

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**CUANTIFICACIÓN DE LA EVAPOTRASNPIRACIÓN PARA EL  
PÁRAMO EN EL NORTE DE ECUADOR POR MEDIO DE MODELOS  
CLIMÁTICOS E INFORMACIÓN SATELITAL**

**CUANTIFICACIÓN DEL BALANCE DE ENERGÍA Y LA  
EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE PENMAN  
MONTEITH MEDIANTE DATOS DE LA TORRE DE EDDY  
COVARIANCE**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO INGENIERA AMBIENTAL**

**AUTOR: ANDDREA VERÓNICA YACELGA BELTRAN**

**DIRECTOR: XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS**

**DMQ, SEPTIEMBRE 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Andrea Verónica Yacelga Beltran declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**ANDREA VERÓNICA YACELGA BELTRAN**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Andrea Verónica Yacelga Beltrán, bajo mi supervisión.

---

**XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS**  
**DIRECTOR**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

---

**Ph.D. LENIN CAMPOZANO**  
**REVISOR1 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

---

**ING. LUIS RÍOS**  
**REVISOR2 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ANDREA VERÓNICA YACELGA BELTRAN

XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS

## DEDICATORIA

A mis padres

Sin ellos no hubiese podido lograr una meta más en mi vida profesional. Gracias por todo el apoyo incondicional y entusiasmo que siempre me han brindado en los momentos difíciles en el recorrido de mi vida universitaria. Gracias por compartir sus conocimientos, consejos, experiencias y su amor. Gracias por ser ese pilar fundamental en mi vida.

A mi hermano

Agradecerle por el apoyo moral, la fortaleza en los momentos difíciles y el deseo de superación que fomento en mí.

A mis compañeros

Agradecerles por sus buenas vibras y el excelente trabajo en equipo que se ha realizado cada año de la carrera, además por su apoyo incondicional en los momentos difíciles. Este agradecimiento va dedicado especialmente a mis compañeras Jeomara C, Karen R y Gloria LL.

A mis profesores

Gracias su paciencia, compromiso y enseñanza, pues han contribuido en el conocimiento que tengo hoy en día y por guiarme en ser una mejor persona y profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por la sabiduría y entendimiento que ha permitido que siga cumpliendo mis metas. Además, por permitir que siga compartiendo con mis seres queridos.

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, por haberme abierto las puertas de su prestigiosa institución.

Agradezco al Ing. Xavier Zapata Ríos por su paciencia y haber sido aquella persona que con sus directrices y conocimientos permitió que este trabajo de investigación culmine.

Agradezco al proyecto PIMI-17-04 que financió la instalación de la torre Eddy Covariance en la zona de Conservación Hídrica Antisana para la medición de los flujos de energía, carbono y agua.

# INDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
INDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1 INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 Objetivo general.....	4
1.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Alcance .....	5
1.4 Marco teórico .....	5
1.4.1 Páramo .....	5
1.4.2 Balance energético superficie terrestre .....	5
1.4.3 Transferencia de calor.....	7
1.4.4 Radiación.....	7
1.4.5 Conducción.....	7
1.4.6 Evapotranspiración.....	7
1.4.7 Evaporación.....	7
1.4.8 Transpiración.....	7
1.4.9 Parámetros meteorológicos que determinan la ET.....	8
1.4.1 Parámetros atmosféricos que determinan la ET.....	8
1.4.2 Presión atmosférica (P).....	8
1.4.3 Calor latente de vaporización ( $\lambda$ ) .....	8
1.4.4 Coeficiente de Cultivo.....	8
1.4.5 Sistema de Eddy Covariance .....	8
2 METODOLOGÍA.....	9
2.1 Modelo de evapotranspiración.....	9
2.2 Modelo de evapotranspiración PM a nivel diario.....	9
2.3 Ecuación del Balance energético .....	10
2.4 Unidad de investigación climática .....	10
2.5 Área de estudio .....	10
2.6 Partes de la Torre Eddy Covariance .....	11
2.7 Procesamiento de datos .....	11
3 RESULTADOS.....	12
3.1 Análisis de datos diarios .....	12
3.2 Análisis de datos mensuales .....	14
3.3 Análisis de datos anuales .....	16

3.4	Interpretación de datos mediante el Coeficiente de Correlación $R^2$ .....	17
4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	19
5	CONCLUSIONES.....	20
6	RECOMENDACIONES.....	21
7	REFERENCIA BLIOGRÁFICAS.....	22
8	ANEXOS.....	24
8.1	ANEXO I. Torre Eddy Covariance.....	24
8.2	ANEXO II. Visita a la Torre Eddy Covariance.....	25
8.3	ANEXO II. Páramo del Antisana.....	26

## RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se presenta la evapotranspiración real (ET real) la cual fue medida por la Torre Eddy Covariance (FTEC), y aquella que proporciona los datos meteorológicos para calcular la evapotranspiración por diferentes metodologías micrometeorológicas. La torre FTEC se caracteriza por sus altos costos en sus sensores y la implementación en un lugar seguro para que registre datos continuos cada 30 minutos en el período que se desee realizar dicha investigación. La ET real FTEC fue comparada con la ET potencial calculada por el método de Penman Montith (PM) por medio de una correlación donde se obtuvo que a escala diaria el factor de correlación ( $R^2$ ) fue de 0,6327, Por otro lado la ET potencial PM fue comparada con el modelo de CRU y se obtuvo un  $R^2$  de 0,029 lo que indica que los valores no coinciden, Además se tuvo que la ET real FTEC para el 2021 fue de 513,86 mm lo que representa un 54% de la precipitación con un valor de 951,40 mm, mientras que la ET potencial PM fue de 715,68 mm. Por otro lado, se calculó el Coeficiente de Cultivo ( $K_c$ ) con un valor de 0,72. Por otra parte se realizó el cierre del balance energético y se obtuvo un  $R^2$  de 0.899 lo que indica que las variables son de buena calidad.

**Palabras clave:** evapotranspiración, coeficiente de cultivo, precipitación, Eddy Covariance y Penman Montith.

## ABSTRACT

In the present research project, the real evapotranspiration (real ET) is presented, which was measured by the Eddy Covariance Tower (FTEC), and the one that provides the meteorological data to calculate the evapotranspiration by different micrometeorological methodologies. The FTEC tower is characterized by its high costs in its sensors and the implementation in a safe place to record continuous data every 30 minutes in the period that the investigation is desired. The real ET FTEC was compared with the potential ET calculated by the Penman Monteith (PM) method by means of an alarm where it was obtained that on a daily scale the connection factor ( $R^2$ ) was 0,6327, On the other hand, the potential ET PM was compared with the CRU model and an  $R^2$  of 0,029 was obtained, which indicates that the values do not coincide. In addition, the real ET FTEC for 2021 was 513,86 mm, which represents 54% of the precipitation with a value of 951.40 mm, while the potential ET PM was 715,68 mm. Finally, the Culture Coefficient ( $K_c$ ) was calculated with a value of 0,72. On the other hand, the closure of the energy balance was carried out and an  $R^2$  of 0.899 was obtained, which indicates that the variables are of good quality.

**Keywords:** evapotranspiration, crop coefficient, precipitation, Eddy Covariance and Penman Monteith

# 1 INTRODUCCIÓN

La atmósfera es un sistema abierto que se caracteriza por la transferencia de materia y energía con la superficie terrestre. El sol es la principal fuente de energía que recibe la atmósfera. El mantenimiento del equilibrio entre la absorción de la radiación solar y la emisión de radiación infrarroja emite al espacio la misma energía que recibe del sol. Esto se conoce como balance de energía y es importante porque de ella dependen todos los procesos físicos que permiten la vida en la Tierra, así como todas las variables climáticas (Universidad de Murcia, 2000).

La evapotranspiración (ET) es fundamental en el ciclo hidrológico pues permite realizar el proceso de la transferencia del agua hacia la atmósfera. Esta transferencia lo realiza por la transpiración de las plantas y la evaporación desde el suelo (Monterroso & Gómez, 2021). Su conocimiento es de suma importancia ya que permite determinar las necesidades de agua de un cultivo o de una región, una adecuada planificación y el manejo de los recursos hídricos. (Jaramillo, 2006). Además, es importante para estudios hidrológicos, biometereológicos y ecohidrológicos (Contreras, 2015). La evapotranspiración es un parámetro climático, por lo que es muy común el cálculo a partir de datos que se han obtenido por estaciones meteorológicas. Existen varios métodos para estimar la ET, sin embargo, no son del todo fiables (Allen et al, 2006). “El método de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación” (FAO) PM, en la actualidad se recomienda como método estandarizado único, para la estimación de la Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) o ET potencial (Allen et al, 2006). Este método se utiliza tanto para zonas tropicales templadas y áridas (Ortiz & Chile, 2020). Sin embargo, la ET ha sido poca estudiada en el ecosistema del Páramo (Contreras, 2015).

Ecuador posee varios ecosistemas uno de estos son los páramos. Estos son ecosistemas tienen una altura promedio de 3300 m.s.n.m que proveen servicios ecosistemas como: fuente natural de agua, sumideros de carbono, conservación de la biodiversidad entre otros (Morocho & Chuncho, 2019). Debido a que sus suelos son altamente porosos permiten la retención de agua. Se tiene que factores físicos como: la radiación solar y calor influyen en los ecosistemas de montaña por el cual el estudio de los parámetros de balance de energía como la radiación neta (R<sub>n</sub>) y flujo de calor en el suelo (G) son de mucha importancia ya que de éstos depende las fotosíntesis, la temperatura de ambiente y suelo, circulación de aire y agua es sus distintos estados, fijación de carbono en el suelo, la ET entre otros (Zúñiga, 2015).

Uno de los procesos que menos se ha estudiado en el ecosistema del páramo es el flujo de energía. En el sur del Ecuador se realizó un estudio sobre influencia de la  $R_n$  y el  $G$  del páramo Andino. Para el estudio se utilizó cinco modelos para la  $R_n$  y 2 ecuaciones para el cálculo en dos escalas temporales (diaria y horaria) y se evaluó la implicación en el cálculo de la  $ETo$  mediante la ecuación combinada de PM (FAO 56). El resultado obtenido fue que el modelo de la FAO 56 mostró el mejor comportamiento para el cálculo de la  $R_n$ ,  $G$  y  $ETo$ . Para la  $R_n$  la subestimación a escala diaria y horaria fue 13.6% y 4.8% respectivamente por el modelo de FAO 56. Para el flujo de calor se sobrestima un 16% a escala diaria durante las 24h y un 5.3% de sobreestimación tomado en cuenta la hora de sol. Para la  $ETo$  se tiene una subestimación a nivel diario y horario de 13.6 % y 10.2% respectivamente a partir de los valores calculados de  $R_n$  y  $G$  (Zúñiga, 2015). A pesar de que se han realizados estudios al sur de Ecuador estos resultados no son extrapolables para el norte del país en el páramo del Antisana (Ribadeneira, 2020).

En la parte norte del Ecuador no se han realizado estudios sobre el balance de energía, balance hidrológico, ya que no se contaba con la instrumentación adecuada. Para ello se instaló a finales del 2019 la Torre Eddy Covariance en los páramos del área de conservación hídrica Antisana (ACH-A) financiada por la Escuela Politécnica Nacional. Este sistema permite la medición de flujos turbulentos y conocer las dinámicas de energía carbono y agua desde en diferentes escalas temporales (Ribadeneira, 2020).

## **1.1 Objetivo general**

Cerrar el balance de energía y cuantificar la evapotranspiración por el método de Penman Montieth con los datos de la Torre Eddy Covariance.

## **1.2 Objetivos específicos.**

1. Cuantificar cada uno de los componentes del balance de energía.
2. Cerrar el balance de energía.
3. Calcular evapotranspiración potencial con el método de PM.
4. Calcular el Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ).
5. Comparar evapotranspiración calculada por Penman Montieth con la evapotranspiración real medida por la Torre FTEC y el modelo de CRU.

## **1.3 Alcance**

Realizar un análisis fundamental sobre la cuantificación del balance de energía y un análisis comparativo de la evapotranspiración calculada por el método de Penman Montith con la evapotranspiración real medida por la torre Eddy Covariance y el modelo de CRU en diferentes escalas temporales. Además, determinar el coeficiente de cultivo (Kc).

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Páramo**

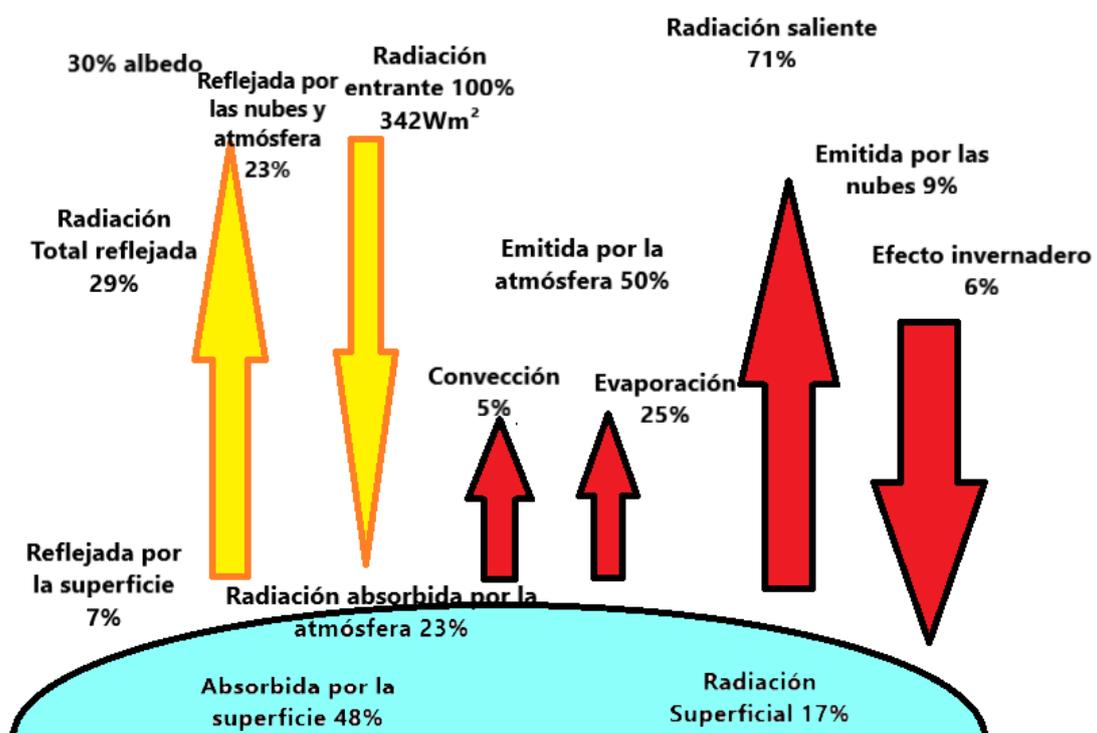
El páramo es un ecosistema único de alta montaña que tiene praderas húmedas entremezcladas con Matorrales y parches de bosque de pequeña estatura, espacio de producción y un estado del clima. El páramo encuentra límite superior 4500-5000 m.s.n.m (superpáramos) en las nieves perpetuas donde la vegetación no existe. y el límite inferior 3000 a 3500 ms.n.m (subpáramo o franja altoandina) (Morocho & Chuncho, 2019). La sierra está ubicada lo largo del callejón interandino que representa el 34% del territorio ecuatoriano. En esta zona montañosa se encuentra uno de los principales ecosistemas que es el páramo (Contreras, 2015).

El ecosistema del páramo en el Ecuador tiene una altura promedio de 3300 m.s.n.m, el cual representa el 7% de su superficie y provee múltiples servicios ecosistémicos (Morocho & Chuncho, 2019). La precipitación es cambiante y depende en la zona que se encuentre, los valores van desde 1000 mm hasta 4000 mm. Su clima húmedo y frío. El páramo presenta características hidrológicas muy particulares. En esta zona se tiene bajas tasas de ET debido al clima y a la falta de una estación seca lo que provoca que los suelos tengan mayor cantidad de materia orgánica debido a la gran capacidad de retención de agua. Además, esto ocasiona que cuencas pequeñas puedan superar la mitad del total de la evapotranspiración (Contreras, 2015).

### **1.4.2 Balance energético superficie terrestre**

El sol es la principal fuente de energía que recibe la atmósfera. De cual dependen todos los procesos físicos que permiten que se realice la vida en el planeta Tierra y todas las variables climáticas. Esta energía pasa por una serie de procesos y transformaciones en el interior del sistema climático, que se representa mediante un modelo de balance de energía. La energía entrante debe ser la misma a la energía que saliente de la superficie en el mismo período de tiempo (Allen et al, 2006).

En la **Figura 1**, se puede observar los diferentes flujos que dan lugar al balance energético. En la parte izquierda del gráfico se representa la radiación solar que entra. Se considera que la cantidad de energía entrante que llega a la tierra es de  $340 \text{ W/m}^2$  que equivale a 100 unidades, donde parte de la radiación solar que llega a la tierra es reflejada inmediatamente por las nubes y aerosoles esto representa aproximadamente el 23 %, y otra parte reflejada por el suelo representa aproximadamente el 7%. Entre ellas se tiene una suma aproximada del 29% de la radiación incidente. Lo que pertenece al 0.3 de albedo. Entonces una parte es absorbida por la atmósfera (~23 %). Se obtiene que la energía absorbida por la superficie es de alrededor del 48%. Por otro lado, debido a que la superficie está a mayor temperatura se calienta el aire que está en contacto con la superficie. El aire al hacerse menos denso asciende en una columna térmica y transporta calor desde la superficie. El 17% de la energía solar incidente se reemite como energía infrarroja radiada por átomos y moléculas que constituyen la superficie. Del 17% radiación infrarroja emitida por la superficie el 6% es absorbida por la atmósfera (efecto invernadero) y el 11% pasa libremente por la atmósfera. La atmósfera emite alrededor del 50% de la energía solar incidente ya que se toma en cuenta el 23% de la energía absorbida por la atmósfera el 5% por convección y el 25% por evaporación. Finalmente, la radiación saliente es del 71% (Universidad de Vigo, 2019).



**Figura 1.** Balance energético.

**Fuente:** Elaboración propia.

### **1.4.3 Transferencia de calor**

Es un fenómeno unidireccional orientado desde los cuerpos con mayor temperatura a los que tienen menor temperatura. Este proceso de propagación se puede transmitir de tres formas: Radiación, conducción y convección. Sin embargo, solo se mencionará la radiación y conducción.

#### **1.4.4 Radiación**

Es la energía calorífica que se transfiere en forma de onda electromagnética, emitida por todos los cuerpos debido a que se encuentran a una temperatura y está se transfiere a la velocidad de la luz pues es la luz de distintas longitudes de ondas. Además, podría ser absorbida por los cuerpos aumentando su temperatura. En el vacío, la radiación es el único medio de la transmisión del calor y puede ser muy importante cuanto se tiene altas temperaturas (Martín, 2018).

#### **1.4.5 Conducción**

La transferencia de calor por conducción se produce de una región con mayor T a una región con menor T. Se trata de una transferencia como resultado de una diferencia de temperaturas. En un cuerpo sólido la conducción de calor va desde la superficie hasta la profundidad del suelo.

La ley de Fourier nombra: La conducción de calor se produce cuando en las diferentes partes de un cuerpo a distinta temperatura, la agitación térmica se transmite de molécula a molécula hasta la unificación de aquella (Zúñiga, 2015).

#### **1.4.6 Evapotranspiración**

La ET es la unión de dos procesos separados, por evaporación cuando se pierde el agua, a través de la superficie del suelo y por la transpiración de las plantas (Allen et al, 2006).

#### **1.4.7 Evaporación**

Es el proceso donde el agua en estado líquido cambia a vapor de agua. Para realizar este cambio de las moléculas de líquido a vapor se requiere energía, esta energía se puede obtener de varias maneras, por ejemplo: T ambiente del aire, directamente de la radiación solar, etc. Por otro lado, los parámetros climatológicos a diagnosticar en el proceso de evaporación son la velocidad del viento, humedad atmosférica, la radiación y la T de aire. (Allen et al, 2006).

#### **1.4.8 Transpiración**

Es el proceso donde el agua líquida contenida en los tejidos de la planta se vaporiza hacia la atmósfera. Se tiene que la transpiración depende de cuanta energía reciba, la velocidad del viento y del gradiente de P de vapor, además se considera las siguientes variables para

su determinación como: la T aire, radiación, el viento y la humedad atmosférica (Allen et al, 2006).

#### **1.4.9 Parámetros meteorológicos que determinan la ET**

Los parámetros meteorológicos que determinan la evapotranspiración son: velocidad del viento, radiación solar, temperatura y humedad del aire.

#### **1.4.1 Parámetros atmosféricos que determinan la ET**

Los parámetros atmosféricos que establecen la ET son: Presión atmosférico (P), constante Psicrométrica ( $\gamma$ ) y Calor latente de vaporización ( $\lambda$ ).

#### **1.4.2 Presión atmosférica (P)**

Es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. Debido a la baja P se da la evaporación en altitudes elevadas el cual se expresa con la constante psicométrica. Por otro lado, se tiene que el efecto es pequeño, por lo que es suficiente un valor medio para un asentamiento (Allen et al, 2006).

#### **1.4.3 Calor latente de vaporización ( $\lambda$ )**

Expresa la energía que se necesita para el cambio de una masa de unidad de agua líquida a vapor de H<sub>2</sub>O bajo valores constantes de T y presión. Por otro lado, se tiene que sí la temperatura es elevada menor energía se necesita, es decir que el valor de  $\lambda$  varía en función de la T, y  $\lambda$  se considera con un valor constante de 2,45 MJ kg<sup>-1</sup>, debido a que  $\lambda$  varía muy poco dentro de los rangos de la T (Allen et al, 2006).

#### **1.4.4 Coeficiente de Cultivo**

La ET de cultivo puede ser calculada mediante el coeficiente de cultivo (Kc), el cual se obtiene mediante la relación entre la ET de cultivo en condiciones óptimas y la ET de referencia. Los factores que determinan el Kc son: clima, evaporación del suelo, estado de crecimiento y desarrollo y el tipo de cultivo (Allen et al, 2006).

#### **1.4.5 Sistema de Eddy Covariance**

El método de Eddy Covariance (EC) es una técnica micrometeorológica que realiza las mediciones de gases, transferencia de energía, vapor de agua, y tasas de emisión a alta velocidad. Los flujos entre la superficie y la atmósfera pueden caracterizarse a partir de mediciones individuales realizadas mediante una estación de EC in situ (LI-COR, 2015).

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Modelo de evapotranspiración

El método de Penman-Monteith, es el método que se recomienda a nivel mundial, para calcular la ET a partir de datos meteorológicos (Allen, et al., 2006).

### 2.2 Modelo de evapotranspiración PM a nivel diario

Para el cálculo de la  $ET_0$  a nivel diario se deberán utilizar los promedios diarios de los siguientes parámetros: temperatura del aire y velocidad del viento.

$$ET_0 = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right)} \right)$$

$ET_0$ : ET de referencia [mm día<sup>-1</sup>]

$R_n$ : Radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]

$\Delta$ : gradiente de presión de vapor [kPa °C<sup>-1</sup>]

$G$ : Flujo de calor de suelo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]

$C_p$ : calor específico aire húmedo

$e_a$ : presión de vapor de saturación [kPa]

$r_a$ : resistencia superficial aerodinámica

$e_s$ : presión real de vapor [kPa]

$\rho_a$ : densidad de aire húmedo

$r_s$ : resistencia total [s m<sup>-1</sup>]

$\gamma$ : constante psicrométrica [kPa °C<sup>-1</sup>]

$\lambda$ : calor latente de vaporización [MJ kg<sup>-1</sup>]

Los valores de,  $R_n$ ,  $\Delta$ ,  $G$ ,  $\gamma$ ,  $e_s$  y  $e_a$  se calcularon usando las ecuaciones dadas por Allen et al (2006).

## 2.3 Ecuación del Balance energético

$$R_n + \lambda E + H + G = 0$$

$R_n$ : Radiación neta de la superficie de cultivo

H: Calor sensible

G: Flujo de calor en el suelo

$\lambda$ : Calor latente de evaporación

$\lambda E$ : Flujo de calor latente empleado en evaporar el agua.

## 2.4 Unidad de investigación climática

Unidad de investigación Climática (CRU) es una de las instituciones que se preocupa por el cambio climático de forma natural y antropogénico. CRU brinda datos que se utilizan para realizar investigaciones climáticas, paquetes de software estadístico y modelo climáticos. Los datos globales se presentan en una cuadrícula 0.5\*0.5 grados, basado en análisis de más de 4000 estaciones meteorológicas individuales de alta resolución (University of East Anglia, 2022).

## 2.5 Área de estudio

La Torre Eddy Covariance se encuentra en la reserva hídrica del Antisana (ACH-A) cuyas coordenadas son 0°28'41" N y 78°13'0" a 4254 m.s.n.m. está reserva tiene una extensión de 8487.03 ha ubicada entre las provincias de Pichincha y Napo, donde el 77.09% del área se encuentra en Napo y el 22.91% en Pichincha. Cubre un rango altitudinal que va desde los 3720 hasta los 1760 msnm. Dentro del ACH-A se encuentran tres microcuencas que son: Antisana, Guaspaly, Jatunhuayco. Las microcuencas del río Antisana y Jatunhuayco con el 80.22% y con 19.78% por Guaspal conforman la mayor parte del área (EPMAPS, 2018).

Se tiene que la zona del Antisana tiene un clima de tipo Ecuatorial de Alta montaña esto se debe a su ubicación geográfica, relieve y morfología además cuenta con una variedad de microclimas y una distribución espacial que varía. La temperatura mensual se estimó de 5.7°C, la temperatura diaria representa variaciones entre 18°C y 5.5°C., lo que permite que el agua no se congele (EPMAPS, 2018).

## 2.6 Partes de la Torre Eddy Covariance

Tabla 1. Partes de la torre Eddy Covariance.

Equipo	Variable	Unidad
Anemómetro 3 direcciones	Viento en los tres ejes XYZ	m/s
Analizador de gases	Concentración de CO <sub>2</sub> y Vapor H <sub>2</sub> O	ppm
Radiómetro neto 4 componentes	Radiación entrante	Wm <sup>-2</sup> /min
Placas de flujo de calor	Flujo del calor del suelo	Wm <sup>-2</sup> /min
Piranómetro a 2m altura	Radiación solar Total	Wm <sup>-2</sup> / 5min
Datalogger	Procesamiento de los datos cada 30min	-
3 paneles solares	Generar energía a la TEC	-

Fuente: Elaboración Propia.

## 2.7 Procesamiento de datos

### *Evapotranspiración*

Para el cálculo de la ET potencial se usó el método de Penman Montitha escala diaria, donde se trabajó con los datos proporcionados por la Torre Eddy Covariance como: temperatura promedio [C°], radiación neta [W/m<sup>2</sup>], presión atmosférica [KPa] déficit de vapor aire [HPa] y velocidad del viento [m/s]. Con la ayuda de la herramienta de Excel se procedió a realizar los promedios de cada una de las variables, pues la torre trabaja con datos cada 30 minutos. Se realizó el cambio de unidades de la radiación neta [MJ/ m<sup>2</sup> d]. Finalmente se calculó cada una de las variables o coeficientes que se necesitan para el cálculo de la evapotranspiración en [mm/día]. Esto se lo elaboró para el período de noviembre del 2020 hasta enero 2022. Por otra parte, se realizó la serie de tiempo de la evapotranspiración a escala diaria y mensual para su respectivo análisis y la comparación con los datos de la ET real proporcionados de la Torres Eddy Covariance.

### *Coefficiente de cultivo (Kc)*

Para el cálculo del Kc se realizó la relación de los valores de ET medida por la Torre Eddy Covariance y la ET potencial calculada con el método de Penman Montith, para el período de noviembre de 2020 a enero del 2022 y un Kc anual para el año 2021.

### *Comparación de la evapotranspiración calculada por el modelo CRU y el método de Penman Montith*

Para el cálculo de la ET potencial por PM a escala mensual se realizó la suma el 16 de cada mes, es decir se inició la suma desde 16 de octubre hasta el 15 de noviembre, lo que da como resultado la evapotranspiración potencial para el mes de noviembre. Estos valores se los tomaron de aquella manera pues los datos que el modelo de CRU proporciona son el 16 de cada mes, esto para el período de noviembre 2020 hasta enero 2022. Los datos de evapotranspiración fueron descargados del siguiente link: [https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru\\_ts\\_4.06/cruts.2205201912.v4.06/pet/](https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.06/cruts.2205201912.v4.06/pet/), estos datos fueron procesados en la herramienta de ArcGIS.

### *Balance de energía*

Para el cálculo del balance de la energía se obtuvo los datos de la radiación neta (Rn), flujo de calor en el suelo (G), calor latente (LE) y calor sensible (H) de la Torre Eddy Covariance. Estos datos se procesaron con la ayuda de la herramienta Excel, donde se usó el condicional para filtrar los valores positivos de cada una de las variables y tomar los de mejor calidad determinados por el software EasyFlux. Luego se realizó la diferencia de la (Rn – G) y la suma del (LE+H) y se graficó respectivamente para el eje x y el eje y. Para el período de 1 de noviembre del 2020 hasta 31 enero del 2022.

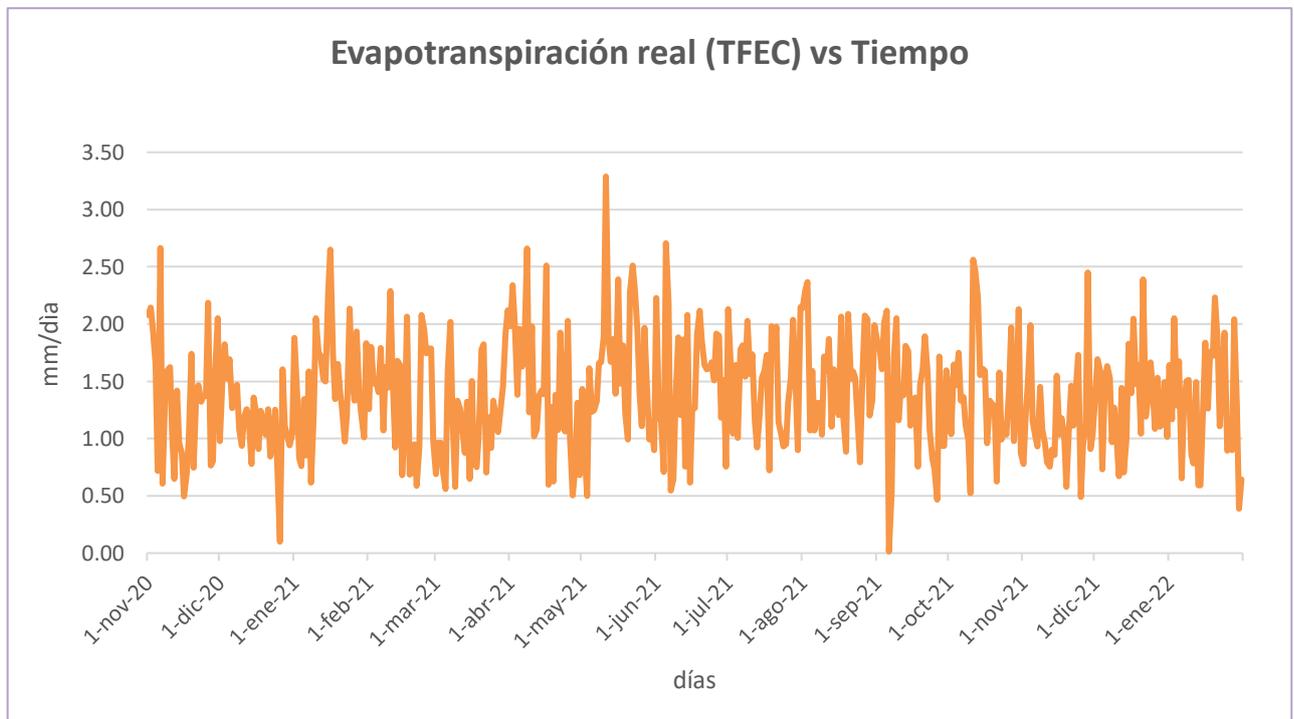
## **3 RESULTADOS**

### **3.1 Análisis de datos diarios**

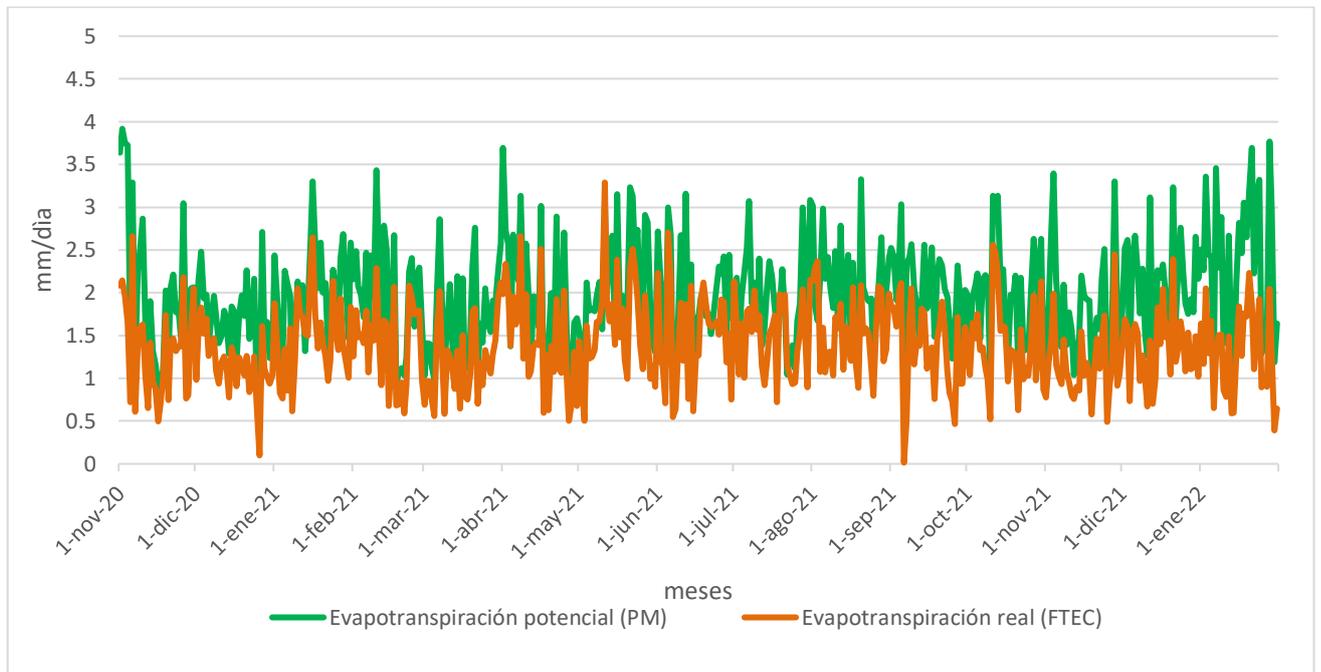
En las **Figuras 2 y 3**, se puede observar la serie de tiempo a escala diaria de la evapotranspiración potencial calculada por el método de Penman Montith ET (PM) y la evapotranspiración real medida por torre Eddy Covariance FTEC para el período de noviembre 2020 hasta enero de 2022. En el **Figura 2**, se tiene para la evapotranspiración potencial mínima de 0,67 mm/día 26 diciembre 2020, una evapotranspiración potencial máxima de 3,92 mm el 2 de noviembre 2020 y una evapotranspiración promedio de 1.97 mm/día. En cuanto a la evapotranspiración real de la torre FTEC representada en la **Figura 3**, se tiene una evapotranspiración máxima de 3,29 mm/día el 11 mayo 2021, una evapotranspiración mínima de 0,01 mm/día el 6 de septiembre 2021 y la evapotranspiración media de 1.38 mm/día



**Figura 2.** Evapotranspiración Potencial vs Tiempo.



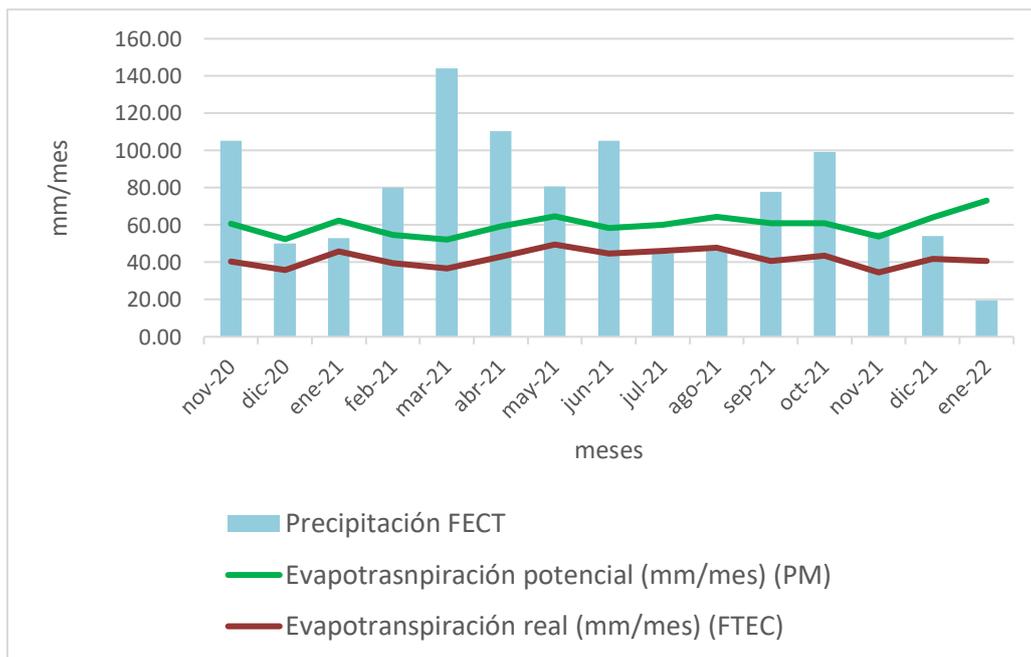
**Figura 3.** Evapotranspiración real FTEC vs Tiempo.



**Figura 4.** Evapotranspiración Potencial (PM) vs Evapotranspiración real (FTEC).

En la **Figura 4**, se observa la relación de la ET calculada por el método de PM y la ET real medida por torre FTEC para el período de noviembre 2020 hasta enero de 2022, se tiene que la evapotranspiración potencial está representada con el color verde y la evapotranspiración real representada con el color naranja donde se puede observar una variabilidad similar para dicho período.

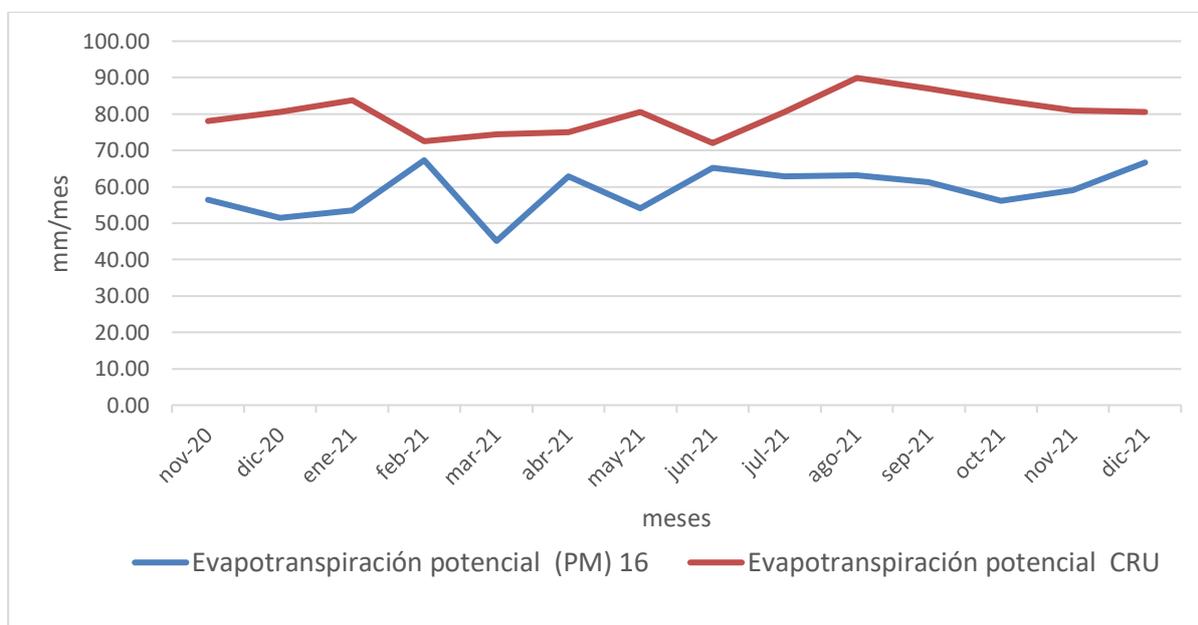
### 3.2 Análisis de datos mensuales



**Figura 5.** Evapotranspiración potencial vs Evapotranspiración real (FTEC).

En la **Figura 5**, se puede observar la relación de la ET (PM) representada por la línea de color verde y la ET real de la torre FTEC representada por el color rojo, a escala mensual para el período noviembre 2020 a enero 2022. Los valores máximos y mínimos de la evapotranspiración potencial son 73.09 mm/ mes en enero y 52.19 mm/mes en marzo respectivamente y una ET promedio de 60,13 mm/día. Por otra parte, los valores máximos y mínimos de la ET real de FTEC son: 49.51 mm/mes en mayo y 34,53 mm/mes en noviembre respectivamente y una ET promedio de 42.05 mm/mes, mientras que los valores máximo y mínimo de la precipitación son 144.20 mm/mes en marzo y 19.50 mm/día en enero y una precipitación de 75.07 mm. Además, se observa una variación similar entre la ET (PM) y ET real FTEC.

**Comparación de ET calculada por el método de Penman Montieith y el modelo de CRU.**



**Figura 6.** Evapotranspiración Potencial (PM) vs Evapotranspiración potencial (CRU).

En la **Figura 6**, se puede observar la relación de la ET potencial calculada con el PM y la ET potencial calculada con el modelo de CRU a escala mensual para el período noviembre 2020 a diciembre 2021. Por otro lado, se tiene la ET potencial (PM) con los valores máximos y mínimos de 67.28 mm/mes y 45.10 mm/mes respectivamente, mientras que para la ET potencial con CRU con valores de 89.90 mm/mes y 72 mm/mes respectivamente. Por otra parte, se tiene que la ET potencial (PM) representada por el color celeste no tiene una variación similar a la ET potencial (CRU) representada por el color rojo.

**Tabla 2.** Evapotranspiración y coeficiente de cultivo (nov 2020-en 2022).

Fecha	Evapotranspiración potencial (mm/mes) (PM)	Evapotranspiración real (mm/mes) (FTEC)	Coeficiente de cultivo (Kc)
nov-20	60,79	40,36	0,66
dic-20	52,37	35,86	0,68
ene-21	62,30	45,92	0,74
feb-21	54,56	39,58	0,73
mar-21	52,19	36,65	0,70
abr-21	59,14	43,06	0,73
may-21	64,58	49,51	0,77
jun-21	58,25	44,81	0,77
jul-21	60,14	46,00	0,76
ago-21	64,39	47,75	0,74
sep-21	60,93	40,60	0,67
oct-21	61,05	43,53	0,71
nov-21	53,93	34,53	0,64
dic-21	64,21	41,92	0,65
ene-22	73,09	40,71	0,56

En la **Tabla 2**, se observa el (Kc) de cada mes, en el período de noviembre 2020 hasta enero de 2022. El Kc varía de 0,64 a 0,77.

### 3.3 Análisis de datos anuales

**Tabla 3.** Resultados de la evapotranspiración para el año 2022.

Año	ET Real (mm/año) (TFEC)	ET potencial (mm/año) (PM)	Precipitación (mm)	Coeficiente de Cultivo
2021	513,86	715,68	951.40	0,72

En la **Tabla 3**, se observa el Kc para el año de 2021. El Kc es igual a 0,72. Además se observa que para el año 2021 la ET (PM) anual tiene de 715,68 mm/año y ET (CRU) de 961 mm/año. Por otra parte, se tiene que para la torre FTEC la precipitación anual de 951,40mm y la ET real 513,86 mm/año lo que representa un 54% de la precipitación, lo que significa que es el porcentaje que retorna hacia la atmósfera.

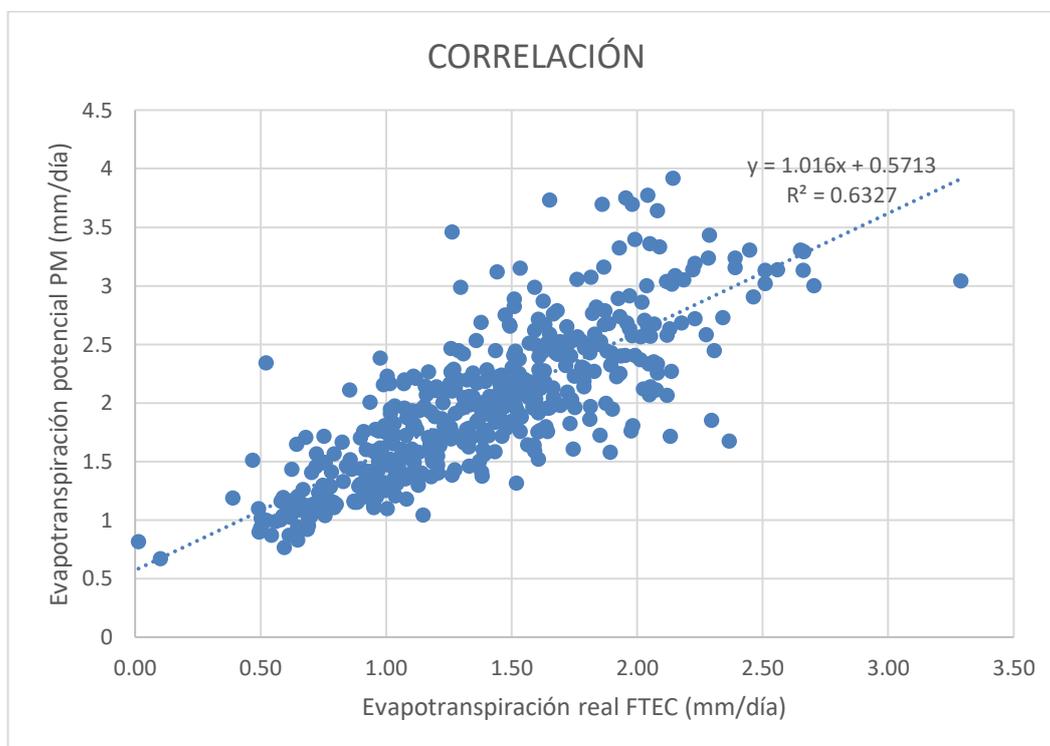
**Tabla 4.** Resultados de evapotranspiración del modelo de PM y CRU.

Año	ET (mm/año) (PM)	ET (mm/año) (CRU)
2021	717,17	961.00
Error Porcentual %	.	34

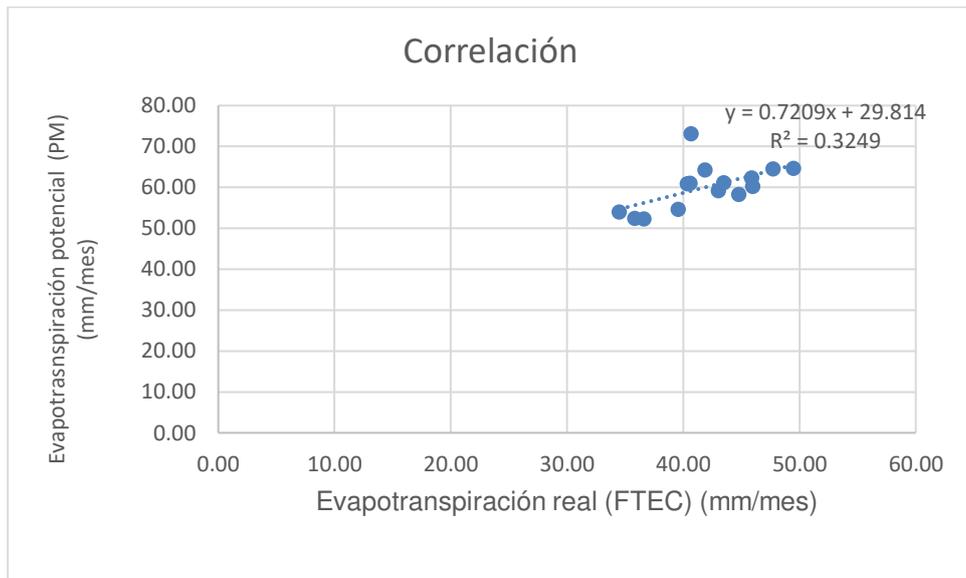
En la **Tabla 4**, se observa los valores de la ET (PM) de 717,17 mm /año y una ET (CRU) de 961 mm/año. Además, se tiene que ET (CRU) representa un error porcentual del 34% con los datos de ET calculados por el método PM.

### 3.4 Interpretación de datos mediante el Coeficiente de Correlación R<sup>2</sup>

En la **Figura 7**, se observa el gráfico de dispersión en el cual se relaciona los datos diarios de la ET real FTEC y la ET potencial calculada con PM y se obtuvo un factor de correlación de 0.63. En la **Figura 8**, se tiene la misma relación con los datos mensuales en el cual se obtiene un factor de correlación de 0.32, es decir los valores tiene una similitud a escala diaria y mensual.

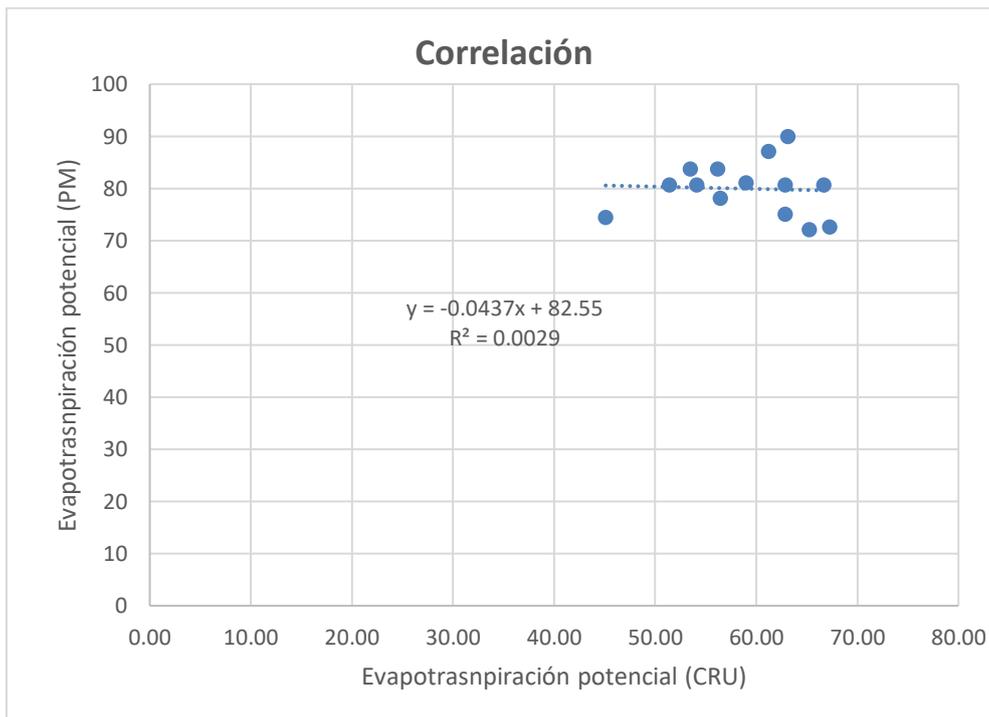


**Figura 7.** Correlación de la ET real FTEC vs ET potencial PM a escala diaria.



**Figura 8.** Correlación de la ET real FTEC vs ET potencial PM escala mensual.

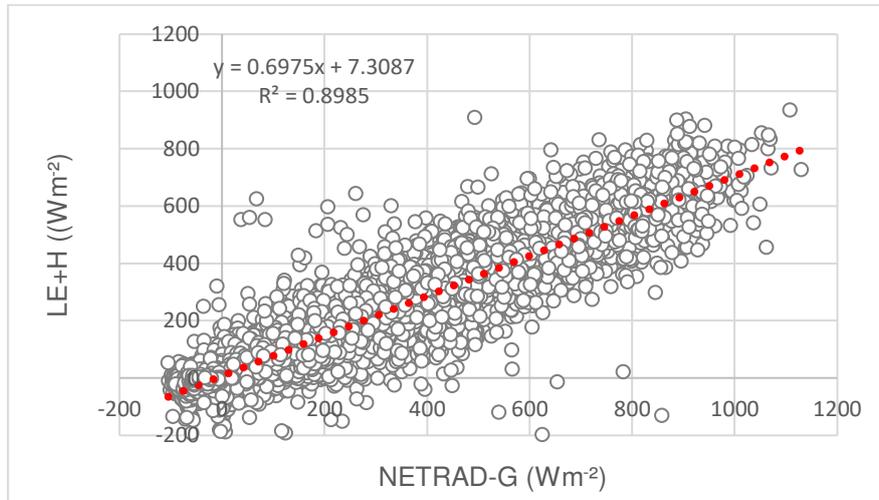
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9.** Correlación de la Evapotranspiración potencial con el MP vs evapotranspiración potencial CRU.

En la **Figura 9**, se puede observar un gráfico de dispersión entre la evapotranspiración potencial con el PM vs evapotranspiración potencial CRU, en el que se obtuvo un factor de correlación de 0,00299, lo cual tiende a cero, es decir el valor se interpreta como una correlación nula. Por lo tanto, los valores de PM y CRU no coinciden en su variabilidad a nivel mensual.

## Balance de Energía



**Figura 10.** Cierre del Balance de energía.

En la **Figura 10**, se observa el balance de energía para el periodo del 1 de noviembre de 2020 a 19 de febrero del 2022, En el eje de las x se tiene diferencia de la radiación neta (NETRAD) y el flujo de calor (G) y en el eje y se tiene la suma del calor sensible (LE) y el calor latente (H). Además, se observa el gráfico de dispersión en donde el  $R^2$  es de 0,899 lo que indica que es aceptable además que las variables son de buena calidad. Esto se lo relaciona con la cantidad de energía que llega a la Tierra y es aprovechada en términos del balance de energía de superficie.

## 4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El correcto cálculo de la ET de referencia constituye un parámetro fundamental para determinar la demanda de agua de riego, la elaboración de estudios de balance de agua entre otras necesidades. Por ello en el presente estudio realizado en el páramo Norte de Ecuador (Antisana), se obtuvo que para el año 2021 la ET real de la torre FTEC fue de 513,86 mm/año (54% de la precipitación anual que fue de 951,40 mm), y un valor de  $K_c$  de 0,72, para realizar una comparación de los valores obtenidos se tomó como referencia la investigación de Carillo-Rojas et al., (2019). En este estudio se presenta la evapotranspiración sobre el páramo sur de Ecuador para el período de los años 2016-2018, donde la ET real fue de 635,9 mm/ año, este valor representa al 51% de la precipitación anual, además se tuvo que el  $K_c$  para la vegetación dominante (pasto Tussock) fue de 0.90 basado en el modelo ET FAO 56 y 0.78 basado en el modelo ASCE-ERWI. Por lo tanto, se tiene que para los años 2016-2018 se obtuvo una mayor evapotranspiración, Además que el valor calculado de  $K_c$  es mayor, cabe mencionar que las condiciones meteorológicas, el tipo de suelo, evaporación del suelo tanto

del páramo del norte como del sur son distintas. Además, que en la parte Sur del país existe mayor precipitación.

Por otro lado, se tiene el estudio realizado en el páramo del Antisana por Torres & Proaño (2018), los datos de estudio fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) donde se calculó la ET potencial mediante la ecuación de Penman-Monteith para el período de 1 enero 2014 al 30 abril del 2015, Por otro lado se calculó la ET real con un  $K_c$  de 0,42 referente a una vegetación homogénea donde se tiene poca ganadería y agricultura y un  $K_s$  (factor estrés hídrico) de 1 y se obtuvo un valor de 237,66 mm/año lo que representa un 28% de precipitación anual de 840,24 mm, Se tiene que para el período de estudio hubo menor precipitación y menor evapotranspiración a comparación de los datos obtenidos en el presente estudio para el año 2021. Por otro lado, se tiene que el  $K_c$  calculado para el año 2021 es mucho mayor al que se toma como referencia en el estudio de Torres & Proaño, esto es debido a que solo se tomó como referencia una vegetación homogénea, mientras que el valor  $K_c$  0,72 fue calculado con valores reales que precisa la Torre Eddy Covariance y el método de PM el cual es un método estandarizado.

Por otro lado, se tiene el estudio de Ochoa- Sánchez et al (2019) el cual se realizó el observatorio Ecohidrológico Zhuracay sitio representativo del páramo ubicado entre 3500 y 3900 msnm. La evapotranspiración real se midió utilizando el método de Eddy Covariance, lisímetros volumétricos, balance de agua y energía, la ecuación calibrada por Penman-Monteith y dos modelos hidrológicos en el año 2017. Durante el año de estudio se obtuvo una ET real de 622 mm lo que representa el 57% de la precipitación con un valor de 1094 mm. Además, se concluyó que el mejor método es Eddy Covariance. Sin embargo, la construcción de la torre requiere sensores de altos costos. Por otra parte, el método por Penman-Monteith es muy recomendable pues los valores calculados por PM fueron similares a la evapotranspiración real. De la misma manera se puede observar que la evapotranspiración y precipitación son mayores a los calculados en el presente estudio.

## 5 CONCLUSIONES

- Se calculó por el método de Penman-Monteith la ET de potencial para el Páramo del Antisana, y se obtuvo un factor de correlación alto, esto quiere decir que su variabilidad tanto a escala diaria y mensual coinciden. Además, que el método por PM es recomendado como el método estándar por la FAO y también en estudios realizados en el país recomiendan este método.
- Mediante la relación de la ET real de la torre FTEC y ET potencial calculada con Penman-Monteith se obtuvo un coeficiente de cultivo con un valor de 0,72, al realizar

comparaciones con estudios realizados en el páramo del sur de Ecuador, se obtuvo valores mayores y esto es podría ser porque el páramo del sur tiene condiciones climáticas distintas, también el estado de crecimiento y desarrollo, evaporación del suelo, y el tipo de cultivo son distintos al páramo del norte del País, además que hay mayor precipitación. Por otro lado, los valores que proporciona la Torre Eddy Covariance son precisos y con una mejor resolución temporal, por lo que el valor  $K_c$  calculado es confiable.

- Mediante la relación entre la ET potencial por el PM y la ET con CRU se obtuvo un factor de correlación que tiende a cero, esto quiere decir que no coinciden los valores a escala mensual. Por lo cual el mejor método para estimar la evapotranspiración potencial es el método de PM.
- El Factor de correlación del balance de energía es de 0.898 que indica que las variables son de buena calidad. Por otro parte, el cierre de balance energético realizado indica que está calibrada la instrumentación y que está trabajando correctamente la torre FTEC.

## 6 RECOMENDACIONES

- Para el cálculo de la ET por el método de PM es necesario que se cuente con todas las variables meteorológicas como: temperatura promedio [ $^{\circ}\text{C}$ ], radiación neta [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], presión atmosférica [ $\text{KPa}$ ], déficit de vapor aire [ $\text{HPa}$ ] y velocidad del viento [ $\text{m}/\text{s}$ ] ya que esto permitirá realizar el cálculo sin inconvenientes y es importante que se trabaje en las unidades mencionadas para evitar datos erróneos de ET.
- Hay que tomar en cuenta que los modelos empíricos como el método de PM calculan la evapotranspiración potencial, mientras que evapotranspiración real se puede por el balance hídrico, método de Eddy Covariance entre otros, donde la evapotranspiración potencial es distinta a la evapotranspiración real.
- El valor del coeficiente de cultivo se podría usar en estudios que se realicen el páramo del Antisana o en páramos con similares condiciones meteorológicas, mientras que estudios que se realicen en el páramo del sur no pues las condiciones meteorológicas tanto en el Sur como en el Norte son distintos.

## 7 REFERENCIA BLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, 298(0).
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 30-47.
- Contreras, J. (2015). Análisis Comparativo de cuatro modelos de evapotranspiración de referencia en La Microcuenca del Río Quinuas. [Tesis de grado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Académico Universidad de Cuenca.
- EPMAPS, F. (2018). Actualización del plan de manejo del área de conservación hídrica Antisana. *Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), Fondo para la Protección del Agua (FONAG), Quito, Ecuador*.
- Hernández, E. O. P., & Sosa, E. G. (2020). Comparación de la evapotranspiración obtenida por el método de 'Eddy covariance' y métodos semiempíricos en una zona semiárida. *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, 3(6), 92-104.
- IDEAM. (2021). La radiación solar y su paso por la atmósfera. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la-atmosfera>
- Jaramillo, A. (2007). Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia.
- LI-COR, (2015). Sistemas Eddy Covariance. Resultados de flujo totalmente procesados en un sitio de estudio. Recuperado de: <https://www.licor.com/documents/upvz5oa7d36opa7mjfw1vtgrqoi05whi>
- Martín Domingo, A. (2018). Apuntes de Transmisión del calor. Recuperado de: <https://oa.upm.es/50949/1/amd-apuntes-transmision-calor-v2.8.pdf>
- Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana*, 39.
- Morocho, C. C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71-83.
- Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., Carrillo-Rojas, G., Sucozhañay, A., & Célleri, R. (2019). Actual evapotranspiration in the high Andean grasslands: A comparison of

measurement and estimation methods. *Frontiers in Earth Science*, 7, 55.

Ortiz, R & Chile, M (2020). Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. Recuperado de: [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2477-88502020000200001](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2477-88502020000200001)

Ribadeneira, (2020). Medición de flujos de energía, CO2 y vapor en Antisana. Recuperado de: <http://www.fonag.org.ec/web/medicion-de-flujos-de-energia-co2-y-vapor-agua-en-antisana/>

Torres, R., & Proaño, S. (2018). Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. LA GRANJA. *Revista de Ciencias de la Vida*, 28(2), 52-66

Universidad de Murcia. (2000). Radiación, Balance energético terrestre. Temperatura. Recuperado de: <https://www.um.es/geograf/clima/tema02.pdf>

Universidad de Vigo (2019). Balance Energético de la Tierra. Recuperado de: [https://ephyslab.uvigo.es/wpcontent/uploads/2019/05/Tema3\\_Balance\\_energ%C3%A9tico.pdf](https://ephyslab.uvigo.es/wpcontent/uploads/2019/05/Tema3_Balance_energ%C3%A9tico.pdf)

University of East Anglia, (2022). Data sets Climatic Research Unit. <https://www.uea.ac.uk/web/groups-and-centres/climatic-research-unit/data>

Zúñiga, J. (2015). Medición y Análisis de la radiación neta y flujo de calor en el suelo en una zona experimental del páramo Andino. [Título de grado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca.

## 8 ANEXOS

### 8.1 ANEXO I. Torre Eddy Covariance.



## 8.2 ANEXO II. Visita a la Torre Eddy Covariance.



### 8.3 ANEXO II. Páramo del Antisana.

