

Los sensores han sido programados de manera que los datos son medidos mediante un muestreo cada segundo (a excepción de la humedad relativa) para ser almacenados de acuerdo al siguiente detalle de agregación:

- Temperatura máxima del aire a 2 metros de altura cada 5 minutos. [°C]
- Temperatura mínima del aire a 2 metros de altura cada 5 minutos. [°C]
- Temperatura promedio del aire a 2 metros de altura cada 5 minutos. [°C]
- Radiación neta promedio cada 5 minutos. [KW/m²]
- Radiación solar promedio cada 5 minutos. [KW/m²]
- Radiación solar total cada 5 minutos. [MJ/m²]
- Velocidad promedio del viento a 2 metros de altura cada 5 minutos. [m/s]
- Humedad relativa instantánea cada 5 minutos [%]

5. Descripción general del contenido de la tesis

En el Capítulo 2 de esta tesis se calculará la ETo utilizando promedios mensuales, diarios y horarios de los datos mediante los procedimientos descritos en FAO56 con el objetivo de determinar la importancia de utilizar estas distintas escalas temporales para el cálculo al comparar los resultados que se obtengan de los distintos periodos considerados.

En el Capítulo 3 se aplicarán los métodos descritos en FAO56 para estimar variables meteorológicas faltantes a partir de otras observadas. Como los datos mínimos necesarios para el cálculo de la ETo son las temperaturas máxima y mínima, se realizará un primer acercamiento a la ETo solamente con estos datos y se irá mejorando la precisión incorporando las demás variables meteorológicas (velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar). Estos resultados serán comparados con el



cálculo realizado en el Capítulo 2 para determinar la importancia de contar con los valores medidos de las variables meteorológicas.

En el Capítulo 4 se asumirán distintas frecuencias de muestreo. Los sensores están programados para tomar valores promedio (resultado de una muestreo cada segundo, excepto en la humedad relativa para la cual se guarda el valor instantáneo) de las variables meteorológicas cada 5 minutos, por lo que se compararán los resultados de utilizar los datos completos en la estimación de la ETo con los resultados de considerar que se han realizado mediciones con periodos de muestreo de 10, 15, 30 y 60 minutos.

6. Referencias

Alkaeed.,Othoman., Flores, Clariza., Kenji, Jinno., Atsushi, Tsutsumi., 2006. Comparison of Several Reference Evapotranspiration Methods for Itoshima Peninsula Area, Fukuoka, Japan. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University.*, 66(1). 1-14.

Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D. and Smith, M., 2006. *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Vol. 56, Food & Agriculture Org.

Josse, C., Cuesta, F., Navarro, G., Barrena, V., Cabrera, E., Chacón-Moreno, E., Ferreira, W., Peralvo, M., Saito, J. y Tovar, A. 2009. *Atlas de los Andes del Norte y Centro*. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAvH, LTA-UNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL. Lima.

EINesr, M., A.A., Alazba., M.T Amin., 2011. Modified Hargreaves' Method as an Alternative to the Penman-monteith Method in the Kingdom of Saudi Arabia. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences.*, 5(6). 1058–1069.

Gunston, H., C. H. Batchelor., 1983. A Comparison of the Priestley-Taylor and Penman Methods for Estimating Reference Crop Evapotranspiration in Tropical Countries. *Agricultural Water Management.*, 6(1). 65 – 77.

Hargreaves, George H., Richard G. Allen., 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(1).53–63.

Hauviller, AP., Días, H., Pérez, D., Rodríguez Loustau, M. Un aporte a la estimación de la evapotranspiración del cultivo juvenil de arándano utilizando metodología según FAO en localidades de la Mesopotamia argentina. www.riegoymetirriego.com



Hupet, F. and M. Vanclooster., 2001. Effect of the Sampling Frequency of Meteorological Variables on the Estimation of the Reference Evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 243(3-4). 192 – 204.

Mohammadieh., M. Noori., Mohammadi, M., Helali, J., Nazari, B., Sohrabi, T., 2009. Evaluation of Hargreaves equation for calculating daily ETo (case study: North West of Iran). The Free Library.

Raghuwanshi, NS., WW Wallender., 1998. Converting from Pan Evaporation to Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.*, 124(5). 275–277.

Sumner, David M., Jennifer M. Jacobs., 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, Reference Evapotranspiration, and Pan Evaporation Methods to Estimate Pasture Evapotranspiration. *Journal of Hydrology.*, 308(1–4). 81 – 104.

Trajkovic, Slavisa., 2005. Temperature-based Approaches for Estimating Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.*, 131(4). 316–323.

Xu, C.-Y., V. P. Singh., 2001. Evaluation and Generalization of Temperature-based Methods for Calculating Evaporation. *Hydrological Processes.*, 15(2). 305–319.

Yoder, RE., Odhiambo, LO., Wright, WC., 2005. Evaluation of Methods for Estimating Daily Reference Crop Evapotranspiration at a Site in the Humid Southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture.*, 21(2). 197–202.



Capítulo 2. Determinación de la importancia del uso de datos diarios, subdiarios y mensuales en la estimación de la ETo

1. Introducción

En general es muy difícil contar con datos meteorológicos completos a escala horaria y diaria (Stöckle et. al., 2003; Li et. al., 2009), en Ecuador esto es aún más difícil por la limitación de infraestructura de observatorios meteorológicos/climáticos. Es por esto que casi todos los proyectos meteorológicos, de riego e hidrológicos realizados en el país han sido diseñados con estimaciones mensuales de la ETo, debido a que estos son los únicos datos con los que generalmente se cuenta en las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

Se pueden utilizar los promedios mensuales de las variables meteorológicas para estimar el promedio diario mensual de la ETo. En FAO 56 se indica que este valor es similar al obtenido al realizar el promedio del cálculo diario de la ETo, sin embargo estas recomendaciones no han sido verificadas con datos reales. Con los promedios diarios de las variables meteorológicas se puede realizar un cálculo para el promedio diario de la ETo que será más preciso. En los sitios donde, durante el día, se producen variaciones notables en la velocidad del viento o la nubosidad, el cálculo horario de la ETo es más apropiado que el cálculo diario, debido a que estos cambios sustanciales pueden producir promedios para 24 horas que no representen la energía evaporativa real del ambiente durante ciertos periodos del día, introduciendo potenciales errores en su estimación (Allen et. al., 2006).

Como se ya se había mencionado en el capítulo introductorio, el método generalizado actualmente para estimar el valor de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) es la ecuación combinada de Penman-Monteith (Allen et. al., 2006), para lo cual se requiere de las siguientes variables meteorológicas:

➤ Radiación neta

La radiación neta tiene dos componentes, el primero es la radiación neta de onda corta que es la diferencia entre la radiación solar que alcanza la superficie y la que es reflejada nuevamente hacia la atmósfera; el segundo es la radiación neta de onda larga que es la diferencia entre la radiación de onda larga que llega y la que sale de la superficie, la radiación de onda larga es emitida por la tierra y se refleja en gases que se encuentran en la atmósfera como el CO₂ y el CH₄ y en las nubes para regresar nuevamente hacia la superficie (Foken and Nappo, 2008). La suma de estos dos componentes es la radiación neta que comúnmente es positiva durante el día y negativa durante la noche, aunque el total diario es casi siempre positivo (Allen et. al., 2006).



$$R_n = (R_{Si} - R_{Sr}) + (R_{Li} - R_{Lr}) = (1 - \alpha) R_{Si} + (R_{Li} - R_{Lr})$$

Donde:

- R_n flujo de radiación neta [W/m^2]
- R_{Si} flujo de radiación de onda corta incidente o radiación solar [W/m^2];
- R_{Sr} flujo de radiación de onda corta reflejada [W/m^2]
- R_{Li} flujo de radiación de onda larga incidente o atmosférica [W/m^2]
- R_{Lr} flujo de radiación de onda larga reflejada o terrestre [W/m^2]
- α albedo (adimensional)

➤ Humedad relativa del aire (en %)

La humedad relativa es el cociente entre la cantidad de agua que el aire realmente contiene a una determinada temperatura, y la cantidad que podría contener si estuviera saturado a la misma temperatura (Allen et. al., 2006).

➤ Velocidad del viento a 2m del suelo (en m/s)

➤ Temperatura del aire a 2m del suelo (en °C)

Se necesitan los registros de las temperaturas máxima, mínima y media.

➤ Flujo de calor en el suelo (en $MJ/m^2 \cdot dia^{-1}$)

El flujo de calor en el suelo es la energía que se utiliza para calentar el suelo, es positivo cuando se calienta y negativo cuando se enfría. Debe restarse o agregarse a R_n para estimar la evapotranspiración (Allen et. al., 2006). El valor de flujo del calor del suelo (G) está dado por:

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z$$

Donde:

- G flujo de calor del suelo [$MJ/m^2 \cdot dia$]
- c_s capacidad calorífica del suelo [$MJ/m^3 \cdot ^\circ C^{-1}$]
- T_i temperatura del aire en el tiempo i [$^\circ C$]
- T_{i-1} temperatura del aire en el tiempo $i-1$ [$^\circ C$]
- Δt intervalo de tiempo considerado [días]
- Δz profundidad efectiva del suelo [m]

➤ Presión atmosférica (en kPa)

Todas estas variables medidas en la estación meteorológica del GCTA, a excepción del flujo de calor en el suelo, el cual fue estimado a partir de los métodos descritos en FAO 56 para distintos periodos de cálculo, y la presión atmosférica que fue estimada a partir de la altura sobre el nivel del mar por la ecuación 2.5.



Debido a los antecedentes expuestos, en el presente capítulo se evaluará el error cometido en la estimación de la ETo al comparar los cálculos del promedio diario mensual y el promedio diario obtenido con las tres distintas escalas temporales de cálculo (mensual, diaria y horaria). Esto se puede realizar gracias a que la estación principal del observatorio meteorológico del GCTA ubicada en Zhurucay realiza una medición de muy alta frecuencia (5 minutos) de los parámetros involucrados en el cálculo; de esta manera se puede cuantificar aproximadamente los errores cometidos en el cálculo de la ETo con promedios mensuales de los datos meteorológicos, y por tanto, la importancia de disponer de estaciones meteorológicas automáticas.

Este estudio es pionero en el páramo, ya que no se conoce de otros sitios de estudio en este ecosistema que cuenten con un radiómetro neto

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Se cuenta con los datos de radiación neta, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura muestreados cada 5 minutos durante un periodo de alrededor de 24 meses.

Las características específicas de cada uno de los datos y los sensores con los que han sido medidos, se describen a detalle en la sección 4 del primer capítulo.

2.2 Métodos

En la sección 2.2.1 se han realizado promedios mensuales, en la sección 2.2.2 promedios diarios y en la sección 2.2.3 promedios horarios, de las variables meteorológicas para el cálculo de la ETo.

2.2.1 Cálculo de la ETo para periodos mensuales

Se calculó la ETo para periodos mensuales mediante la ecuación de Penman-Monteith descrita en FAO56:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2.1)$$

En donde:

- ETo: evapotranspiración del cultivo de referencia [mm/día]
- Rn: radiación neta en la superficie del cultivo [MJ/m².día]
- G: flujo del calor de suelo [MJ/m².día]
- T: temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]



- o u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura [m/s]
- o e_s : presión de vapor de saturación [kPa]
- o e_a : presión real de vapor [kPa]
- o $(e_s - e_a)$: déficit de presión de vapor [kPa]
- o Δ : pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]
- o γ : constante psicrométrica [kPa/°C]
- o z : altura sobre el nivel del mar [m]

Y además:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0,6108 * e^{\left(\frac{17,27 T}{T+237,3}\right)} \right]}{(T + 237,3)} \quad (2.2)$$

$$G_{mes,i} = 0,14 (T_{mes,i} - T_{mes,i-1}) \quad (2.3)$$

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (2.4)$$

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (2.5)$$

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} P \quad (2.6)$$

$$e^\circ(T) = 0,6108 * e^{\left(\frac{17,27 T}{T+237,3}\right)} \quad (2.7)$$

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad (2.8)$$

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{min}) \frac{HR_{max}}{100} + e^\circ(T_{max}) \frac{HR_{min}}{100}}{2} \quad (2.9)$$



Mediante la ecuación 2.1 se calcula el promedio diario mensual de la ETo en mm/día.

2.2.2 Cálculo de la ETo para periodos diarios

El cálculo de la ETo para periodos diarios se realiza de la misma manera que para periodos mensuales, es decir, con la serie de ecuaciones expuestas en la sección 2.2.1, desde la 2.1 hasta la 2.8 a excepción de la ecuación 2.3, debido a que al no contar con valores observados del flujo de calor en el suelo (G) se debe asumir el valor de cero para periodos diarios. De esta manera se obtiene el valor de la ETo para cada uno de los días del periodo de estudio. El cálculo diario es más exacto que el mensual debido a que puede haber días con valores excepcionales de las variables meteorológicas, los cuales no son representados por una media mensual y esto induce errores en el cálculo de la ETo.

2.2.3 Cálculo de la ETo para periodos horarios

La ecuación de Penman-Monteith debe ser modificada para periodos horarios. Los cambios se deben a que en la ecuación 2.1 el cálculo de la ETo se obtiene en mm/día mientras que mediante la ecuación 2.9 se la estima en mm/hora. Al introducir estas modificaciones la ecuación FAO de Penman-Monteith toma la siguiente forma:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^\circ(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (2.9)$$

En donde:

- ETo: evapotranspiración del cultivo de referencia [mm/hora]
- Rn: radiación neta en la superficie del cultivo [MJ/m².hora]
- G: flujo del calor de suelo [MJ/m².hora]
- T_{hr}: temperatura media del aire a 2 m de altura cada hora [°C]
- u₂: velocidad del viento a 2 m de altura [m/s]
- e[°](T_{hr}): presión de saturación de vapor a temperatura del aire T_{hr} [kPa]
- e_a: promedio horario de la presión real de vapor [kPa]
- Δ: pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]
- Y: constante psicrométrica [kPa/°C]

Los valores de Δ y Y se calculan con las ecuaciones 2.2 y 2.5 respectivamente, los otros cálculos se realizan de la siguiente manera:



$$e_a = e^o(Thr) \frac{HR_{hr}}{100} \quad (2.10)$$

En donde:

- HR_{hr} : promedio horario de la humedad relativa

Mientras que el valor de G para el día:

$$G_{hr} = 0,1 Rn \quad (2.11)$$

Y para la noche:

$$G_{hr} = 0,5 Rn \quad (2.12)$$

Debido a que el sitio de estudio se encuentra cerca de la línea ecuatorial, se ha asumido en el cálculo de G que el día y la noche duran 12 horas, y por lo tanto se ha aplicado la ecuación 2.11 en el periodo entre las 06H00 y las 18H00, y la ecuación 2.12 entre las 18H00 y las 06H00 del siguiente día.

Mediante este cálculo se obtiene un detalle muy preciso de la ETo y su variación a lo largo del día. Acumulando estos valores se puede realizar la comparación con el cálculo diario y mensual para determinar qué tanto mejora la estimación al realizar el cálculo a este nivel de detalle.

2.2.4 Análisis estadístico

Se usaron 3 índices para determinar la calidad de las estimaciones diarias y mensuales de la ETo en comparación con el cálculo horario. Todos los índices se calcularon con respecto a la estimación obtenida mediante el cálculo horario de la ETo, debido a que ésta se acoge a la recomendación de FAO 56.

1. Error absoluto: es la diferencia entre el valor tomado como exacto y el valor estimado de una cantidad, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{abs} = (Si - Oi) \quad (2.13)$$

Donde:

- Si: valor de la ETo correspondiente al cálculo diario o mensual.
- Oi: valor de la ETo correspondiente al cálculo horario.

2. Error relativo: es la relación entre el error absoluto y el valor tomado como exacto de una cantidad y se calcula mediante la siguiente ecuación:



$$\epsilon_{rel} = \frac{(Si - Oi)}{Oi} \quad (2.14)$$

3. Absolute Percent Bias (APB): es un indicador porcentual del error acumulado absoluto que se comete en una estimación y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$APB = \frac{\sum_{i=1}^n |Si - Oi|}{\sum_{i=1}^n Oi} * 100 \quad (2.15)$$

Donde:

- o n: número de datos.

Para el análisis del APB se consideró el criterio presentado en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Criterio de interpretación del desempeño para comparación entre series de datos estimados y observados, para el índice Absolute Percent Bias (APB), (Tokay et al., 2010).

APB	Desempeño
< 5	Excelente
5 – 10	Muy bueno
10 – 15	Bueno
15 – 20	Razonable
> 20	Pésimo

3. Resultados

3.1 Cálculo del promedio diario mensual de la ETo

Mediante el procedimiento descrito en la sección 2.2.1 se calculó el promedio diario mensual de la ETo. Además se obtuvieron los promedios diarios mensuales de los resultados de los cálculos diarios y horarios realizados como se indica en las secciones 2.2.2 y 2.2.3 respectivamente, para determinar el error cometido al considerar distintas escalas temporales en la estimación de la ETo. El valor de referencia es el cálculo con datos horarios y sus agregaciones por lo que los errores se calcularán con respecto a los resultados obtenidos de esta escala temporal. Los resultados se muestran en la Figura 2.1 y en la Tabla 2.2.

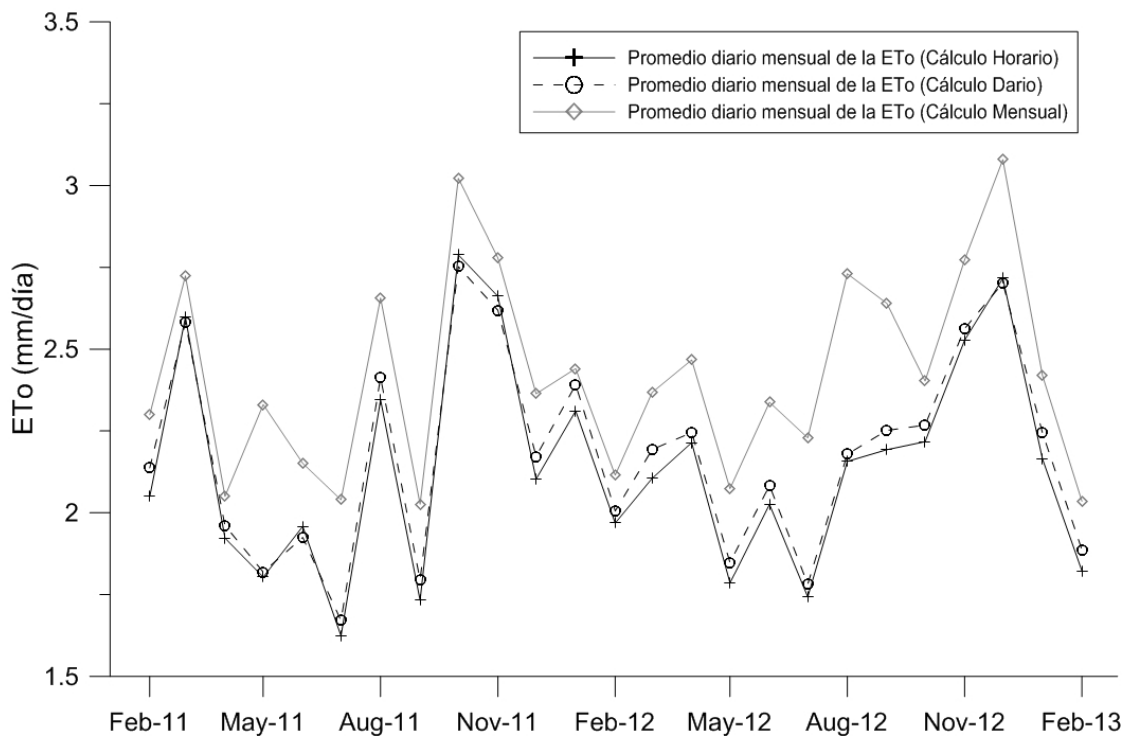


Figura 2.1. Promedio diario mensual de la ETo estimado mediante distintas escalas temporales de cálculo.

La Figura 2.1 muestra que el promedio diario mensual de la ETo es muy similar cuando se calcula con datos horarios y diarios, observándose pequeños errores de sobrestimación tanto como de subestimación, mientras que se produce un error considerablemente mayor (sobrestimación) al incorporar datos mensuales de las variables meteorológicas en el cálculo.

Tabla 2.2. Comparación del promedio diario mensual de la ETo estimado con distintos periodos de cálculo

Mes	Periodo de cálculo						
	Horario	Diario			Mensual		
	ETo mm/día	ETo mm/día	Error absolut o mm/día	Error relativ o %	ETo mm/día	Error absolut o mm/día	Error relativ o %
feb-2011	2,049	2,137	0,088	4,28	2,300	0,250	12,22
mar-2011	2,598	2,581	-0,016	-0,63	2,724	0,126	4,87
abr-	1,923	1,961	0,039	2,00	2,050	0,128	6,64



2011							
may-2011	1,803	1,819	0,015	0,86	2,331	0,527	29,24
jun-2011	1,958	1,925	-0,034	-1,73	2,151	0,193	9,83
jul-2011	1,624	1,671	0,047	2,87	2,040	0,416	25,60
ago-2011	2,345	2,414	0,069	2,93	2,656	0,311	13,28
sep-2011	1,733	1,795	0,062	3,59	2,026	0,294	16,95
oct-2011	2,788	2,752	-0,036	-1,29	3,022	0,234	8,40
nov-2011	2,662	2,619	-0,043	-1,60	2,779	0,118	4,42
dic-2011	2,103	2,172	0,069	3,30	2,364	0,261	12,40
ene-2012	2,311	2,391	0,080	3,45	2,441	0,129	5,59
feb-2012	1,968	2,005	0,037	1,89	2,115	0,146	7,44
mar-2012	2,105	2,193	0,088	4,19	2,368	0,262	12,47
abr-2012	2,214	2,245	0,031	1,40	2,467	0,253	11,43
may-2012	1,786	1,848	0,062	3,48	2,074	0,288	16,13
jun-2012	2,025	2,084	0,058	2,87	2,338	0,312	15,42
jul-2012	1,743	1,782	0,039	2,23	2,229	0,486	27,88
ago-2012	2,157	2,179	0,022	1,02	2,730	0,574	26,59
sep-2012	2,193	2,252	0,059	2,69	2,640	0,447	20,40
oct-2012	2,217	2,268	0,050	2,28	2,403	0,185	8,36
nov-2012	2,528	2,563	0,035	1,40	2,773	0,245	9,71
dic-2012	2,716	2,702	-0,014	-0,52	3,079	0,363	13,37
ene-2013	2,165	2,245	0,080	3,70	2,420	0,255	11,77
feb-2013	1,822	1,886	0,064	3,52	2,035	0,213	11,70
		Máxima sobrestimación	0,088	4,28	Máxima sobrestimación	0,574	29,24



Medio	0,038	1,93	Medio	0,281	13,68
Máxima			Máxima		
subestimació	-0,043	-1,73	subestimació	-	-
n			n		
APB (%)	2,31		APB (%)	13,11	
Error relativo			Error relativo		
acumulado	1.78		acumulado	13.11	
(%)			(%)		

El error relativo máximo en la estimación de la ETo al usar promedios diarios de las variables meteorológicas es de 4,28% correspondiente a una sobrestimación de 0,088 mm/día. El máximo error de subestimación es de -1,73% correspondiente a -0,043 mm/día; mientras que al calcular la ETo con promedios mensuales de los datos se comete un error máximo de 29,24% correspondiente a 0,527 mm/día de sobrestimación. Sin embargo, el error relativo promedio es considerablemente menor en ambos casos, disminuye a 1,93% y a 13,68% al considerar periodos de cálculo diarios y mensuales respectivamente.

El APB en el caso del cálculo diario es igual a 2,31%, que según el criterio de la Tabla 2.1 es una estimación “excelente”; este índice para el cálculo mensual tiene un valor de 13,11%, que hace que la estimación sea calificada como “buena”. El error relativo acumulado es igual al APB cuando la escala de cálculo es mensual debido a que todos los errores fueron de sobrestimación, mientras que para la escala diaria el APB es mayor debido a que se produjeron errores de sobrestimación y subestimación. Se debe tomar en cuenta uno de los dos índices (el APB o el error relativo acumulado) de acuerdo a la aplicación que se le vaya a dar a la ETo; por ejemplo si se trata de cerrar el balance hidrológico, el valor a tomar en cuenta sería el error acumulado ya que este balance se realiza para ciclos hidrológicos o periodos anuales y los errores de sobrestimación se compensan con los de subestimación, sin embargo si la aplicación es en riego o meteorología, el índice a considerar debería ser el APB, debido a que en estos cálculos se considera la ETo para periodos menores: mensuales, quincenales, semanales e incluso diarios y subdiarios; por lo que es importante determinar el error que se comete en cada serie temporal, y al final el reflejo de este sería el APB

Para ilustrar de mejor manera la distribución del error se ha realizado el diagrama de cajas del error absoluto en la estimación de la ETo (Figura 2.2), aquí se puede ver claramente que al igual a lo mostrado en la Tabla 2.2 en el diagrama de cajas se observa que al comparar el cálculo del promedio mensual de la ETo, a partir de datos horarios con el cálculo considerando datos diarios, se producen errores tanto de subestimación como de sobrestimación. Sin embargo la posición positiva de la media y de todo el cuartil 0,25 nos indica que los errores tienden a ser de sobrestimación. Cuando se compara este mismo cálculo con la estimación obtenida a partir de datos mensuales se observa que todos los errores cometidos son de sobrestimación.

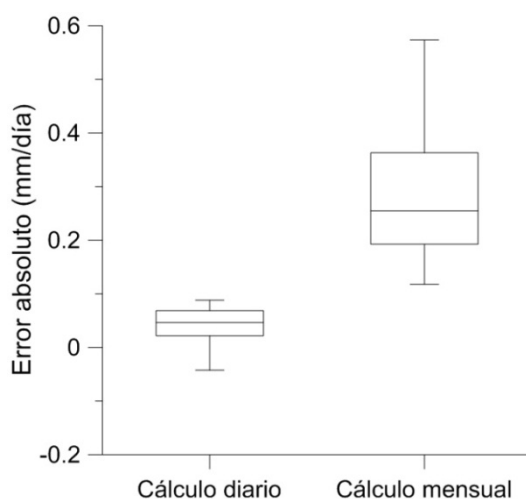


Figura 2.2. Diagrama de cajas de la distribución del error absoluto en el cálculo del promedio diario mensual de la ETo. Cada una de las cajas encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la media, los extremos indican los valores máximo y mínimo.

3.2 Cálculo diario de la ETo

Se calculó el promedio diario de la ETo para cada día correspondiente al periodo de estudio utilizando agregaciones diarias y horarias de las variables, al igual que en la sección anterior se tomó como valor de referencia el obtenido a partir del cálculo horario. Los resultados de los errores absolutos, relativos y el APB se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Errores encontrados al comparar el valor de la ETo diaria calculada con promedios diarios de las variables y con promedios horarios de los datos.

	Error absoluto mm/día	Error relativo %
Máxima sobrestimación	0,269	57,19
Medio	0,076	3,91
Máxima subestimación	-0,373	-8,82
APB (%)	3,49	
Error relativo acumulado (%)	1,76	

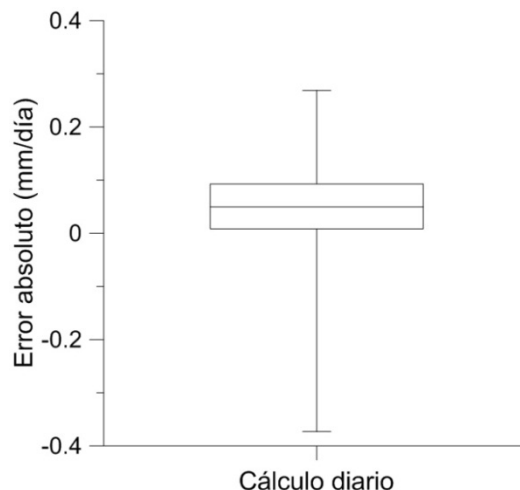


Como se aprecia en la Tabla 2.4 el valor máximo del error relativo es 57,19%, correspondiente a una sobrestimación de 0,269 mm/día, y el máximo error relativo de subestimación fue de -8,82% correspondiente a -0,373 mm/día; sin embargo, el error relativo promedio es mucho más bajo, tan solo 3,91% equivalente a 0.076 mm/día. Esto se debe a que en el día en el cual se observó el error relativo máximo se produjeron condiciones climáticas excepcionales con alta variabilidad subdiaria en los parámetros meteorológicos observados: una desviación estándar de 0,74 °C en la temperatura correspondiente a un promedio diario de 3,33 °C, una desviación estándar de 0,46 m/s en la velocidad correspondiente a una media de 1,65 m/s y el parámetro más influyente en la ETo que es la radiación neta presentó una desviación estándar de 29,32 W/m² correspondiente a una media de 44,49 W/m²; se infiere además que el día fue muy nublado debido a los valores muy bajos de radiación neta (la media en el periodo de estudio es de 101,48 W/m²) lo que causó un valor excepcionalmente bajo de la ETo (tan solo 0,34 mm/día, cuando el promedio en el periodo de estudio es de 2,18 mm/día). Estas circunstancias causaron que el promedio diario de los datos meteorológicos no represente las condiciones reales de ese día introduciendo un considerable error en el cálculo.

El APB calculado en este caso resultó ser de 3,49%, lo que nos permite decir que la estimación del promedio diario de la ETo con promedios diarios de las variables meteorológicas es excelente. Los errores que fueron tanto de subestimación como de sobrestimación causaron la diferencia entre el APB y el error relativo acumulado, de acuerdo a lo descrito en la sección anterior se debe elegir cuál de estos dos índices se considera de acuerdo a la aplicación que se le vaya a dar a los resultados.

Para ilustrar la distribución del error absoluto en la estimación del promedio diario de la ETo se realizó un diagrama de cajas (Figura 2.3). Al igual que en la sección 3.1 se puede ver que a pesar de cometerse errores tanto de subestimación como de sobrestimación, prevalece una tendencia a sobrestimar la ETo cuando se aumenta la escala temporal de cálculo, debido a la posición positiva de la media y del cuartil 0,25.

Figura 2.3. Diagrama de cajas de la distribución del error absoluto en el cálculo del promedio diario de la ETo. La caja encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la media, los extremos indican los valores máximo y mínimo.



4. Conclusiones

El presente estudio tuvo por objeto estimar la ETo considerando distintas escalas temporales. Esto se realizó calculando las medias horarias, mensuales y diarias de las variables meteorológicas involucradas en la ecuación de Penman-Monteith: radiación neta, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

Al agregar los resultados del cálculo diario y horario, a promedio diario mensual, para compararlos con el cálculo mensual de la ETo se observó que a mayor escala de agregación de datos, mayor es el error cometido en la estimación de la ETo.

Sin embargo, al comparar el resultado del promedio diario mensual de la ETo calculado en escala diaria con el calculado en escala horaria se obtuvieron resultados muy similares que reflejaron un error relativo medio de 2,39% equivalente a 0,05 mm/día y un valor del APB de 2,31%.

Se determinó que el error aumenta considerablemente al estimar la ETo a partir de medias mensuales de las variables meteorológicas, resultando un error relativo medio de 13,68% equivalente a 0,281 mm/día y un valor del APB de 13,11%.

Al realizar acumulaciones diarias de las estimaciones de la ETo para periodos horarios, y compararlos con el cálculo diario de la ETo se determinó que el valor máximo del error relativo aconteció el 7 de mayo de 2011 (57,19%, correspondiente a 0,194 mm/día); sin embargo, el error relativo promedio es muy inferior alcanzando tan solo 3,91%, con un excelente valor del APB (3,49%).

En base a los hallazgos mencionados, en un ecosistema de páramo se recomienda realizar el cálculo de la ETo con al menos promedios diarios de las variables meteorológicas, debido a que se introducen considerables errores en su estimación al escoger una escala temporal de valores mensuales. Este error podría incrementarse en



este ecosistema en particular, debido a la alta variabilidad subdiaria de las variables meteorológicas.

Se recomienda además realizar este análisis para periodos submensuales (semanales, decadiarios, quincenales), así como determinar el error respecto a la estimación horaria y diaria de la ETo, debido a que en un gran número de proyectos (por ejemplo, de riego) se consideran estas escalas temporales en el cálculo.

5. Referencias

Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D. and Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Vol. 56, Food & Agriculture Org.

Foken, T., and C.J. Nappo. 2008. Micrometeorology. Springer. 306 págs.

Li, Yi., Robert, Horton., Tusheng, Ren., Chunyan, Chen., 2009. Investigating Time-Scale Effects on Reference Evapotranspiration from Epan Data in North China. Journal of Applied Meteorology and Climatology., 49(5), 867–878.

Stöckle, Claudio., Kjelgaard, Jim., Bellocchi, Gianni., 2004. Evaluation of Estimated Weather Data for Calculating Penman-Monteith Reference Crop Evapotranspiration. Irrigation Science., 23(1), 39–46.

Tokay, Ali., Bashor, Paul G., McDowell, Victoria L., 2009. Comparison of Rain Gauge Measurements in the Mid-Atlantic Region. Journal of Hydrometeorology., 11(2). 553–565.



Capítulo 3. Determinación de la importancia de las variables meteorológicas en la estimación de la ETo

1. Introducción

El método de FAO 56 para aplicar la ecuación combinada de Penman-Monteith requiere de temperaturas máxima y mínima, radiación neta, humedades relativas máxima y mínima y velocidad del viento. Es difícil encontrar estaciones en las que se cuente con registros de todas estas variables (Stöckle et. al., 2004) y particularmente en el Ecuador esto se vuelve aún más complicado debido a que las estaciones del INAMHI no cuentan con todos estos sensores, especialmente de radiación neta; debido a esta escasez de datos, en la publicación número 56 de FAO se han incluido métodos para estimar variables meteorológicas faltantes a partir de otras observadas (Allen et. al., 2006). Los datos mínimos para calcular la ETo constituyen los de temperatura máxima y mínima, a partir de estos valores ya resulta posible realizar una estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia; es evidente que al usar valores estimados de las variables meteorológicas se va a introducir un error el cálculo, sin embargo se desconoce la magnitud del mismo.

Se han realizado estudios similares en varias regiones con la intención de validar los métodos de FAO para estimar variables faltantes en el cálculo de la ETo (Popova et. al., 2006; Jabloun and Sahli, 2008) en los que se ha obtenido buenas estimaciones de los datos faltantes y por tanto de la ETo. En otras investigaciones se ha comparado las estimaciones para datos faltantes de FAO 56 con estimaciones realizadas mediante otros métodos como el de Hargreaves y el de Priestley-Taylor observándose en algunos casos mejores resultados con estos, que con la ecuación de Penman-Monteith (Sentelhas et. al., 2009). No se han encontrado investigaciones que aborden este tema en ecosistemas de páramo andino, por lo que existe un vacío de conocimiento del comportamiento de estas ecuaciones para estimar las variables meteorológicas en el páramo.

Por lo expuesto existe un alto interés en estudiar el impacto en el cálculo de la ETo cuando no se tengan observaciones de todas las variables necesarias ya que de esta manera se podrá conocer la influencia de cada variable para el cálculo y por lo tanto conocer el error que se cometería al realizar el cálculo con valores estimados de las variables en lugar de los medidos. De esta manera se podrá determinar la importancia de contar con los valores observados de las distintas variables y evaluar la validez de estos métodos de estimación de datos meteorológicos en el páramo.

Para la realización del estudio se utilizaron los datos de la estación meteorológica principal del observatorio de Zhurucay que cuenta con todos los sensores para medir estas variables meteorológicas y por lo tanto se tienen todos los datos necesarios para realizar este estudio.



Se realizaron los cálculos estimando valores de las variables meteorológicas para periodos de cálculo mensuales y diarios debido a que no se recomienda estimar valores de variables meteorológicas para periodos menores al diario (Allen et. al., 2006).

2. Materiales y métodos.

2.1 Materiales.

Se utilizaron los datos descritos en la sección 4 del primer capítulo correspondientes a temperaturas máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y radiación neta. Con estos datos se ha calculado promedios mensuales y diarios de las variables involucradas en cada una de las estimaciones de la ETo.

2.2 Métodos

En este capítulo se realizaron los siguientes acercamientos tanto para el promedio diario mensual como para el promedio diario de la ETo:

- ETo estimada a partir de datos de temperatura.
- ETo estimada a partir de datos de temperatura y humedad relativa.
- ETo estimada a partir de datos de temperatura y velocidad del viento.
- ETo estimada a partir de datos de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.
- ETo estimada a partir de datos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación de onda corta.
- ETo estimada a partir de los datos completos de la estación meteorológica (Capítulo 2)

Para el cálculo del promedio diario mensual de la ETo se calculó antes el promedio mensual de cada variable meteorológica, mientras que para el cálculo del promedio diario de la ETo se calculó antes el promedio diario de las variables.

2.2.1 ETo estimada a partir de datos de temperatura.

En este cálculo se utilizaron solamente los datos de las temperaturas máxima y mínima. Las demás variables se estimaron de la siguiente manera:



$$e_a = e^\circ(T_{min}) = 0.611 * e^{\left(\frac{17,27 T_{min}}{T_{min}+237,3}\right)} \quad (3.1)$$

$$R_s = k_{R_s} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (3.2)$$

Donde:

- R_s : radiación solar o de onda corta [$\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$]
- K_{R_s} : coeficiente de ajuste (0,16-0,19) [$^\circ\text{C}^{-0,5}$]. (Se ha asumido el valor de 0,16 debido a ser una zona del interior en donde predomina la masa de tierra y las masas de aire no están influenciadas por cuerpos grandes de agua (Allen et. al., 2006))
- R_a : radiación extraterrestre [$\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$]. (Este valor se obtiene de las tablas que se encuentran en los anexos de FAO 56, se necesita conocer el mes del año y la latitud)

$$R_{s0} = (0,75 * 10^{-5} z) R_a \quad (3.3)$$

Donde:

- R_{s0} : radiación solar para un día despejado [$\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$]

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max,k}^4 + T_{min,k}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0,35 \right) \quad (3.4)$$

Donde:

- R_{nl} : radiación neta de onda larga [$\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$]
- $T_{max,k}$: temperatura máxima [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,16$]
- $T_{min,k}$: temperatura mínima [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,16$]
- σ : constante de Stefan-Boltzmann [$4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/\text{K}^4 \cdot \text{m}^4 \cdot \text{día}$]

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (3.5)$$

Donde:

- R_{ns} : Radiación neta de onda corta [$\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$]
- α : Albedo de la superficie, se ha asumido igual a 0,23 (cultivo de referencia)



$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.6)$$

Se asumió además una velocidad del viento igual a 2 m/s como se indica en FAO 56. El valor de G se calculó mediante la ecuación 2.3 para periodos mensuales y se asumió el valor de cero para periodos diarios.

Mediante estas ecuaciones y suposiciones se estimaron todos los valores de las variables meteorológicas necesarias para la aplicación de la ecuación 2.1 y sus ecuaciones complementarias descritas en la sección 2.2.1, obteniéndose la estimación de la ETo a partir de los datos de temperatura.

2.2.2 ETo estimada a partir de datos de temperatura y humedad relativa.

La única diferencia entre el cálculo anterior y el presente es que al incluir los datos de humedad relativa se calculó e_a mediante la ecuación 2.9.

2.2.3 ETo estimada a partir de datos de temperatura y velocidad del viento.

Se incluyeron los datos observados de la velocidad del viento y se calculó la ETo mediante el proceso descrito en la sección 2.2.1.

2.2.4 ETo estimada a partir de datos de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

Para realizar esta estimación se incluyeron los datos de velocidad del viento y se calculó e_a mediante la ecuación 2.9.

2.2.5 ETo estimada a partir de datos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación de onda corta.

En las estimaciones anteriores la radiación de onda corta (R_s) era calculada a partir de la radiación extraterrestre obtenida de tablas, al incluir este dato medido se lo introdujo directamente en el cálculo de las ecuaciones 3.4 y 3.5 para estimar la radiación neta.

2.2.6 ETo estimada a partir de los datos completos de la estación meteorológica (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación neta).

Este es el cálculo realizado en el Capítulo 2, es decir, utilizando todos los datos de la estación meteorológica.



El análisis estadístico para evaluar la calidad de las estimaciones de este capítulo es el mismo que se realizó en el Capítulo 2, descrito en la sección 2.2.4.

3. Resultados.

3.1 Importancia de los datos meteorológicos en la estimación del promedio diario mensual de la ETo.

Se realizaron los promedios mensuales de los datos meteorológicos, con estos promedios se estimó el promedio diario mensual de la ETo considerando distintas variables meteorológicas y estimando otras, según los métodos señalados en la sección 2.2; los resultados se muestran en la Tabla 3.1 y la Figura 3.1, el análisis del error y su distribución se presentan en la Tabla 3.2 y en la Figura 3.2, y finalmente se tomaron como referencia en el cálculo del error los resultados obtenidos en el Capítulo 2.

Tabla 3.1. Promedio diario mensual de la ETo.

Mes	ETo (mm/día) estimada a partir de:					
	Todos los datos	T, T	T, RH	T, U2	T, RH, U2	T, RH, U2, Rs
feb-11	2,30	3,58	3,73	3,43	3,49	2,42
mar-11	2,72	3,62	3,68	3,47	3,50	2,85
abr-11	2,05	3,21	2,99	3,08	2,99	1,93
may-11	2,33	3,25	3,57	3,08	3,28	2,49
jun-11	2,15	3,10	2,93	2,90	2,80	2,20
jul-11	2,04	3,22	3,03	3,04	2,91	2,08
ago-11	2,66	3,47	3,28	3,31	3,17	2,55
sep-11	2,03	3,43	3,21	3,33	3,18	1,86
oct-11	3,02	3,91	4,12	3,68	3,80	3,10
nov-11	2,78	3,58	3,79	3,39	3,49	2,93
dic-11	2,36	3,52	3,44	3,35	3,32	2,20
ene-12	2,44	3,42	3,16	3,29	3,17	2,15
feb-12	2,11	3,36	3,15	3,26	3,17	1,98
mar-12	2,37	3,45	3,28	3,35	3,25	2,06
abr-12	2,47	3,42	3,40	3,26	3,25	2,49
may-12	2,07	2,97	2,82	2,86	2,77	2,02
jun-12	2,34	2,90	2,80	2,77	2,70	2,43
jul-12	2,23	3,05	3,06	2,92	2,92	2,31
ago-12	2,73	3,58	3,68	3,41	3,48	2,77
sep-12	2,64	3,68	3,67	3,55	3,54	2,50
oct-12	2,40	3,77	3,58	3,58	3,48	2,24
nov-12	2,77	3,68	3,76	3,49	3,53	2,53

dic-12	3,08	4,03	4,19	3,77	3,87	3,14
ene-13	2,42	3,55	3,35	3,43	3,30	1,99
feb-13	2,04	3,67	3,36	3,52	3,38	1,93

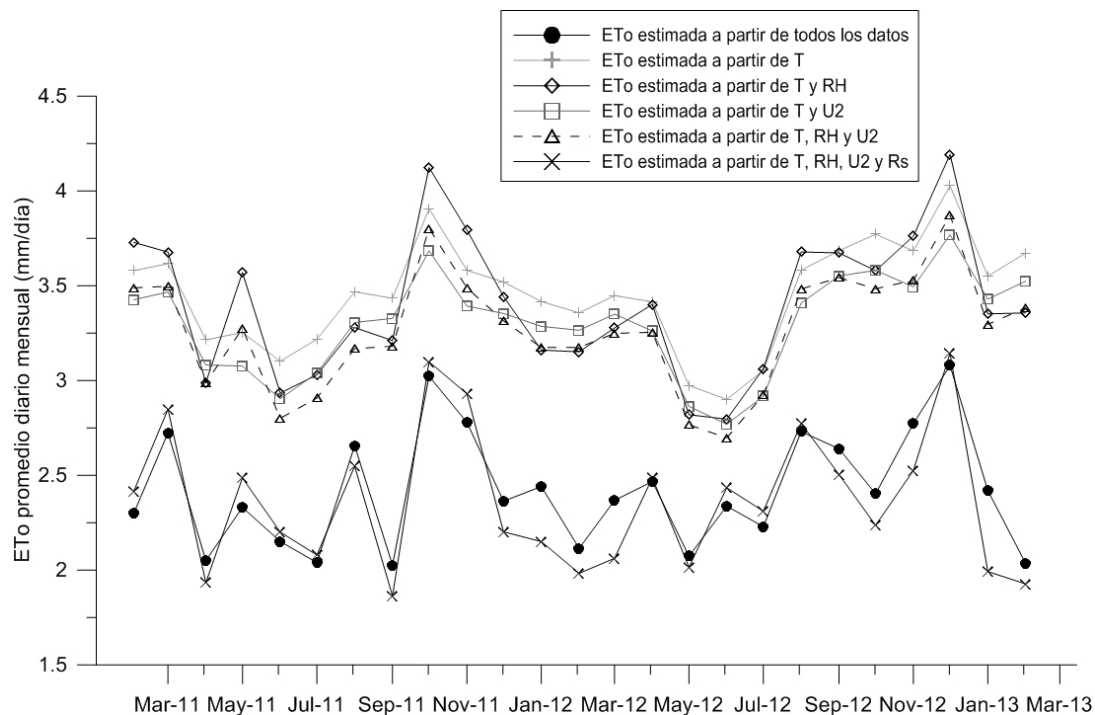


Figura 3.1. Promedio diario mensual de la ETo.

La Figura 3.1 muestra una diferencia notable en las estimaciones de la ETo de acuerdo al acercamiento empleado. Los primeros 4 acercamientos, es decir, los más simples (desde el indicado en la sección 2.2.1 hasta el indicado en la sección 2.2.4) que no consideran observaciones de radiación solar o neta, presentan fuertes sobrestimaciones con respecto a la ETo calculada a partir de todas las variables meteorológicas. En este caso se alcanza un valor máximo para el promedio diario mensual de la ETo de 4,19 mm/día en diciembre de 2012 en la estimación realizada a partir de los datos de temperatura y humedad relativa.

Cuando se incluye a la radiación solar (acercamiento de la sección 2.2.5) los resultados son mucho mejores que los anteriores y muestran errores tanto de subestimación, como de sobrestimación con respecto al cálculo ideal realizado en el Capítulo 2.



Tabla 3.2 Valores máximo y promedio del error absoluto, relativo, y APB en las estimaciones del promedio diario mensual de la ETo, error relativo en la acumulación de la ETo durante el periodo de estudio.

ETo estimada a partir de:	T	T, RH	T, U2	T, RH, U2	T, RH, U2, RS
Error absoluto máximo (mm/día)	1,637	1,429	1,489	1,348	-0,428
Error absoluto medio (mm/día)	1,035	0,979	0,879	0,848	-0,060
Error relativo máximo (%)	80,42	64,92	73,16	66,23	-17,67
Error relativo medio (%)	43,98	41,09	37,56	35,94	-2,46
Error relativo acumulado (%)	42,73	40,44	36,29	34,99	2,31
APB (%)	42,73	40,44	36,29	34,99	5,69
Calificación según APB	Pésima	Pésima	Pésima	Pésima	Muy buena

El análisis de la Tabla 3.1 indica que tanto el error máximo como el error promedio muestran una tendencia decreciente a medida que se incorporan más variables en el cálculo de la ETo. Cuando se utilizaron solamente datos de temperatura (acercamiento más simple) se produjo el máximo error, un error relativo medio de 43,98% correspondiente a 1,035 mm/día. Al incorporar los datos de humedad relativa el error disminuyó, siendo 41,09% para el error relativo medio correspondiente a 0,979 mm/día. Cuando se calculó la ETo con los datos de temperatura y velocidad del viento, se observó un error relativo medio de 37,56% equivalente a 0,879 mm/día el cual es menor al anterior. Al incorporar en el cálculo las tres variables ya mencionadas, el cálculo reflejó un error relativo medio de 35,94% correspondiente a 0,848 mm/día. El mínimo error se observó al incorporar la radiación solar al cálculo realizado con la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, la precisión en el cálculo mejoró notablemente reflejando un error relativo medio de -2,46% equivalente a -0,06 mm/día.

En los cuatro primeros acercamientos el APB y el error relativo acumulado tienen el mismo valor debido a que todos los errores en estas cálculos son de sobrestimación y por lo tanto siempre positivos; mientras que al incluir los datos de radiación solar o de onda corta se ha obtenido una buena estimación de la ETo que ha resultado en errores tanto de subestimación como de sobrestimación, por lo que se debe tomar en cuenta uno de los dos índices (el APB o el error relativo acumulado) de acuerdo a la aplicación que se le vaya a dar a la ETo. Por ejemplo si se trata de cerrar el balance hidrológico, el valor a tomar en cuenta sería el error acumulado ya que este balance se realiza para ciclos hidrológicos o periodos anuales y los errores de sobrestimación se compensan con los de subestimación; sin embargo si la aplicación es en riego o meteorología, el índice a considerar debería ser el APB, debido a que en estos cálculos se considera la ETo para periodos menores: mensuales, quincenales, semanales e incluso diarios y

subdiarios; por lo que es importante determinar el error que se comete en cada serie temporal, y al final el reflejo de este sería el APB.

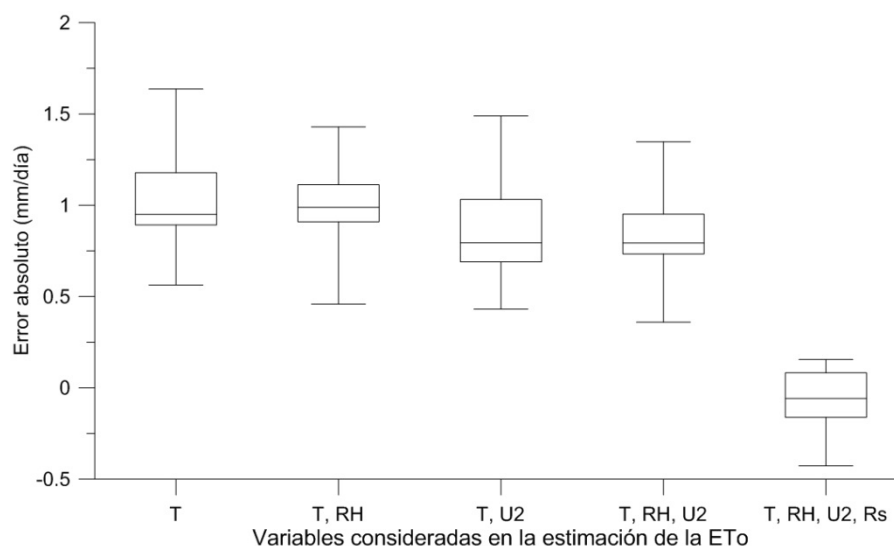


Figura 3.2. Diagrama de cajas de la distribución del error absoluto en el cálculo del promedio diario mensual de la ETo. La caja encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la media, los extremos indican los valores máximo y mínimo.

En el diagrama de cajas de la Figura 3.2 se puede ver que todos los errores de las estimaciones que consideran solamente temperatura, humedad relativa y velocidad del viento son de sobrestimación y son mucho mayores al error que se produce al incorporar los datos de radiación de onda corta en el que se observa un valor de la media en el error absoluto cercano a cero que nos indica una buena estimación de la ETo.

3.2 Importancia de los datos meteorológicos en la estimación del promedio diario de la ETo.

Se calcularon los promedios diarios de los datos meteorológicos, con estos promedios se estimó el promedio diario de la ETo, considerando las distintas variables meteorológicas y estimando otras, según los métodos señalados en la sección 2.2; el análisis del error y su distribución se presentan en la Tabla 3.3 y en la Figura 3.3, para lo cual se tomó como referencia en el cálculo del error los resultados obtenidos en el Capítulo 2.

Tabla 3.3. Valores máximo y promedio del error absoluto, relativo y APB en las estimaciones del promedio diario de la ETo, error relativo en la acumulación de la ETo durante el periodo de estudio.



ETo estimada a partir de:	T	T, RH	T, U2	T, RH, U2	T, RH, U2, RS
Error absoluto máximo (mm/día)	1,882	1,891	1,79	1,804	1,808
Error absoluto medio (mm/día)	0,338	0,202	0,313	0,259	-0,218
Error relativo máximo (%)	259,89	205,772	269,89	232,61	85,73
Error relativo medio (%)	28,03	19,84	27,89	24,31	-4,75
Error relativo acumulado (%)	15,46	9,21	14,31	11,83	9,97
APB (%)	24,29	20,22	24,97	23,23	16,12
Calificación según APB	Pésima	Pésima	Pésima	Pésima	Razonable

La Tabla 3.3 muestra que los valores del error relativo medio disminuyen a medida que se incorporan los valores medidos de las variables en el cálculo. En la estimación realizada a partir de datos de temperatura se obtuvo un error relativo medio de 28,03% equivalente a 0,338 mm/día; al incluir la humedad relativa se obtuvo un error relativo medio igual a 19,84% equivalente a 0,202 mm/día que es el menor entre los de las cuatro estimaciones en los que no se usó datos de radiación. En los cálculos con temperatura y velocidad del viento y temperatura, humedad relativa y velocidad del viento se obtuvieron errores relativos medios de 27,89% y 24,31% correspondientes a 0,313 mm/día y 0,259 mm/día respectivamente. De manera similar a los resultados de la sección anterior el cálculo mejoró notablemente cuando se tomaron en cuenta los datos de radiación de onda corta, con los cuales se obtuvo un error relativo medio de -4,75% correspondiente a -0,218 mm/día.

Al comparar los valores del error relativo acumulado y el APB mostrados en la Tabla 3.3 se observa que a diferencia de los resultados obtenidos en la sección 3.1, en el cálculo del promedio diario de ETo se producen errores tanto de subestimación como de sobrestimación, en todos los acercamientos considerados; entre estos dos índices se debe elegir el más adecuado de acuerdo a la aplicación que se le vaya a dar a los resultados, de acuerdo a lo descrito anteriormente.

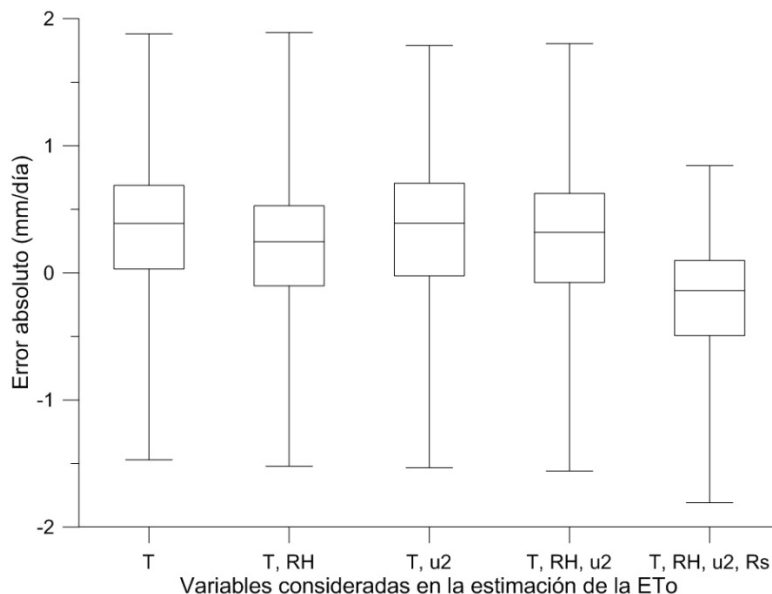


Figura 3.3. Diagrama de cajas de la distribución del error absoluto en el cálculo del promedio diario de la ETo. La caja encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la media, los extremos indican los valores máximo y mínimo.

En el diagrama de cajas (Figura 3.3) se observa que hay una distribución más amplia del error con respecto a lo observado en los cálculos del promedio diario mensual; los valores máximo y mínimo fluctúan prácticamente en el mismo rango en las estimaciones que no incluyen datos observados de radiación y todos tienen medias mayores a cero, lo que indica una tendencia a sobrestimar la ETo diaria. En el caso del cálculo en el que se incluye la radiación de onda corta se observa de igual manera un amplio rango en el que se encuentra el error, pero esta estimación tiene la media del error relativo más cercana a cero que las anteriores, que es otro indicador de que esta estimación es mejor que las anteriores.

4. Conclusiones.

Las variables meteorológicas involucradas en la ecuación de Penman-Monteith: radiación neta, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa. Considerando que no siempre se disponen de todas ellas se estudió el efecto en la estimación de la ETo considerando una degradación en el número de las variables observadas para el cálculo, y estimando las faltantes. Esto se realizó calculando las medias mensuales y diarias de la ETo.

Al calcular el promedio diario mensual de la ETo con los distintos acercamientos se observó que el error disminuye a medida que se incorporan parámetros observados en su cálculo. Lo más notorio fue la clara división en dos grupos en las estimaciones de la ETo. Las estimaciones calculadas a partir de temperatura, humedad relativa y



velocidad del viento producen valores de la ETo elevados y una considerable tendencia a la sobrestimación. Al incluir los datos de radiación de onda corta la ETo se acercó mucho más al cálculo realizado con todas las variables disponibles, presentando errores tanto de sobrestimación como de subestimación y un promedio del error relativo cercano a cero. Cabe resaltar que la inclusión de los datos de radiación solar mejoró la estimación a una clasificación de muy buena, mientras que en todos los casos anteriores resultó catalogada como pésima según el criterio de la Tabla 2.1.

Al estimar el promedio diario de la ETo incorporando poco a poco los valores medidos de las variables meteorológicas, se obtuvieron valores similares en el error y su distribución en los cuatro primeros acercamientos, que son los que no incluyen ningún dato medido de radiación. De entre estas cuatro estimaciones, la mejor resultó ser la que incluye valores observados de temperatura y humedad relativa. De manera similar a lo obtenido en el cálculo del promedio diario mensual se mejoró notablemente la estimación al incorporar en la estimación del promedio diario mensual los datos del piranómetro, mejorando la estimación de pésima a razonable.

En base a los hallazgos, se recomienda que si no se puede adquirir un radiómetro neto para el cálculo de la ETo, se debe contar por los menos con un piranómetro, debido a que todos los cálculos realizados sin datos de radiación fueron calificados como pésimos debido a los altos valores de APB obtenidos. Se recomienda analizar, además, lo que ocurre en periodos decadiarios y quincenales, debido a que frecuentemente se considera estas escalas temporales en varios estudios como por ejemplo planes de riego para cultivos en zonas similares a la estudiada.

Para estudios futuros, se sugiere analizar el efecto que tiene cada variable en la estimación de la ETo, quitando del cálculo cada variable una a la vez, de esta manera se podría tener una idea de la magnitud del error que se produciría, por ejemplo, en el caso de que alguno de los sensores sufra un daño.

Se recomienda además, comparar los resultados obtenidos con estimaciones de la ETo obtenidas a partir de distintos métodos como los de Hargraves y Priestley Taylor, que han sido probados en estudios anteriores (Sentelhas et. al., 2009) y han demostrado estimar mejor la ETo, para el caso de datos faltantes, que la metodología descrita en FAO 56.

Las buenas estimaciones de radiación neta a partir de radiación solar parecen indicar que el valor del albedo del pajonal es cercano al albedo del cultivo de referencia que es igual a 0.23. Se recomienda por medio de otras investigaciones determinar el valor del albedo para pajonal para comprobar esta hipótesis.

5. Referencias.



Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D. and Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Vol. 56, Food & Agriculture Org.

Jabloun, M., and A. Sahli., 2008. Evaluation of FAO-56 Methodology for Estimating Reference Evapotranspiration Using Limited Climatic Data: Application to Tunisia. *Agricultural Water Management* 95(6), 707 – 715.

Popova, Zornitsa., Milena Kercheva., and Luis S. Pereira., 2004. Validation of the FAO Methodology for Computing ETo with Limited Data. Application to South Bulgaria. *Irrigation and Drainage.*, 55(2), 201–215.

Sentelhas, Paulo C., Terry J. Gillespie., and Eduardo A. Santos., 2010. Evaluation of {FAO} Penman–Monteith and Alternative Methods for Estimating Reference Evapotranspiration with Missing Data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management* 97(5), 635 – 644.

Stöckle, Claudio., Kjølgaard, Jim., Bellocchi, Gianni., 2004. Evaluation of Estimated Weather Data for Calculating Penman-Monteith Reference Crop Evapotranspiration. *Irrigation Science.*, 23(1), 39–46.



Capítulo 4. Error en la estimación de la ETo debido a diferentes frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas

1. Introducción

Se pueden producir errores en los datos meteorológicos debido a tres causas principalmente. La primera se debe a las propiedades de los sensores y tiene que ver con sus características técnicas:

- Rango de medición
- Precisión
- Estabilidad a largo plazo
- Tiempo de respuesta

La segunda es la dificultad de contar con observaciones de todas las variables, por lo tanto se debe realizar estimaciones que no son perfectas, este análisis se realizó en el Capítulo 3. Y la tercera causa, que ha sido raramente estudiada, es la frecuencia de muestreo de estas variables (Hupet and Vanclooster, 2001).

Las variables meteorológicas son propensas a sufrir grandes fluctuaciones en pequeñas escalas temporales. Debido a esto, es muy probable que la frecuencia de muestreo elegida juegue un papel importante en los resultados de las mediciones meteorológicas. La frecuencia de muestreo que se escoge para una investigación está relacionada principalmente con los objetivos que se persiguen y la precisión que se requiere en el cálculo de la ETo, que puede ser horaria, diaria, semanal, mensual o de cualquier otra escala temporal. La frecuencia de muestreo influye además directamente en la cantidad de datos que serán almacenados en la memoria de las estaciones meteorológicas; mientras más alta sea la frecuencia de muestreo mayor será la cantidad de datos que almacene la memoria de la estación y por lo tanto se deberá realizar las descargas o transmisión de datos con frecuencia regular para evitar pérdidas por sobre-escritura de datos en las unidades de almacenamiento de los dataloggers que receptan datos de los sensores.

Existen distintos enfoques para evaluar el efecto de variar la frecuencia de muestreo de las variables meteorológicas en la estimación de la ETo, el método usado por Hupet y Vanclooster combinó un análisis de sensibilidad de la ecuación de Penman-Monteith con el error cometido debido a la variación de la frecuencia de muestreo en cada variable estudiada. No se han encontrado más investigaciones respecto al tema, menos aún en los Andes; por lo que este estudio es pionero en ecosistemas de alta montaña.

Los resultados de este estudio serán de gran utilidad en proyectos futuros, ya que se determinará la importancia de muestrear las variables meteorológicas cada cinco



minutos al comparar estos cálculos con los resultados obtenidos de frecuencias menores; en este caso 10, 15, 30 y 60 minutos. De esta manera se podrán tomar decisiones sobre la configuración y la programación de los sensores en proyectos futuros conociendo los errores que se deberían esperar al elegir frecuencias de muestreo distintas.

En este contexto, el objetivo de este capítulo es determinar el error en el cálculo de la ETo al considerar distintas frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas, para ellos se realizaron distintos cálculos de la ETo variando simultáneamente la frecuencia de muestreo de todas las variables meteorológicas observadas (temperaturas máxima, mínima y promedio, velocidad del viento, humedad relativa y radiación neta) y comparándolos con los resultados de calcular la ETo con los datos medidos con la máxima frecuencia. Se ha elegido realizar estimaciones de la ETo horarias, diarias y mensuales considerando frecuencias de muestreo de 10, 15, 30, y 60 minutos. Estos valores de la ETo fueron comparados con la ETo calculada a partir de las variables observadas cada 5 minutos.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Para realizar este estudio se utilizaron los datos que se describen en la sección 4 del primer capítulo. De ellos se tomó solamente el valor de la variable cada 10, 15, 30 y 60 minutos según el caso para simular las distintas frecuencias de muestreo. Es decir, se simuló que la estación meteorológica graba los datos promedio de los últimos 5 minutos con la frecuencia indicada. Luego, de manera similar a lo realizado en el Capítulo 2 se han realizado los promedios horarios, diarios y mensuales de las variables para calcular la ETo en estas tres distintas escalas.

2.2 Métodos

Con los promedios horarios, diarios y mensuales de las variables que se ha realizado para cada frecuencia de muestreo se han aplicado las ecuaciones descritas en el Capítulo 2 para realizar los cálculos horario, diario y mensual de la ETo mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen et. al., 2006).

El análisis estadístico realizado en este capítulo es el mismo que si hizo en los dos capítulos anteriores. Se calculó el error absoluto y el error relativo, así como sus valores máximo y promedio. Se calculó además el Absolute Percent Bias (APB) y se evaluó este valor según el criterio mostrado en la Tabla 2.1.

3. Resultados

3.1 Cálculo del promedio diario mensual de la ETo asumiendo distintas frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas



Mediante el procedimiento descrito en la sección 2.2.1 del Capítulo 2 se ha calculado el promedio diario mensual de la ETo para las distintas frecuencias de muestreo elegidas para el análisis: 5, 10, 15, 30 y 60 minutos; los resultados se muestran en la Figura 4.1 y en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Promedio diario mensual de la ETo calculado para distintas frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas.

Promedio diario mensual de la ETo (mm/día) con una frecuencia de muestreo de las variables meteorológicas de:					
Mes	5 minutos	10 minutos	15 minutos	30 minutos	60 minutos
feb-11	2.30	2.29	2.26	2.22	2.09
mar-11	2.72	2.72	2.68	2.67	2.65
abr-11	2.05	2.04	2.03	2.00	1.94
may-11	2.33	2.34	2.30	2.31	2.28
jun-11	2.15	2.17	2.16	2.13	2.09
jul-11	2.04	1.97	2.04	1.96	1.94
ago-11	2.66	2.65	2.62	2.58	2.63
sep-11	2.03	2.01	2.01	2.00	2.11
oct-11	3.02	3.00	3.00	3.00	2.95
nov-11	2.78	2.78	2.77	2.76	2.79
dic-11	2.36	2.34	2.39	2.39	2.31
ene-12	2.44	2.43	2.41	2.43	2.53
feb-12	2.11	2.09	2.09	2.08	2.04
mar-12	2.37	2.29	2.27	2.28	2.25
abr-12	2.47	2.45	2.43	2.40	2.36
may-12	2.07	2.07	2.07	2.09	1.99
jun-12	2.34	2.31	2.34	2.29	2.29
jul-12	2.23	2.23	2.23	2.22	2.27
ago-12	2.73	2.72	2.72	2.72	2.77
sep-12	2.64	2.64	2.63	2.63	2.59
oct-12	2.40	2.40	2.40	2.42	2.40
nov-12	2.77	2.77	2.75	2.71	2.69
dic-12	3.08	3.08	3.09	3.08	3.08
ene-13	2.42	2.42	2.39	2.34	2.44
feb-13	2.04	2.03	2.04	2.03	1.98

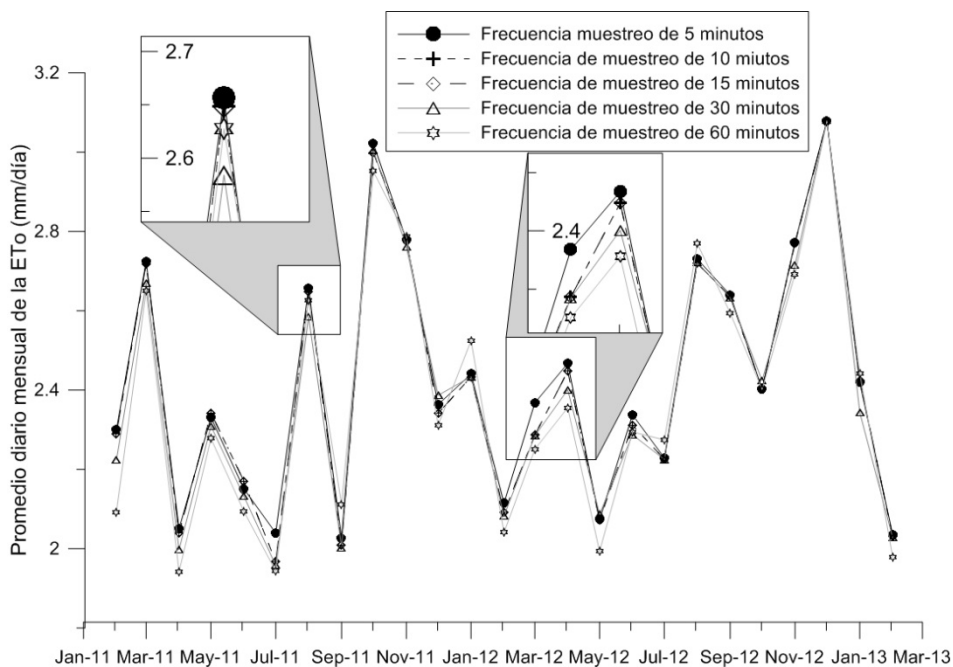


Figura 4.1. Promedio diario mensual de la ETo calculado con distintas frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas.

En la Figura 4.1 se observa que en general, no hay grandes variaciones en el promedio diario mensual de la ETo al variar la frecuencia de muestreo de las variables meteorológicas, y que para todas las frecuencias se cometen errores de subestimación y de sobrestimación; a continuación se muestra un análisis más detallado (Ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Valores máximo y promedio del error absoluto, relativo y APB en las estimaciones del promedio diario mensual de la ETo, error relativo en la acumulación de la ETo durante el periodo de estudio para cada frecuencia de muestreo.

Frecuencia de muestreo (min)	10	15	30	60
Error absoluto máximo (mm/día)	-0,081	-0,100	-0,083	-0,207
Error absoluto medio (mm/día)	-0,013	-0,018	-0,031	-0,043
Error relativo máximo (%)	-3,57	-4,21	-4,00	-9,02
Error relativo medio (%)	-0,55	-0,74	-1,31	-1,84
Error relativo acumulado (%)	-0,52	-0,74	-1,28	-1,77
APB (%)	0,65	0,90	1,50	2,77
Calificación según APB	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

De acuerdo a lo esperado, todos los índices muestran que el error se incrementa a medida que se disminuye la frecuencia de muestreo. Se observa además una tendencia a subestimar la ETo cuando el muestreo de las variables meteorológicas se realiza en periodos más grandes de tiempo, debido a que los errores medios, tanto el relativo como el absoluto y el error relativo acumulado, tienen valores negativos cuantitativamente mayores a medida que se aumenta la escala de muestreo. Con la frecuencia de muestreo de 10 minutos hubo un error relativo promedio de -0,55% equivalente a -0,013 mm/día de ETo, al aumentar la frecuencia a 15 minutos el error relativo promedio fue de -0.74% equivalente -0.018 mm/día, al variar la frecuencia a un periodo de 30 minutos el error relativo promedio fue igual a -1.31% equivalente a -0.031 mm/día, finalmente al realizar el cálculo con el periodo máximo de 60 minutos se obtuvieron los valores más altos, un error relativo medio de -1,84% equivalente a -0,043 mm/día. Al comparar las frecuencias de muestreo de 10 y 30 minutos se observa que el error de la segunda es más del doble del error de la primera; sin embargo esta diferencia es de apenas 0,018 mm/día.

Además debido a las diferencias entre los valores del error relativo acumulado y el APB, se determina que los errores introducidos en el cálculo fueron tanto de subestimación como de sobrestimación; de manera similar a lo descrito en los capítulos precedentes, se debe elegir uno de estos dos índices dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar a la ETo, de modo que si se va a introducir en el balance hidrológico lo que interesa es el error relativo acumulado, mientras que si se va a usar en aplicaciones meteorológicas, o en planes de riego lo que se debe considerar es el APB.

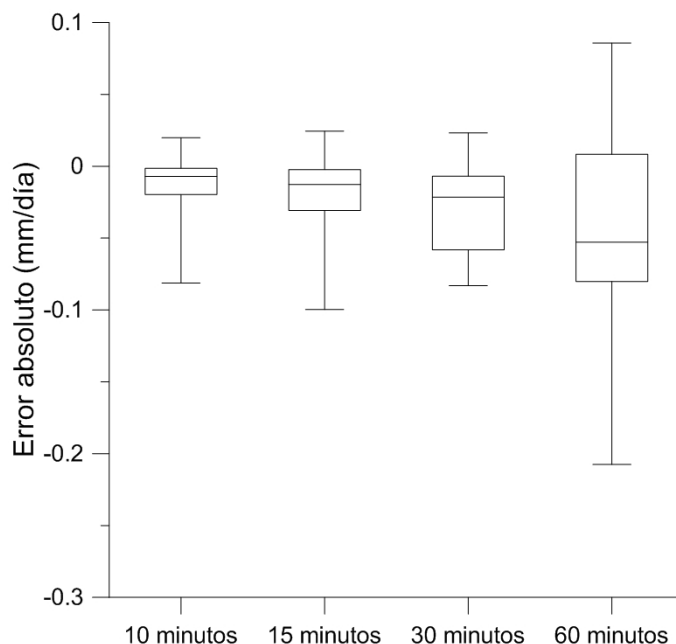


Figura 4.2. Diagrama de cajas de la distribución del error absoluto en el cálculo del promedio diario mensual de la ETo. La caja encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la media, los extremos indican los valores máximo y mínimo.

Un análisis de la distribución del error se ha realizado con un diagrama de cajas del error absoluto en el cálculo del promedio diario mensual de la ETo (Figura 4.2). Por el valor de la media menor a cero en todos los casos, se observa una tendencia a subestimar la ETo, y la subestimación se vuelve más grande a medida que aumenta la frecuencia de muestreo de las variables meteorológicas. Además los errores máximos en todos los casos son de subestimación. Esta tendencia de subestimar la ETo puede deberse a que al disminuir la frecuencia de muestreo se reduce la probabilidad de medir los valores máximos de radiación y de temperatura que pueden durar pocos segundos si el cielo está muy nublado.

3.2 Cálculo del promedio diario de la ETo asumiendo distintas frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas

Mediante el procedimiento descrito en la sección 2.2.2 se ha calculado el promedio diario de la ETo para las distintas frecuencias de muestreo elegidas para el análisis: 5, 10, 15, 30 y 60 minutos; los resultados se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Valores máximo y promedio del error absoluto, relativo y APB en las estimaciones del promedio diario de la ETo, error relativo en la acumulación de la ETo durante el periodo de estudio para cada frecuencia de muestreo.

Frecuencia de muestreo (min)	10	15	30	60
Error absoluto máximo (mm/día)	-0,221	0,413	0,821	1,197
Error absoluto medio (mm/día)	-0,009	-0,010	-0,024	-0,030
Error relativo máximo (%)	-8,26	12,80	31,74	50,55
Error relativo medio (%)	-0,47	-0,52	-1,22	-1,66
Error relativo acumulado (%)	-0,40	-0,44	-1,11	-1,39
APB (%)	0,56	2,78	5,59	9,33
Calificación según APB	Excelente	Excelente	Muy buena	Muy buena

Se observa, al igual que en la sección anterior, que la magnitud del error tiende crecer a medida que disminuye la frecuencia de muestreo. Cuando esta se amplía a 10 minutos el error relativo medio es -0,47% equivalente a -0,009 mm/día, para una



frecuencia de muestreo de 15 minutos el promedio del error relativo es -0,52% correspondiente a -0,010 mm/día, si el periodo se aumenta a 30 minutos, el error relativo medio crece a un valor de -1,22%; los valores máximos se obtuvieron al calcular el promedio diario de la ETo con una frecuencia de muestreo de las variables meteorológicas de 60 minutos, un error relativo medio de -1,66% correspondiente a -0,030 mm/día. Al comparar los cálculos obtenidos de las frecuencias de 10 y 15 minutos con el de la frecuencia de 30 minutos se observa nuevamente que el error promedio para la frecuencia de 30 minutos es más del doble que en las otras dos, sin embargo esta diferencia representa menos de 0.015 mm/día de ETo. Los valores negativos del error promedio nos indican una tendencia a subestimar la ETo cuando se disminuye la frecuencia de muestreo.

Se observan diferencias en todos los casos entre el error acumulado y el APB debido a que los errores son tanto de subestimación como de sobrestimación, esta diferencia crece con la frecuencia de muestreo, para una frecuencia 60 minutos el error acumulado es de -1,39% mientras que el APB es de 9,33%; esto significa que dependiendo de la aplicación en la que se vaya a usar la ETo la frecuencia de muestreo tiene un impacto diferente, si se trata de un plan de riego se esperaría un error de más del 9% al programar los sensores para una frecuencia de muestreo de 60 minutos, mientras que si se cierra un balance hidrológico se esperaría una subestimación de 1,39%.

Un análisis de la distribución del error se ha realizado con un diagrama de cajas del error absoluto en el cálculo del promedio diario mensual de la ETo (Figura 4.3). De igual manera que en la sección anterior, la posición de la media por debajo de cero indica una tendencia a subestimar la ETo, la cual aumenta con la frecuencia de muestreo. Por la posición de los máximos y mínimos se determina que hay una dispersión del error en un rango más amplio que en el cálculo mensual de la ETo en el cual los errores máximos para una frecuencia de muestreo de 60 minutos apenas superaron los 0,2 mm/día mientras que en el cálculo diario se observa que hay errores máximos mayores a 1 mm/día; esto se debe a la alta variabilidad sub-diaria de los parámetros meteorológicos, cuyos errores de medición debidos a una mayor frecuencia de muestreo se atenúan al realizar promedios mensuales.

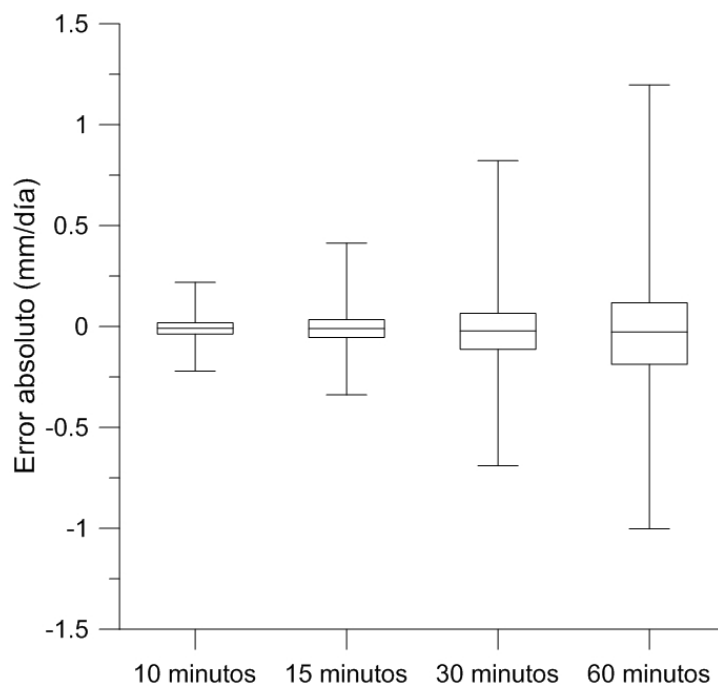


Figura 4.3. Diagrama de cajas de la distribución del error absoluto en el cálculo del promedio diario de la ETo. La caja encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la media, los extremos indican los valores máximo y mínimo.

3.3 Cálculo del promedio horario de la ETo asumiendo distintas frecuencias de muestreo de las variables meteorológicas

Mediante el procedimiento descrito en la sección 2.2.3 se ha calculado el promedio horario de la ETo para las distintas frecuencias de muestreo elegidas para el análisis: 5, 10, 15, 30 y 60 minutos; los resultados se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Valores máximo y promedio del error absoluto y relativo y AbsolutePercentBias en las estimaciones del promedio horario de la ETo, error relativo en la acumulación de la ETo durante el periodo de estudio para cada frecuencia de muestreo.



Frecuencia de muestreo (min)	10	15	30	60
Error absoluto máximo (mm/hora)	0,117	0,220	-0,352	-0,746
Error absoluto medio (mm/hora)	-8E-5	7E-5	-2E-5	-0,036 2 775
Error relativo máximo (%)	30 454	-51 446	-133 967	100 -1
Error relativo medio (%)	-0,42	-3,33	-9,00	168,07
Error relativo acumulado (%)	-0,09	0,08	-0,03	-42,63
APB (%)	5,46	9,55	19,92	259,82
Calificación según APB	Muy buena	Muy buena	Razonable	Pésima

Al igual que en las dos secciones anteriores se aprecia una tendencia a subestimar la ETo y además a que esta subestimación sea mayor mientras se aumenta la frecuencia de muestreo. Con la frecuencia de 10 minutos se obtuvo un error relativo medio de -0,42%, al aumentar la frecuencia a 15 minutos se afectó considerablemente el cálculo ya que el error relativo medio fue de -3,33% y con la frecuencia de muestreo de 30 minutos se produjo un error promedio aún mayor de -9,00%.

Pero al aumentar la frecuencia de muestreo a 60 minutos se perdió completamente la precisión en el cálculo al obtenerse un error relativo promedio de -1 168,07%. El valor del error relativo máximo es muy alto para todos los casos, mayor a 30 000%, lo que indica que hay una incertidumbre muy grande al calcular el promedio horario de la ETo con una frecuencia de muestreo de 60 minutos. Los valores del error relativo acumulado son muy bajos, hasta para una frecuencia de muestreo de 30 minutos, sin embargo al aumentar el periodo a 60 minutos, este valor se eleva a -42,63%. Estos errores mucho mayores en la frecuencia de muestreo de 60 minutos se deben a que al realizar el cálculo horario de la ETo con la variable muestreada solo una vez en el periodo correspondiente se vuelve improbable que este dato represente el valor promedio de la hora.

Para el análisis de la distribución del error, se ha realizado un diagrama de cajas del error absoluto en el cálculo del promedio diario mensual de la ETo (Figura 4.4), se observa la misma tendencia a la subestimación de la ETo que se observó en las secciones anteriores. En las tres primeras frecuencias de muestreo se obtuvo una distribución del error en un rango reducido ya que los cuartiles 0,25 y 0,75 están muy cerca, pero cuando la frecuencia de muestreo es de 60 minutos se observa (por el tamaño de la caja) una distribución más uniforme del error. Se observa además que la

magnitud de los errores máximo y mínimo es mayor a medida que la frecuencia de muestreo disminuye.

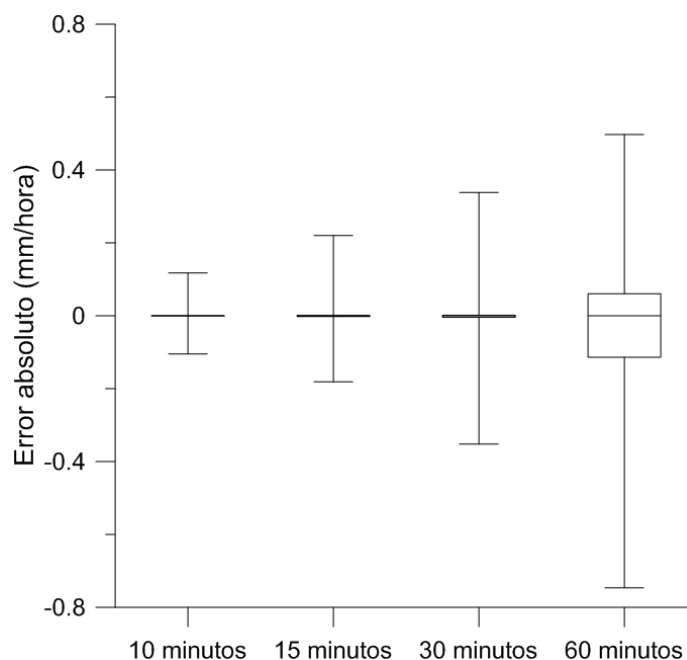


Figura 4.4. Diagrama de cajas de la distribución del error absoluto en el cálculo del promedio horario de la ETo. La caja encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la media, los extremos indican los valores máximo y mínimo.

4. Conclusiones

Al calcular el promedio diario mensual de la ETo con distintas frecuencias de muestreo, se observó que el error tiende a ser de subestimación y además crece a medida que el periodo de muestreo aumenta. El error relativo máximo de alrededor del 9% se produjo en febrero de 2011 al considerar el periodo máximo de 60 minutos, sin embargo el error relativo promedio fue menor al 2% para esta misma frecuencia.

Cuando se calculó el promedio diario de la ETo con las distintas frecuencias de muestreo, se observó de igual manera un error que tiende a subestimar la ETo y aumentar a medida que el periodo de muestreo crece. Aunque el periodo máximo de muestreo de 60 minutos reflejó un error relativo promedio de -1,66%, se obtuvo un valor de error relativo máximo de hasta el 50%, lo que indica una mayor incertidumbre que en el cálculo del promedio diario mensual. Esto se debe a la atenuación de los errores que se produce al promediar las variables meteorológicas en periodos de tiempo más amplios.



Aunque en el cálculo horario de la ETo para las tres primeras frecuencias de muestreo de 10, 15 y 30 minutos el error relativo medio resultó ser menor al 10%, se obtuvieron errores máximos mayores al 30 000% en todos los casos, lo que indica la gran incertidumbre que existe en el cálculo al muestrear las variables en periodos mayores a 5 minutos.

Se produjeron errores mayores al 100% en el 1%, 2%, 5% y 77% de los casos para las frecuencias de muestreo de 10, 15, 30 y 60 minutos respectivamente. Lo que demuestra de otra manera que un muestreo horario resulta totalmente inservible para realizar estimaciones horarias de la ETo.

En los tres casos analizados, el valor del APB resultó ser mayor al error relativo acumulado, lo que nos indica que si se reduce la frecuencia de muestreo de las variables meteorológicas y se requiere realizar un cierre del balance hidrológico se esperará un error de menor magnitud al cometido cuando estos datos se apliquen a planes de riego o meteorología.

Debido a los pequeños errores relativos observados en todas las frecuencias en los cálculos mensual y diario de la ETo se concluye que se puede realizar un muestreo de las variables cada 60 minutos sin introducir un error considerable en el cálculo diario y mensual de la ETo. Sin embargo esto no se recomienda para el cálculo horario de la ETo en el que se obtuvieron errores muy grandes al calcularla con datos procedentes de frecuencias mayores a 5 minutos.

La dependencia de la exactitud de los valores observados respecto a la frecuencia de muestreo es diferente para cada variable (Hupet and Vanclooster, 2001) y esto no ha sido considerado en este estudio. Se recomienda por lo tanto realizar un análisis del error en la medición de cada una de las variables al variar su frecuencia de muestreo, y el impacto que tiene cada una en la estimación de la ETo.

5. Referencias

Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D. and Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Vol. 56, Food&AgricultureOrg.

Hupet, F. and M. Vanclooster., 2001. Effect of the Sampling Frequency of Meteorological Variables on the Estimation of the Reference Evapotranspiration. Journal of Hydrology 243(3-4). 192 – 204.



Capítulo 5. Conclusiones

El objetivo de esta tesis fue evaluar el error en la estimación de la ETo cometido debido a distintas causas en un sitio en el que nunca se han realizado este tipo de estudios. En el segundo capítulo se calculó el error en el promedio diario y el promedio diario mensual de la ETo al calcularlo con promedios horarios, diarios y mensuales de las variables meteorológicas. En el tercer capítulo se realizó el cálculo suponiendo que no se disponen de observaciones de todas las variables meteorológicas, por lo que se analizó el impacto de estimarlas a partir de otras más simples e incorporando valores medidos de las variables meteorológicas uno a uno para observar la validez de estos métodos de estimación en el páramo. Finalmente en el cuarto capítulo se evaluó el impacto de variar la frecuencia de muestreo de las variables meteorológicas en la estimación de la ETo.

Al calcular el promedio diario mensual de la ETo el error relativo máximo que se observó fue mayor al 80% cuando se estimó la ETo a partir de datos de temperatura solamente, los siguientes fueron todos los cálculos en los que no se incluye datos de radiación solar que presentaron errores relativos máximos mayores al 60%. El error relativo promedio fue también el máximo, presentando valores mayores al 35%, en los cálculos en los cuales no se incluyen datos de radiación de onda corta. El otro error considerable fue el que resultó del cálculo con promedios mensuales de las variables meteorológicas que reflejó un error relativo máximo del 29,24% y un error relativo promedio de 13,68%.

Cuando se calculó el promedio diario de la ETo los errores relativos máximos que se obtuvieron fueron mayores; los más grandes fueron los obtenidos del cálculo de la ETo sin datos de radiación solar, todos mayores al 200%. El error promedio fue ampliamente mayor en los cálculos del Capítulo 3 que no consideraron la radiación solar, todos mayores al 20% a excepción del cálculo con la temperatura y la humedad relativa que reflejó un error promedio de 19,84%, en todos los otros casos el error relativo promedio fue menor al 5%.

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que lo más importante en la precisión de los cálculos de la ETo es contar con los datos completos de las variables meteorológicas. Por esto se recomienda medir todas las variables y en el caso de no poder adquirir un radiómetro neto se sugiere por lo menos contar con un piranómetro para medir la radiación solar ya que todas las estimaciones en las que no se consideraron datos de radiación resultaron en errores muy grandes con valores del APB mayores al 20% que califican estas estimaciones como pésimas. No se recomienda calcular la ETo con promedios mensuales de las variables meteorológicas ya que el error relativo promedio obtenido de este cálculo fue mayor al 13% mientras que al usar promedios diarios el error promedio fue menor al 2%. Al variar la frecuencia



de muestreo no se observó en promedio grandes errores (siempre menores al 2%) aunque se recomienda realizar el mismo estudio con un experimento en el que se programen los sensores para un periodo de muestreo de por lo menos un minuto debido a los resultados de investigaciones pasadas (Hupet and Vanclooster, 2001).

El único capítulo en el que se calculó el promedio horario de la ETo fue el cuarto. Para todas las frecuencias de muestreo se obtuvo errores relativos máximos que fueron desde el 30 000% para un periodo de muestreo de 10 minutos hasta más de 2 500 000% cuando se aumentó el mismo a 60 minutos. El error relativo promedio alcanzó su valor máximo con el periodo de muestreo de 60 minutos, -1168,07%; sin embargo se observaron valores menores al 10% en los otros casos. Estos errores se deben a que resulta muy difícil representar el promedio horario de las variables meteorológicas tomando muestras de manera discontinua. Debido a la magnitud de los errores máximos no se recomienda estimar la ETo para periodos horarios a menos que se cuente con un muestreo continuo de las variables meteorológicas cada 5 minutos.

Debido a la aleatoriedad de los errores que son en todos los casos de subestimación tanto como de sobrestimación, el valor del APB resulta mayor al error relativo acumulado que disminuye su valor debido a las compensaciones entre los errores positivos y negativos. Es por esto que se esperarían errores de distinta magnitud dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar a la ETo, en el caso del balance hidrológico el error sería menor debido a que este cálculo se realiza en periodos grandes de tiempo lo que hace que los errores negativos se compensen con los positivos por lo que el índice que se debe observar en estos casos es el error relativo acumulado; mientras que si la aplicación es en periodos de cálculo más cortos como es el caso de la meteorología o para planes de riego el error será mayor debido a que el indicador que se debe considerar en este caso es el APB. Es por esto que el diseño de la estación debería estar regido por los objetivos que persigue la investigación.

5.1 Investigaciones futuras

A partir de lo estudiado en esta tesis y los resultados obtenidos se recomienda realizar los siguientes estudios que complementen la presente investigación.

- Aplicar los resultados de la ETo en el balance hidrológico para determinar el impacto que tiene el error en el cálculo de la ETo en el cierre de dicho balance.
- Estimar cada una de las variables involucradas en el cálculo asumiendo que se tiene el valor medido de todas las otras, para de esta manera cuantificar el error que produciría por ejemplo el daño de un sensor.



- Comparar los resultados del método de P-M con otros métodos en los que no se incluyen todas las variables para determinar cuál es el mejor camino a seguir en caso de no contar con todos los datos meteorológicos.
- Determinar el coeficiente de sensibilidad para cada variable involucrada en el cálculo de la ETo.
- Programar los sensores para un periodo de muestreo de un minuto y realizar un análisis del impacto de la frecuencia de muestreo de las variables meteorológicas en el cálculo de la ETo debido a que en el estudio realizado por Hupet y Vanclooster (Hupet and Vanclooster, 2001) se observaron errores significativos con frecuencias de muestreo de 5 minutos.

5.2 Referencias

Hupet, F. and M. Vanclooster., 2001. Effect of the Sampling Frequency of Meteorological Variables on the Estimation of the Reference Evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 243(3-4). 192 – 204.