



UNIVERSIDAD NACIONAL
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”

ESCUELA DE POSTGRADO

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA
DETERMINACIÓN DE LA EVAPORACIÓN, CASO:
ESTACIÓN METEOROLÓGICA RECUAY, PERÍODO
2004 – 2012**

**Tesis para optar el grado de Doctor
en Ingeniería Ambiental**

TORIBIO MARCOS REYES RODRÍGUEZ

Asesor: Dr. TEÓFANES MEJÍA ANAYA

Huaraz – Ancash - Perú

2016

N° Registro: TE 0023

MIEMBROS DEL JURADO

Doctor Pedro Liberato Valladares Jara

Presidente

Doctor José del Carmen Ramírez Maldonado

Secretario

Doctor Teófanos Mejía Anaya

Vocal

ASESOR

Doctor Teófanés Mejía Anaya

A los filósofos y científicos que rompieron los viejos paradigmas de los conocimientos científicos imperantes de sus épocas.

A los escasos profesores que contribuyeron a mi formación profesional e investigativa.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Resumen | |
| Abstract | |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.1.1 Objetivo general | 2 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 2 |
| 1.2 Hipótesis | 2 |
| 1.2.1 Hipótesis general | 2 |
| 1.2.2 Hipótesis específicas | 3 |
| 1.3 Variables | 3 |
| II. MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1 Antecedentes | 5 |
| 2.2 Bases teóricas | 7 |
| 2.2.1 La evaporación y sus factores determinantes | 7 |
| 2.2.2 Transporte de masa | 10 |
| 2.2.3 Transporte de momentum lineal | 11 |
| 2.2.4 Gradiente de temperatura atmosférica | 14 |
| 2.2.5 Velocidad de fricción y esfuerzo cortante turbulento | 14 |
| 2.2.6 Presión atmosférica | 16 |
| 2.2.7 Densidad del aire seco atmosférico | 17 |
| 2.2.8 Entropía, entalpía y energía libre de Gibbs | 17 |
| 2.2.9 Fórmula analítica para la determinación de la evaporación | 21 |
| 2.3 Definición de términos | 31 |
| III. METODOLOGÍA | 33 |
| 3.1 Tipo y diseño de investigación | 33 |
| 3.2 Plan de recolección de la información y/o diseño estadístico | 35 |
| - Población | 35 |
| - Muestra | 35 |
| 3.3 Instrumentos de recolección de la información | 38 |

| | |
|--|----|
| 3.4 Plan de procesamiento y análisis estadístico de la información | 38 |
| 3.4.1 Análisis estadístico | 38 |
| 3.4.2 Coeficiente sintético transferencia de vapor de agua (B) | 39 |
| 3.4.3 Coeficiente sintético C de la fórmula tipo Hamon | 40 |
| 3.4.4 Fórmulas sintéticas para la determinación de la evaporación | 41 |
| IV. RESULTADOS | 42 |
| 4.1 Análisis estadístico de la información | 42 |
| 4.1.1 Completación de la información faltante | 42 |
| 4.1.2 Medidas de tendencia central y variabilidad | 42 |
| 4.1.3 Análisis de tendencia | 43 |
| 4.1.4 Prueba de normalidad | 53 |
| 4.2 Coeficiente sintético de transferencia de vapor de agua (B) | 54 |
| 4.3 Coeficiente sintético C de la fórmula tipo Hamon | 56 |
| 4.4 Fórmulas sintéticas para la determinación de la evaporación | 58 |
| V. DISCUSIÓN | 61 |
| 5.1 Análisis estadístico de la información | 61 |
| 5.1.1 Medidas de tendencia central y variabilidad | 61 |
| 5.1.2 Análisis de tendencia | 61 |
| 5.1.3 Prueba de normalidad | 62 |
| 5.2 Coeficiente sintético de transferencia de vapor de agua (B) | 62 |
| 5.3 Coeficiente sintético C de la fórmula tipo Hamon | 63 |
| 5.4 Fórmulas sintéticas para la determinación de la evaporación | 64 |
| VI. CONCLUSIONES | 67 |
| VII. RECOMENDACIONES | 71 |
| VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 72 |

| | |
|--|----|
| ANEXOS | 74 |
| Anexo 1. Matriz de consistencia | 77 |
| Anexo 2. Temperatura media mensual de la estación meteorológica de Recuay | 78 |
| Anexo 3. Velocidad de viento media mensual de la estación meteorológica de Recuay | 79 |
| Anexo 4. Humedad relativa media mensual de la estación meteorológica de Recuay | 80 |
| Anexo 5. Humedad relativa media mensual estacionarizada de la estación meteorológica de Recuay | 81 |
| Anexo 6. Evaporación mensual de la estación meteorológica de Recuay | 82 |

RESUMEN

El propósito fundamental del presente trabajo de investigación fue proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 - 2012. Hipótesis: se propondrá una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 - 2012. La investigación fue de tipo aplicada, el nivel de la investigación fue descriptivo - correlacional, el tipo de diseño de investigación no experimental – longitudinal, la muestra considerada corresponde al período 2004 - 2012 de los registros mensuales de evaporación, temperatura, velocidad de viento, y humedad relativa de la estación meteorológica de Recuay. Los coeficientes sintéticos de transferencia de vapor de agua B, el coeficiente C de Hamon, y las fórmulas sintéticas para la determinación de la evaporación se obtuvieron mediante técnicas de regresión estadísticas. Los resultados obtenidos para los coeficientes sintéticos de transferencia de vapor de agua B, y de Hamon son 0.222 y 0.815 respectivamente. También se obtuvieron dos fórmulas sintéticas para la determinación de la evaporación (mm/mes) en la estación meteorológica de Recuay. Se concluye que los coeficientes sintéticos de transferencia de vapor de agua B, y de Hamon son 0.222 y 0.815 respectivamente. Se obtuvo una fórmula sintética en función de la temperatura y de la velocidad del viento, y otra en función de la temperatura y humedad relativa para la determinación de la evaporación (mm/mes) en la estación meteorológica de Recuay.

Palabras claves: evaporación mensual, fórmulas analíticas, y fórmulas sintéticas.

ABSTRACT

The main purpose of this research was to propose a methodology for determining evaporation, case: meteorology station of Recuay period 2004 - 2012. Hypothesis: it will be proposed a methodology for determining of the evaporation, case: meteorology station of Recuay, period 2004 – 2012. The investigation type was applied, the level of research was descriptive - correlational, the type of research design was non experimental – longitudinal, the sample considered correspond to the period 2004 – 2012 of monthly records of evaporation, temperature, wind velocity, and relative humid of the meteorology station of Recuay. Synthetic transfer coefficients steam B, coefficient C Hamon, and synthetic formulas for determining evaporation were obtained by statistical regression techniques. The results obtained for synthetic transfer coefficients steam B, and 0.222 and 0.815 are Hamon respectively. Two synthetic formulas for determining evaporation (mm/month) in the meteorological station Recuay were also obtained. It is concluded that synthetic transfer coefficients of steam B, and Hamon are 0.222 and 0.815 respectively. A synthetic formula depending on the temperature and wind speed was obtained, and another depending on the temperature and relative humidity for determining evaporation (mm/month) in the weather station Recuay.

Keywords: Monthly evaporation, analytical formulas, and synthetic formulas.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente existen fórmulas analíticas y sintéticas que se utilizan para determinar la evaporación en lagos y embalses en lugares donde no se disponen de estaciones meteorológicas que midan esta variable meteorológica, estas fórmulas han sido generadas para condiciones diferentes del Perú. Estas fórmulas se utilizan sin haberlas validado para el caso peruano, razón por el cual se formulan las siguientes preguntas de investigación:

Pregunta general de investigación:

¿Se puede proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 - 2012?

Preguntas específicas de investigación:

1. ¿Se pueden obtener coeficientes sintéticos de transferencia de vapor B, y el coeficiente C de la fórmula tipo Hamon para proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación de Recuay, período 2004 - 2012?
2. ¿Se pueden generar fórmulas sintéticas para proponer una metodología para la determinación de la evaporación en función de la temperatura, velocidad del viento, y la humedad relativa; caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 – 2012?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 - 2012.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener coeficientes sintéticos de transferencia de vapor B, y el coeficiente C de la fórmula tipo Hamon para proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación de Recuay, período 2004 - 2012.
2. Generar fórmulas sintéticas para proponer una metodología para la determinación de la evaporación en función de la temperatura, velocidad del viento, y la humedad relativa; caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 – 2012.

1.2 HIPÓTESIS

1.2.1 HIPÓTESIS GENERAL

Se propondría una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 – 2012.

1.2.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

H₁: Hipótesis específica 1

Se obtendrían coeficientes sintéticos de transferencia (B) y el coeficiente C de la fórmula tipo Hamon para proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación de Recuay, período 2004 – 2012.

H₂: Hipótesis específica 2

Se generarían fórmulas sintéticas para proponer una metodología para la determinación de la evaporación en función de la temperatura, velocidad del viento y la humedad relativa mensual; caso: estación de Recuay, período 2004 - 2012.

1.3 VARIABLES

Variable correlacional X: evaporación

Bras (1990) define la evaporación como el proceso por el cual el agua pasa desde el estado líquido a la fase de vapor, y está en función del gradiente de la presión de vapor del agua.

Variables correlacionales Y: temperatura, viento, humedad atmosféricas:

Temperatura atmosférica

La temperatura es la medida de la energía cinética media de las moléculas individuales de un objeto (Gliancoli, 1997).

Por analogía, la temperatura atmosférica es la medida de la energía cinética media de las moléculas que componen la atmósfera.

Humedad atmosférica

Bras (1990) define la humedad atmosférica como el contenido de vapor de agua en la atmósfera.

Viento atmosférico

Bras (1990) indica que el viento atmosférico es el aire que se mueve por las diferencias presiones que se genera por el calentamiento desigual de la Tierra por el Sol.

Tabla 1.1: Operacionalización de variables

| Variables | Indicadores | Unidad de medida | Fuente de datos |
|--|--------------------------------|------------------|-----------------|
| Correlacional X Evaporación | Evaporación mensual | mm/mes | SENAMHI |
| Correlacionales Y Temperatura atmosférica | Temperatura media mensual | °C | SENAMHI |
| Humedad atmosférica | Humedad relativa media mensual | % | SENAMHI |
| Viento atmosférico | Velocidad media mensual | m/s | SENAMHI |

II. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Huapaya (2013) en la cuenca circunlacustre del lago Titicaca (Perú) determinó que la evapotranspiración potencial mensual es igual a 0.80 veces la evaporación mensual determinada por el método del tanque de evaporación tipo A. Además, indica que la evaporación en la zona circunlacustre del Titicaca Peruano es 3.44 mm/día.

Kessler (1966) al realizar el balance hidrológico en el lago Titicaca determinó que en los meses de precipitaciones con humedad relativa alta, con alta nubosidad y con radiación baja la evaporación es más baja.

Tanny (2008) realizó mediciones de la evaporación de agua en un pequeño reservorio ubicado al norte de Israel que fue medido con un sistema de covarianza eddy que consiste de un anemómetro tridimensional sónico y un higrómetro de kriptón; posteriormente comparó con varios modelos de balance de energía y de transferencia de masa, y determinó que el método del tanque A sobreestima la tasa de evaporación del agua en el reservorio.

Singh (1997) hace referencia la fórmula sintética de Romanenko (1961) que se indica en la fórmula (2.1):

$$E_v = 0.018(T + 25)^2(100 - Hr) \quad (2.1)$$

Donde:

E_v = evaporación (mm/día)

T = temperatura media mensual (°C)

Hr = humedad relativa media mensual (%)

Bras (1990) mediante pruebas realizadas en el lago Hefner (Oklahoma, USA) basadas en la teoría de la transferencia de masa, encontró la fórmula sintética (2.2) que sirve para determinar la evaporación del agua:

$$E_v = 0.00241(e_s - e_a)V_8 \quad (2.2)$$

Donde:

E_v = evaporación (pulg/día)

e_a = presión de vapor diaria (pulg Hg)

e_8 = presión de vapor diaria a 8 m de la superficie del agua (pulg Hg)

V_8 = velocidad del viento diaria a 8 m de la superficie (millas/día).

Koutsoyiannis (2012) utilizando métodos termodinámicos obtuvo la fórmula (2.3) para determinar la presión de vapor de saturación del agua:

$$e_s = 612 \exp \left[24.921 \left(1 - \frac{273.2}{T} \right) \right] \left(\frac{273.2}{T} \right)^{5.06} \quad (2.3)$$

Donde:

e_s = presión de vapor de saturación (Pa)

T = temperatura atmosférica (K).

La fórmula (2.3) que sirve para determinar la presión de vapor saturado del agua fue deducida a partir de la entropía y energía libre de Gibbs específicas (Koutsoyiannis, 2012).

La fórmula obtenida (2.3) es una fórmula semisintética a diferencia de la fórmula de Magnus o Tetens que es una fórmula sintética.

Archibald (2012) hace referencia a la fórmula de Hamon para determinar la evapotranspiración potencial:

$$E_{TP} = \frac{29.8 d_{\max} e_s}{(T+273)} \quad (2.4)$$

Donde:

E_{TP} = evapotranspiración potencial (mm/día)

$d_{m\acute{a}x}$ = duración máxima de la insolación (horas/día)

e_s = presión de vapor saturado del agua diaria (kPa)

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 LA EVAPORACIÓN Y SUS FACTORES DETERMINANTES

1) EVAPORACIÓN

Dingman (2002) describe la evaporación como un proceso difusivo que sigue la primera ley de Fick, durante la evaporación el vapor de agua se difunde en el aire. En el proceso de evaporación la temperatura permanece constante, a diferencia de la ebullición que ocurre en toda la masa del líquido, la evaporación ocurre superficialmente.

Dingman (2002) indica que la evaporación ocurre a una temperatura menor que la temperatura de ebullición, cuando las moléculas vencen la tensión superficial del agua ocurre la evaporación.

Bras (1990) señala que cuando aumenta la temperatura del agua la energía cinética de las moléculas del agua aumenta, y la tensión superficial del agua disminuye, la evaporación aumenta cuando la temperatura aumenta. También indica que la máxima cantidad de vapor de agua que puede existir en un espacio dado es una función de la temperatura, y es independiente de la coexistencia de otros

gases. Si el espacio no está saturado la evaporación supera a la condensación.

Levenspiel (1997) dice que el calor latente de evaporación del agua tiene dos componentes: el 92 % es la cantidad de energía que se utiliza para separar las moléculas del agua líquida, y la energía necesaria para hacer espacio en la atmósfera que representa el 8%.

Chang (1999) indica que para dar inicio al proceso de evaporación previamente se rompen los puentes de hidrógeno, después se suministra energía adicional para el proceso de la evaporación. Los puentes de hidrógeno se forman cuando los átomos de hidrógeno de una molécula de agua son atraídos por los átomos de oxígeno de otras moléculas.

La paradoja de la evaporación es la disminución de la evaporación a pesar del calentamiento global. En 306 estaciones meteorológicas de China (1956-2005) 2005, el incremento de la temperatura atmosférica fue de 0.02°C por año y el decremento de la evaporación fue 1.9 mm por año, esta paradoja se atribuye al oscurecimiento global (Cong, 2009).

Luna (2015) indica que una tecnología emergente para reducir la evaporación es el uso de esferas de color negro de polietileno de alta densidad de 530 gramos de peso incluida el agua y de 12.7 cm de diámetro, con esta tecnología se reduce la evaporación en 80 a 82 %.

2) FACTORES DETERMINANTES DE LA EVAPORACIÓN

Raghunath (2006) indica que los factores que afectan la evaporación son la temperatura del aire y del agua, la humedad relativa, la velocidad del viento, el área expuesta, la presión atmosférica y la salinidad del agua. Además, indica que a mayor temperatura y velocidad del viento, es mayor la evaporación, a mayor humedad relativa y sales disueltas, la evaporación es menor.

Wang (2004) indica que la física de la evaporación tiene cuatro elementos esenciales: abastecimiento de energía, abastecimiento de agua, fugacidad, mecanismo de transporte turbulento (eddies); el abastecimiento de energía proviene de la energía solar, la fugacidad es medida por la presión de vapor de la interface líquido – vapor, el transporte turbulento es determinado por la velocidad del viento y la inestabilidad térmica de la capa superficial.

McCuen (2005) señala que la evaporación depende de varios factores: la temperatura, humedad o déficit de la presión de vapor, radiación, y velocidad del viento.

El vapor de agua contenido en la masa de aire sobre una superficie libre de agua es un factor determinante de la evaporación, cuando las moléculas del vapor de agua ejercen mayor presión sobre la superficie del agua la evaporación disminuye (McCuen, 2005).

La evaporación es afectada por la radiación solar, la temperatura del aire, la presión de vapor, la velocidad del viento y posiblemente por la presión atmosférica; la radiación solar y la evaporación varían según la latitud, época del año, hora del día y condiciones de nubosidad (Bras, 1990).

La evaporación del agua es proporcional a la velocidad del viento y a la presión de vapor, siendo este factor el que influye más sobre la evaporación (Bras, 1990).

2.2.2 TRANSPORTE DE MASA

Según Cengel (2011) el flujo másico de una sustancia es proporcional al gradiente de concentración, tal como se expresa en la fórmula (2.5):

$$J = -\rho D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.5)$$

Donde:

J = flujo másico de la sustancia (M/L^2T)

ρ = densidad del fluido (M/L^3)

D = coeficiente de difusión del fluido (L^2/T)

C = concentración de la sustancia (M/M)

x = distancia de difusión de la sustancia (L)

Chow (1994) señala que el transporte de masa está expresado por la fórmula (2.6):

$$f_m = -\rho k_w \frac{dc}{dz} \quad (2.6)$$

Donde:

f_m = flujo másico en la dirección z ($MT^{-1}L^{-2}$)

ρ = densidad (ML^{-3})

$k_w =$ difusividad (L^2T^{-1})

$dc/dz =$ gradiente de concentración (L^{-1})

La humedad específica del aire es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire húmedo. Según Chow (1994) la humedad específica del aire se expresa mediante la fórmula (2.7):

$$q_v = 0.622 \frac{e_a}{p} \quad (2.7)$$

Donde:

$q_v =$ humedad específica del aire

$e_a =$ presión de vapor del agua en el aire

$p =$ presión atmosférica

2.2.3 TRANSPORTE DE MOMENTUM LINEAL

Streeter (1997) señala que el flujo del momentum lineal en un flujo turbulento no se rige por la ley de viscosidad de Newton, pero se relacionan con las fluctuaciones aleatorias de la velocidad y la presión alrededor de sus medias a través del tiempo, las oscilaciones aleatorias en el agua y el aire tienen período (T) aproximadamente igual a 5 segundos.

White (2008) indica que en el flujo turbulento las tres componentes de la velocidad son distintas de cero, tienen fluctuaciones alrededor de su media a través del tiempo, el esfuerzo cortante turbulento se produce debido a las fluctuaciones de las velocidades, el flujo turbulento es un mezclado aleatorio y caótico de las partículas del fluido.

Las fluctuaciones de las velocidades del fluido son las causas del intercambio de la cantidad de movimiento y la acción mezcladora en

flujo turbulento. El movimiento de los remolinos en flujo turbulento causa fluctuaciones significativas en los valores de la velocidad, la temperatura y la presión (White, 2008).

Dingman (2002) indica que el movimiento vertical de la masa, energía y momentum es alterada por los eddies turbulentos, la turbulencia es influenciada por la velocidad de fricción del viento.

Potter (1998) indica que las moléculas que cruzan el plano paralelo al flujo llevan consigo su momentum hacia arriba o abajo, el efecto neto del transporte molecular es igualar las velocidades de arriba y abajo, tal como se indica en la figura 2.2.

El flujo de momentum se mueve en la dirección del gradiente de velocidad, como indica (Chow, 1994), ver fórmula (2.8):

$$\tau = \rho k \frac{dv}{dz} \quad (2.8)$$

Donde:

τ = campo de flujo de momentum en la dirección z (F/L^2)

ρ = densidad del fluido (M/L^3)

k = coeficiente de difusión del momentum (L^2/T)

dv/dz = gradiente de velocidad ($1/T$)

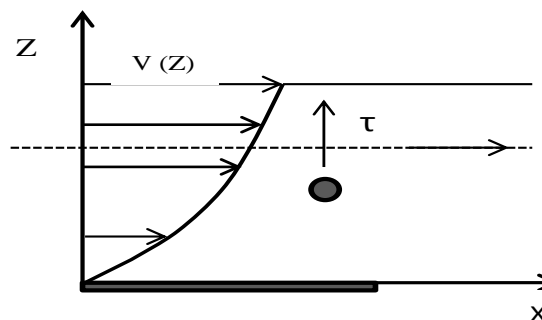


Figura 2.2: Flujo de momentum lineal
Fuente: Potter, 1998

Según Chow (1994) el flujo de momentum en un flujo turbulento no se rige por la ley de viscosidad de Newton, pero sí se relaciona con las desviaciones instantáneas de la velocidad turbulenta con respecto al valor promedio en el tiempo.

El flujo de momentum en un flujo turbulento se expresa mediante la fórmula (2.9) como lo indica (Chow, 1994):

$$\tau = \rho k_m \frac{dv}{dz} \quad (2.9)$$

Donde:

τ = flujo de momentum en la dirección z (F/L²)

ρ = densidad del fluido (M/L³)

k_m = coeficiente de difusión del momentum o viscosidad de eddy (L²/T)

dv/dz = gradiente de velocidad (1/T)

Cengel (2011) indica que el transporte turbulento en la superficie se puede expresar mediante la fórmula (2.10):

$$\tau_{turb} = -\mu_{turb} \frac{dv}{dz} \quad (2.10)$$

Donde:

τ_{turb} = flujo de momentum en la dirección z (F/L²)

μ_{turb} = coeficiente de viscosidad eddy (FL/T)

dv/dz = gradiente de velocidad (1/T)

2.2.4 GRADIENTE DE TEMPERATURA ATMOSFÉRICA

White (2008) indica que la temperatura atmosférica media disminuye casi linealmente con la altitud z hasta una altura de 11 km, que se expresa mediante la fórmula (2.11):

$$T = 15 - 0.0065Z \quad (2.11)$$

Donde:

T = temperatura atmosférica (°C)

Z = altitud (m.s.n.m)

El gradiente de temperatura atmosférica es igual a 0.65 °C por cada 100 metros de ascenso vertical.

2.2.5 VELOCIDAD DE FRICCIÓN Y ESFUERZO CORTANTE TURBULENTO

White (2008) indica que la velocidad de fricción v_* fue deducida por Ludwig Prandtl mediante análisis dimensional, la misma que se indica en la fórmula (2.12):

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (2.12)$$

Donde:

v_* = velocidad de fricción o corte

τ_o = esfuerzo cortante en la pared

ρ = densidad del fluido

La fórmula de esfuerzo cortante total (τ) para flujo turbulento fue deducida por Ludwig Prandtl expresada con la fórmula (2.13):

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial z} + \rho \overline{u'v'} \quad (2.13)$$

Ludwing Prandtl utilizando la teoría de la capa límite dedujo que las fluctuaciones de las velocidades son proporcionales a la longitud de mezclado y al gradiente de velocidad, tal como se indican en las fórmulas (2.14) y (2.15):

$$\bar{u}' = l \frac{dv}{dz} \quad (2.14)$$

$$\bar{v}' = l \frac{dv}{dz} \quad (2.15)$$

Donde:

\bar{u} = velocidad media del fluido en la dirección x

\bar{v} = velocidad media del fluido en la dirección y

l = longitud de mezclado

$\frac{dv}{dz}$ = gradiente de velocidad en la dirección z

De tal manera que el esfuerzo cortante turbulento está expresado por la fórmula (2.16) como lo indica (Streeter, 1998):

$$\tau = \rho \bar{u}' \bar{v}' = \rho l^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \quad (2.16)$$

Por otra parte el esfuerzo cortante se puede expresar mediante la fórmula (2.17) como lo indica (White, 2008):

$$\tau = \mu_{turb} \frac{dv}{dz} \quad (2.17)$$

De las fórmulas (2.16) y (2.17) se tiene el coeficiente de viscosidad dinámica turbulenta (μ_{turb}), expresado por la fórmula (2.18):

$$\mu_{turb} = \rho l^2 \frac{dv}{dz} \quad (2.18)$$

Theodore von Kármán citado por White (2008) indica que la longitud de mezclado se expresa por la fórmula (2.19):

$$l = kz \quad (2.19)$$

Donde:

l = longitud de mezclado de Prandtl

k = constante universal de von Kármán (0.41)

z = altitud

De las formulas (2.17), (2.18), y (2.19) se tiene la fórmula (2.20) para el esfuerzo cortante:

$$\tau = \rho k^2 z^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \quad (2.20)$$

Streeter (1997) indica que la fórmula del perfil logarítmico de velocidad del viento se deduce analíticamente teniendo como fundamento el esfuerzo cortante turbulento y la longitud de mezclado de Prandtl.

2.2.6 PRESIÓN ATMOSFÉRICA

White (2008) señala que la fórmula analítica (2.21) de la presión atmosférica en función de la altitud se obtiene a partir de la ecuación de los gases ideales, el gradiente de temperatura atmosférica igual a -0.0065K/m , la ley de la hidrostática, y para una temperatura atmosférica estándar igual a 15°C , se tiene la fórmula para determinar la presión atmosférica:

$$p = 101.35 \left(\frac{288.16 - 0.0065Z}{288.16} \right)^{5.26} \quad (2.21)$$

Donde:

p = presión atmosférica (kPa)

z = altitud del lugar con respecto al nivel de mar (m.s.n.m.)

2.2.7 DENSIDAD DEL AIRE SECO ATMOSFÉRICO

Davie (2002) indica que la densidad del aire seco varía en función de la temperatura atmosférica, según la fórmula (2.22):

$$\rho_d = 1.2905 - 0.0042T \quad (2.22)$$

Donde:

ρ_d = densidad del aire seco atmosférico (kg/m^3) a una atmósfera de presión

T = temperatura de la atmósfera ($^{\circ}\text{C}$)

2.2.8 ENTROPÍA, ENTALPÍA Y ENERGÍA LIBRE DE GIBBS

1) ENTROPÍA

Shames (1995) señala que la entropía impone restricciones a la dirección de la transferencia de la energía, en completa ausencia de fricción y transferencia de calor no habría restricciones para el intercambio de energía. Un proceso no ocurre a menos que satisfaga la primera y la segunda ley de la termodinámica.

Giancoli (1997) indica varias definiciones de entropía:

- a) Como medida de orden o desorden de un sistema.
- b) Como medida de la dirección de ocurrencia de los procesos.
- c) Como medida de degradación de la energía del sistema

Shames (1995) indica que la segunda ley de la termodinámica matemáticamente se expresa como:

$$\frac{dQ}{T} \leq dS \quad (2.23)$$

Donde:

dS = cambio de la entropía del sistema

dQ = cantidad de calor añadido al sistema

T = temperatura del sistema

Combinado la primera y segunda ley de la termodinámica para un proceso a presión constante se tiene la fórmula (2.24) que se indica:

$$TdS = dU + pdV \quad (2.24)$$

Donde:

T = temperatura

dU = cambio de la energía interna

p = presión

dV = cambio de volumen

2) ENTALPÍA

Levenspiel (1997) indica que la entalpía de un sistema es igual a la energía interna más la energía adicional atribuida al volumen V y a la presión P , la entalpía se expresa mediante la fórmula (2.25)

$$H = U + PV \quad (2.25)$$

Cuando se pasa de líquido a vapor se requiere energía ($\Delta H > 0$) para separar las moléculas de agua.

3) ENERGÍA LIBRE DE GIBBS

La energía libre de Gibbs es una función de estado, es decir, su valor depende de su estado inicial y final.

Levenspiel (1997) expresa la energía libre de Gibbs (G) mediante la fórmula (2.26):

$$G = H - TS \quad (2.26)$$

Donde:

G = energía libre de Gibbs

H = entalpía

T = temperatura

S = entropía

La variación de la energía libre se pueden expresar mediante las fórmulas (2.27) y (2.28):

$$dG = dH - TdS - SdT \quad (2.27)$$

$$dG = VdP - SdT \quad (2.28)$$

La energía libre de Gibbs sirve para medir la espontaneidad de un proceso ($\Delta G < 0$), es decir, cuando la energía libre del sistema disminuye.

Los procesos espontáneos tienden a pasar a un estado de mínima energía y máxima entropía (Levenspiel, 1997).

La energía libre de Gibbs de un gas para un proceso a temperatura constante está dada por la fórmula (2.29):

$$dG = mRT \frac{dP}{P} \quad (2.29)$$

Donde:

dG = diferencial de la energía libre

m = masa del gas

R = constante universal del gas considerado

T = temperatura del gas

dP = diferencial de presión del gas

P = presión del gas

La energía libre de Gibbs liberada desde la presión de vapor (e) hasta la presión de vapor saturado (e_s) es está dada por la fórmulas (2.30), y (2.31):

$$\Delta G = mRT * \ln\left(\frac{e_a}{e_s}\right) \quad (2.30)$$

$$\Delta G = mRT * \ln(H_r) \quad (2.31)$$

Donde:

ΔG = variación de la energía libre de Gibbs

m = masa

R = constante universal de los gases

T = temperatura

e_a = presión de vapor

e_s = presión de vapor saturado

Hr = humedad relativa

Cuando se pasa de líquido a vapor la entropía aumenta con lo que $T\Delta S$ es mayor y ΔG disminuye (Levenspiel, 1997).

Asimismo Levenspiel (1997) indica que la energía libre es la energía liberada por un sistema para realizar trabajo útil, si un sistema libera energía la variación de la energía libre de Gibbs es negativa.

2.2.9 FÓRMULA ANALÍTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EVAPORACIÓN

1) FÓRMULA PARA LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE

Considerando que la humedad relativa del aire (Hr) es la relación de la masa de vapor (m_v) no saturado entre la masa de vapor saturado (m_{vs}) bajo las mismas condiciones de temperatura y volumen, se tiene la fórmula (2.32):

$$Hr = \frac{m_v}{m_{vs}} \quad (2.32)$$

En la fórmula (2.33) de los gases perfectos se puede reemplazar la masa de vapor no saturado (m_v) y la masa de vapor saturado (m_{vs})

$$m = \frac{pV}{RT} \quad (2.33)$$

Además, haciendo $p = e_a$ y $p = e_s$ en la fórmula (2.33) se tienen las fórmulas (2.34) y (2.35):

$$m_v = \frac{e_a V}{R_v T} \quad (2.34)$$

$$m_{vs} = \frac{e_s V}{R_v T} \quad (2.35)$$

Donde:

m_v = masa de vapor de agua

m_{vs} = masa de vapor saturado

e_a = presión de vapor del agua

e_s = presión de vapor saturado del agua

R_v = constante universal de vapor de agua

V = volumen de aire húmedo

T = temperatura atmosférica

Sustituyendo las fórmulas (2.34) y (2.35) en la fórmula (2.32) se obtiene la fórmula (2.36), la misma que es indicada por (Chow ,1994):

$$H_r = \frac{e_a}{e_s} \quad (2.36)$$

La humedad relativa (Hr) se determina conociendo la presión de vapor atmosférica (e_a) y la presión de vapor saturado del agua (e_s).

2) FÓRMULA PARA LA DENSIDAD DEL AIRE HÚMEDO

Si se considera una mezcla de masa de vapor de agua (m_v) y masa de aire seco (m_d) tal como se indica en la figura 2.3:

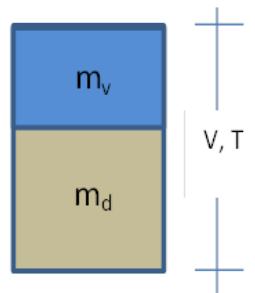


Figura 2.3: Recipiente con aire húmedo

La densidad del aire húmedo (ρ_a) es igual a la masa de vapor (m_v) más la masa de aire seco entre el volumen (V), tal como se indica en la fórmula (2.37):

$$\rho_a = \frac{m_d + m_v}{V} \quad (2.37)$$

$$\rho_a = \rho_d + \rho_v \quad (2.38)$$

De acuerdo a la ley de los gases perfectos la densidad del aire seco (ρ_d) se puede expresar como se indica en la fórmula (2.39):

$$\rho_d = \frac{P_d}{TR_d} \quad (2.39)$$

$$\rho_d = \frac{P - e_a}{TR_d} = \frac{P}{TR_d} \left(1 - \frac{e_a}{P} \right) \quad (2.40)$$

La fórmula (2.40) es válida para una presión $p - e_a$ del aire y para una temperatura T .

De la ecuación de los gases perfectos se tiene que la densidad de vapor de agua (ρ_v) como se indica en la fórmula (2.41):

$$\rho_v = \frac{e_a}{TR_v} = 0.622 \frac{e_a}{TR_d} \quad (2.41)$$

La relación de la constante universal para aire seco y vapor de agua está dada por la fórmula (2.42):

$$\frac{R_d}{R_v} = 0.622 \quad (2.42)$$

Sumando las fórmulas (2.40) y (2.41) se tiene la fórmula (2.43) indicada por (Bras, 1990):

$$\rho_a = \frac{P}{TR_d} \left(1 - 0.378 \frac{e_a}{P} \right) \quad (2.43)$$

La fórmula (2.43) sirve para calcular la densidad del aire húmedo a una determinada temperatura, presión atmosférica, y humedad relativa. Linsley (1994) indica que el aire húmedo es más liviano que el aire seco, pero se tiene que tener en cuenta las condiciones antes indicadas.

3) FÓRMULA PARA LA HUMEDAD ESPECÍFICA DEL AIRE

Como la humedad específica (q_v) del aire es la relación de la masa de vapor de agua a la masa total del aire, se puede escribir como la fórmula (2.44):

$$q_v = \frac{m_v}{m_v+m_d} = \frac{\rho_v}{\rho_v+\rho_d} \quad (2.44)$$

$$\rho_v = \frac{e_a}{TR_v} \quad (2.45)$$

$$\rho_d = \frac{p-e_a}{TR_d} \quad (2.46)$$

Sustituyendo (2.45) y (2.46) en (2.44) se tiene la fórmula (2.47) indicada por (Chow, 1994):

$$q_v = 0.622 \frac{e_s}{p} \quad (2.47)$$

La fórmula (2.47) sirve para determinar la humedad específica del aire.

Donde:

q_v = humedad específica del aire

e = presión de vapor no saturado del agua

p = presión atmosférica

4) FÓRMULA PARA EL PERFIL DE LA VELOCIDAD

Según White (2008) el esfuerzo cortante en la pared en contacto con el fluido fue deducido por Ludwig Prandtl, y se conoce como la ley de pared, dada por la fórmula (2.48):

$$\tau = \rho v_*^2 \quad (2.48)$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante en la pared

ρ = densidad del fluido

v_* = velocidad de corte crítica

Según (Streeter, 1988) el esfuerzo cortante turbulento tiene la forma que se indica en la fórmula (2.49):

$$\tau = \rho k^2 z^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \quad (2.49)$$

Igualando las fórmulas (2.48) y (2.49) se tiene la fórmula (2.50) para la velocidad de corte (v_*) indicada por (Chow, 1994):

$$v_* = kz \frac{dv}{dz} \quad (2.50)$$

Integrando la fórmula (2.50) se tiene el perfil de velocidad del aire, expresada por la fórmula (2.51) la misma que es indicada por (Chow, 1994).

$$v = \frac{v_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.51)$$

Donde:

v = velocidad del aire

v_* = velocidad de corte crítica

z = altura correspondiente a la velocidad del aire (v)

z_0 = altura de la rugosidad

5) FÓRMULA PARA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE VAPOR DE AGUA (B)

Para llegar a la fórmula del coeficiente de vapor de agua (B) se ha seguido el procedimiento establecido por (Chow, 1994):

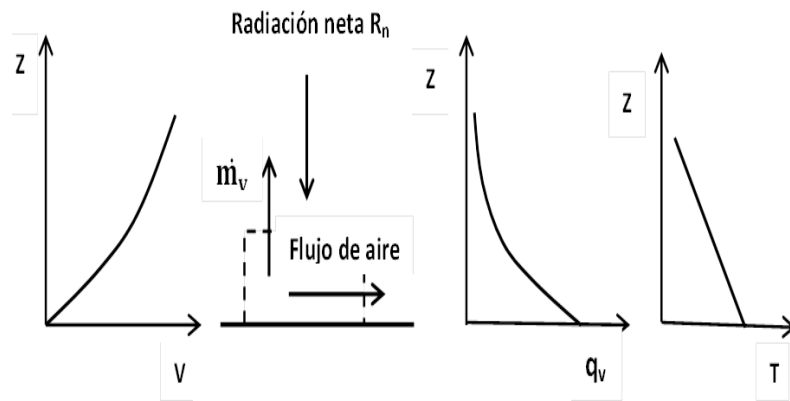


Figura 2.4: Perfil de velocidad de viento, humedad específica y temperatura
Fuente: Chow, 1994

Según Chow (1994) la transferencia de masa del vapor de agua está expresada por la fórmula (2.52):

$$\dot{m}_v = -\rho_a k_w \frac{dq_v}{dz} \quad (2.52)$$

Donde:

\dot{m}_v = flujo másico de vapor de agua

ρ_a = densidad del aire

k_w = difusividad del vapor de agua

$\frac{dq_v}{dz}$ = gradiente de humedad específica del aire

Según Chow (1994) la fórmula de transporte de momentum lineal está expresada por la fórmula (2.53):

$$\tau = \rho_a k_m \frac{dv}{dz} \quad (2.53)$$

Donde:

$\tau =$ esfuerzo cortante o flujo de momentum

$\rho_a =$ densidad del aire

$k_w =$ difusividad de momentum lineal

$\frac{dV}{dz} =$ gradiente de humedad específica del aire

Dividiendo las fórmulas (2.52) y (2.53) se tiene la fórmula (2.54):

$$\dot{m}_v = -\tau \frac{k_w}{k_m} \frac{dq_v}{dv} \quad (2.54)$$

Escribiendo la fórmula (2.54) como diferencia finita se tiene la fórmula (2.55) como lo indica (Chow, 1994):

$$\dot{m}_v = \tau \left(\frac{k_w}{k_m} \right) \left(\frac{q_{v1} - q_{v2}}{(v_2 - v_1)} \right) \quad (2.55)$$

De la fórmula (2.48) y (2.51) se tienen las fórmulas (2.56) y (2.57):

$$V_*^2 = \frac{\tau}{\rho_a} \quad (2.56)$$

$$v_2 - v_1 = \frac{v_*}{k} \ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \quad (2.57)$$

De las fórmulas (2.56) y (2.57) se tiene la fórmula (2.58) indicada por (Chow, 1994):

$$\tau = \rho_a \left[\frac{k(v_2 - v_1)}{\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right)} \right]^2 \quad (2.58)$$

Sustituyendo la fórmula (2.58) en la fórmula (2.55) se tiene la fórmula (2.59) indicada por (Chow, 1994):

$$\dot{m}_v = \rho_a \left(\frac{k_w}{k_m} \right) k^2 \frac{(q_{v1} - q_{v2})(v_2 - v_1)}{\left(\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \right)^2} \quad (2.59)$$

En la superficie de evaporación se tienen los siguientes valores de borde: $z_1 = z_0 =$ altura de la rugosidad, $v_1 = 0$ y la presión de vapor saturada (e_s); en la altitud z_2 la presión de vapor es e .

Las humedades específicas correspondientes están dadas por las fórmulas (2.60) y (2.61):

$$q_{v1} = 0.622 \frac{e_s}{p} \quad (2.60)$$

$$q_{v2} = 0.622 \frac{e}{p} \quad (2.61)$$

Sustituyendo las condiciones de borde y las fórmulas (2.60) y (2.61) en la fórmula (2.59) se tiene la fórmula (2.62) indicada por (Chow, 1994):

$$\dot{m}_v = \left(\frac{0.622k^2 \rho_a}{p} \right) \frac{(e_s - e)v_2}{\left(\ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) \right)^2} \quad (2.62)$$

Por la ecuación de continuidad el flujo másico está dado por la fórmula (2.63):

$$\dot{m}_v = \rho_w Q = \rho_w E_v (1) \quad (2.63)$$

De las fórmulas (2.62) y (2.63) se tiene la fórmula (2.64) para la determinación de la evaporación indicada por (Chow, 1994).

$$E_v = \left(\frac{0.622k^2 \rho_a}{p \rho_w} \right) \frac{(e_s - e)v_2}{\left(\ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) \right)^2} \quad (2.64)$$

La presión de vapor ambiental está por la fórmula (2.65):

$$e_a = e_s(Hr) \quad (2.65)$$

De las fórmulas (2.64) y (2.65) se tiene fórmula (2.66):

$$E_v = \left(\frac{0.622k^2 \rho_a}{p \rho_w} \right) \frac{(1-Hr)e_s v_2}{\left(\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) \right)^2} \quad (2.66)$$

La fórmula (2.66) es una de las fórmulas semianalíticas para para la determinación de evaporación del agua.

El coeficiente de transferencia de vapor de agua (B) está dada por la fórmula (2.67) indicada por (Chow, 1994):

$$B = \frac{0.622k^2 \rho_a v_2}{p \rho_w \left(\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) \right)^2} \quad (2.67)$$

Finalmente, sustituyendo la fórmula (2.67) en la fórmula (2.66) se tiene la fórmula semianalítica (2.68) basada en el flujo de vapor de agua y de momentum, que sirve para la determinación de la evaporación del agua:

$$E_v = B e_s (1 - Hr) \quad (2.68)$$

Donde:

Ev = evaporación del agua

B = coeficiente sintético de transferencia de vapor

Es = presión de vapor de agua saturado

Hr = humedad relativa del aire

Chow (1994) indica que el coeficiente de transferencia de vapor de agua (B) varía de un lugar a otro.

6) **ÁNGULO DE DECLINACIÓN SOLAR, DE RADIACIÓN Y DURACIÓN MÁXIMA DE LA INSOLACIÓN**

Según Manrique (1984) el ángulo de declinación solar está expresado por la fórmula (2.69) de Cooper:

$$\delta = 0.409 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}(n + 284)\right) \quad (2.69)$$

Donde:

δ = ángulo de declinación solar (radianes)

n = número del día del año

Allen (2006) indica que el ángulo horario de la puesta del sol está dado por la fórmula (2.70):

$$W_s = \operatorname{arccos}(-\operatorname{tg}\phi \operatorname{tg}\delta) \quad (2.70)$$

Donde:

W_s = ángulo horario de la puesta del sol (radianes)

ϕ = latitud del lugar (radianes)

δ = ángulo de declinación solar (radianes)

Allen (2006) indica que la duración máxima de la insolación está dada por la fórmula (2.72):

$$d_{\text{máx}} = \left(\frac{24}{\pi}\right) W_s \quad (2.72)$$

Donde:

$d_{\text{máx}}$ = duración máxima de la insolación diaria (horas)

W_s = ángulo de horario de la puesta del sol (radianes)

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- **ÁNGULO DE DECLINACIÓN SOLAR**

Manrique (1984) define como la posición angular del sol al medio solar, es decir, en el momento en que el sol está más alto en el firmamento con respecto al plano del ecuador.

- **CALOR**

Giancoli (1997) define como la energía que se transmite de un cuerpo a otro debido a una diferencia de temperatura.

- **CAPA LÍMITE**

Streeter (1988) define como el campo de flujo en el cual existe gradiente de velocidad, es la región donde existen esfuerzos cortantes significativos, y no puede ignorarse la fricción.

- **COEFICIENTE DE VISCOSIDAD TURBULENTO (EDDY)**

Streeter (1988) define como el coeficiente de transferencia de la cantidad de movimiento desde puntos de mayor concentración hasta puntos de menor concentración, es una propiedad de flujo y no del fluido.

- **CONSTANTE DE VON KÁRMÁN**

Streeter (1988) define como la constante universal que en un flujo turbulento su valor no cambia ni con la forma de la frontera ni con el número de Reynolds.

- **LONGITUD DE MEZCLADO**

White (2008) define como la distancia que una partícula de fluido recorre antes de interactuar con otra partícula, es decir, es la distancia recorrida por la partícula de fluido antes de mezclarse.

- **PRESIÓN DE VAPOR**

Bras (1990) define como presión ejercida por las moléculas del agua en un espacio no saturado.

- **PRESIÓN DE VAPOR DE SATURACIÓN**

Dingman (2002) define como la presión por el cual por cada molécula que logra escapar del líquido necesariamente regresa una de las gaseosas a él, depende de la naturaleza del líquido y la temperatura.

- **TEMPERATURA**

Giancoli (1997) define como la medida de la energía cinética media de las moléculas individuales de un objeto.

III. METODOLOGÍA

3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es aplicada porque se busca la utilidad inmediata de la investigación. Carrasco (2013) señala que la investigación aplicada tiene propósitos prácticos inmediatos bien definidos, es decir, se investiga para actuar, transformar, modificar o producir cambios en un determinado sector de la realidad.

El nivel de la investigación es descriptivo – correlacional, es descriptivo porque se describe los procesos de la evaporación en función de las variables meteorológicas: temperatura, humedad relativa, y velocidad del viento; y es correlacional porque se establecen las relaciones que existen entre la evaporación y las variables meteorológicas: temperatura, velocidad del viento, y la humedad relativa en la estación de Recuay, período 2004 – 2012.

Hernández (2010) indica que el diseño de investigación se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea.

Además, Hernández (2010) señala que en las investigaciones no experimentales no se hacen variar en forma intencional las variables independientes, para ver su efecto sobre otras variables. En la investigación no experimental u observacional se observan los fenómenos tal como se dan en el contexto natural, para posteriormente analizarlos.

El diseño de investigación es no experimental – longitudinal porque la evaporación no es condicionada por la manipulación intencionada de las

variables meteorológicas: temperatura, velocidad del viento, y humedad relativa; y longitudinal porque los datos de evaporación, temperatura, velocidad del viento, y humedad relativa fueron tomadas desde el año 2004 – 2012.

En la investigación se utilizaron los siguientes métodos generales de investigación: deductivo e inductivo, y analítico y sintético. Entre los métodos particulares de investigación se utilizaron los métodos de modelación matemática y estadístico.

Según Morán (2010) el método deductivo es un método de razonamiento que consiste en tomar conclusiones generales para obtener explicaciones particulares. El método inductivo utiliza el razonamiento para obtener conclusiones que parten de hechos particulares aceptados como válidos, para llegar a conclusiones cuya aplicación sea de carácter general.

De acuerdo a Morán (2010) el método analítico es un proceso cognoscitivo que consiste en descomponer un objeto de estudio mediante la separación de cada una de las partes del todo para estudiarlas en forma individual. El método sintético consiste en integrar los componentes dispersos de un objeto de estudio para estudiarlos en su totalidad.

3.2 PLAN DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN Y/O DISEÑO ESTADÍSTICO

- POBLACIÓN

La población consiste en los registros meteorológicos de la estación meteorológica de Recuay (Ancash – Perú) desde que esta estación entró a funcionar.

- MUESTRA

Hernández (2010) indica que la muestra es un subgrupo de la población, en las muestras no probabilísticas la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o quien hace el muestreo, en consecuencia, la muestra que se ha tomado es no probabilística.

La muestra corresponde a los registros meteorológicos disponibles en la estación meteorológica de Recuay, correspondiente al período 2004 – 2012.

Las unidades de análisis en la investigación son: la evaporación, la temperatura, la humedad relativa, y la velocidad del viento de paso media mensual.

Como el diseño de investigación es no experimental – longitudinal la recolección de la información se limitó a la adquisición de informaciones observadas y medidas por el SENAMHI: evaporación, temperatura, velocidad del viento, y humedad relativa; correspondiente período 2004 – 2012. Se tomaron las informaciones meteorológicas para este período

porque para este período las informaciones estaban completas para todas las variables de investigación.

No fue necesario realizar el diseño estadístico para la recolección de información, porque las informaciones son observacionales y no experimentales.

Se adquirieron registros meteorológicos disponibles de la estación meteorológica de Recuay (Ancash – Perú): evaporación, temperatura, velocidad del viento, y humedad relativa; correspondiente al período 2004 – 2012. Se optó por la estación de Recuay porque esta estación tenía las informaciones completas de las variables de investigación.

Las informaciones meteorológicas fueron adquiridas del SENAMHI – Lima, la ubicación de la estación meteorológica de Recuay se indica en la figura 3.1, que se elaboró con el software Arcgis 10.2.1

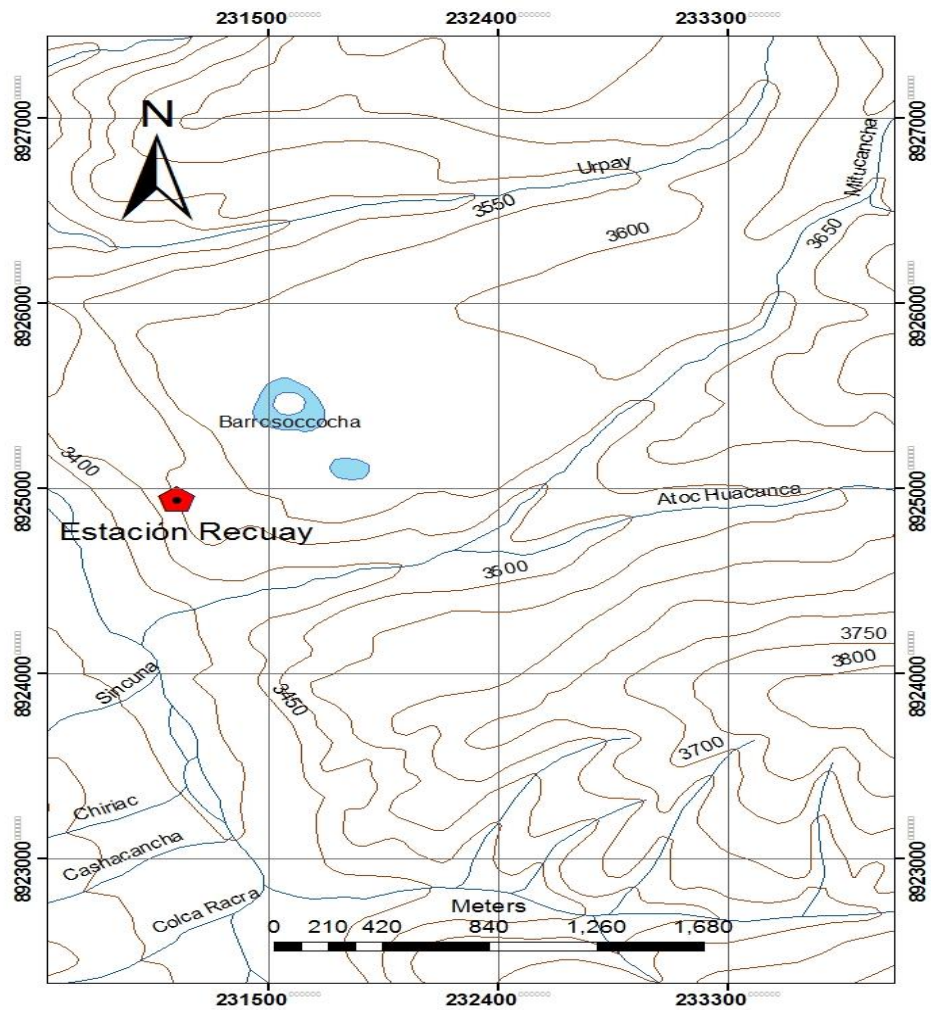


Figura 3.1: Ubicación de la estación meteorológica Recuay

El diseño de la investigación es no experimental - longitudinal. Hernández (2010) indica que en el diseño de investigación no experimental no se hace variar de manera intencional las variables independientes para ver sus efectos sobre otras variables, cuando el diseño de investigación es no experimental se observan los fenómenos tal como ocurren en el contexto natural.

El diseño de investigación longitudinal es aquella en la que las informaciones se recolectan en diferentes tiempos (Hernández, 2010).

3.3 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Las informaciones se adquirieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI): las informaciones meteorológicas de la estación de Recuay: evaporación, temperatura, humedad relativa, y velocidad del viento; correspondiente al período 2004 – 2012.

3.4 PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

La investigación se realizó en dos etapas: análisis estadístico de las informaciones, determinación del coeficiente de transferencia de vapor B, y del coeficiente C de Hamon, y generación de las fórmulas sintéticas para la evaporación en la estación de Recuay, período 2004 – 2012.

3.4.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

El análisis estadístico de las informaciones consistió en completar los datos faltantes, cálculo de las medidas de tendencia central y variabilidad, prueba de análisis de tendencia, y prueba de normalidad.

McCuen (2002) cita el método de Cox – Stuart para realizar el análisis de tendencias de series de tiempo, el mismo que se adecuó tal como se indica:

a) Planteamiento de la hipótesis de tendencia

H_0 : no existe tendencia

H_1 : existe tendencia

- b) Se consideran los datos en la misma secuencia que ocurrieron
- c) Se particionan los datos en pares ordenados (X_i, X_j)
- d) Se determina el signo de la siguiente manera:
Si ($X_j < X_i$, si ($X_j > X_i$, “+”, “-”),”0”)
- e) Se determinan el número de ocurrencias de los signos: $N(+)$, $N(-)$, $N(0)$
- f) Se acepta H_0 si:

$$p(X \geq N(+)) = 1 - p(X \leq (N(+) - 1)) > \alpha \text{ (nivel de significancia)}$$

$p(X \leq (N(+) - 1))$ es la probabilidad acumulada binomial.

La probabilidad de éxito de cada evento que se considera es 0.5

Las fórmulas sintéticas se obtuvieron con el software SPSS 22, y luego se seleccionaron las fórmulas sintéticas que tenían mayor coeficiente de determinación (R^2), menor error estándar de estimación (S_e), y menor valor absoluto del bias.

3.4.2 COEFICIENTE SINTÉTICO DE TRANSFERENCIA DE VAPOR DE AGUA (B)

De la fórmula semianalítica (3.1) para la determinación de la evaporación se obtuvo B por métodos de regresión estadística:

$$E_v = B e_s (1 - H_r) \quad (3.1)$$

La presión de vapor saturado del agua se determinó con la fórmula de (3.2) de Koutsoyiannis:

$$e_s = 612 \exp \left[24.921 \left(1 - \frac{273.2}{T} \right) \right] \left(\frac{273.2}{T} \right)^{5.06} \quad (3.2)$$

Donde:

e_s = presión de vapor de saturado media mensual (Pa)

T = temperatura media mensual (K).

La evaporación (E_v), la humedad relativa (Hr), y la temperatura (T) son informaciones observadas en la estación meteorológica Recuay, período 2004 – 2012, ver los anexos de 02 al 06.

Luego, por análisis de regresión estadística con la fórmula tipo (3.1) se obtuvo el coeficiente sintético de transferencia de vapor de agua (B) empleando el software SPSS 22.

3.4.3 COEFICIENTE SINTÉTICO C DE LA FÓRMULA TIPO HAMON

En analogía con la fórmula de Hamon citada por (Archibald, 2012) se determinó el coeficiente sintético C de la fórmula semianalítica:

$$E_v = Cd_{\text{máx}} \left(\frac{e_s}{T+273} \right) \quad (3.3)$$

Donde:

E_v = evaporación (mm/mes)

C = coeficiente sintético de Hamon

$d_{\text{máx}}$ = duración máxima de la insolación media mensual (horas/día)

e_s = presión de vapor saturado media mensual (Pa)

T = temperatura media mensual (°C)

3.4.4 FÓRMULAS SINTÉTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EVAPORACIÓN

Las fórmulas sintéticas para la determinación de la evaporación se obtuvieron considerando las fórmulas del tipo (3.4):

$$E_v = f(T, H_r, V) \quad (3.4)$$

Donde:

E_v = evaporación (mm/mes)

T = temperatura media mensual (°C)

H_r = humedad relativa media mensual (%)

V = velocidad del viento media (m/s)

Las fórmulas sintéticas para la determinación de la evaporación se obtuvieron mediante el análisis de regresión y correlación estadística con el software SPSS 22.

McCuen (2002) indica que el coeficiente de determinación (R^2) mide la proporción de la variación total de los datos que es explicada por el modelo utilizado.

El error estándar de estimación (S_e) representa una medida de variación en torno a la curva de regresión ajustada (McCuen, 2005).

McCuen (2002) indica que un modelo que sobrestima los valores observados tiene un bias positivo, y un modelo que subestima los valores observados tiene un bias negativo.

Mendenhall (1997) indica que el modelo de mínimos cuadrados puede ajustarse bien a los datos dentro de la gama de valores de x contenidos en la muestra, podría ser un ajuste pobre del verdadero valor para valores de x que están fuera de los valores extremos de la muestra.

IV. RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

4.1.1 COMPLETACIÓN DE LA INFORMACIÓN FALTANTE

Las informaciones faltantes de temperatura media mensual T ($^{\circ}\text{C}$), velocidad de viento media mensual V (m/s), humedad relativa media mensual Hr (%), y evaporación Ev (mm/mes) de la estación de Recuay, período 2004 – 2012; se completaron tomando la media aritmética de las informaciones adyacentes de las informaciones faltantes, las informaciones completadas se indican en negrita en los anexos 02 al 06.

4.1.2 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y DE VARIABILIDAD

En la tabla 4.1 se indican las medidas de tendencia central y variabilidad de la temperatura media mensual T ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa media mensual Hr (%), velocidad de viento media mensual V (m/s) y evaporación Ev (mm/mes) de la estación meteorológica de Recuay - Ancash, correspondiente al período 2004 – 2012.

Tabla 4.1: Medidas de tendencia central y variabilidad de las informaciones meteorológicas mensuales, 2004 – 2012.

| Estadístico | T ($^{\circ}\text{C}$) | Hr (%) | V (m/s) | Ev (mm) |
|---------------------------|----------------------------|----------|-----------|-----------|
| Promedio | 12.4 | 67.0 | 1.5 | 106.7 |
| Desviación estándar | 0.6 | 5.6 | 0.6 | 18.2 |
| Coefficiente de variación | 0.04 | 0.08 | 0.40 | 0.17 |

4.1.3 ANÁLISIS DE TENDENCIA

Se hizo el análisis de tendencia de la temperatura media mensual T (°C), humedad relativa media mensual (%), velocidad media mensual V (m/s), y evaporación (mm/mes) de la estación Recuay, período 2004 – 2012.

Los análisis de tendencia realizados se indican a continuación en las figuras 4.1 al 4.5:

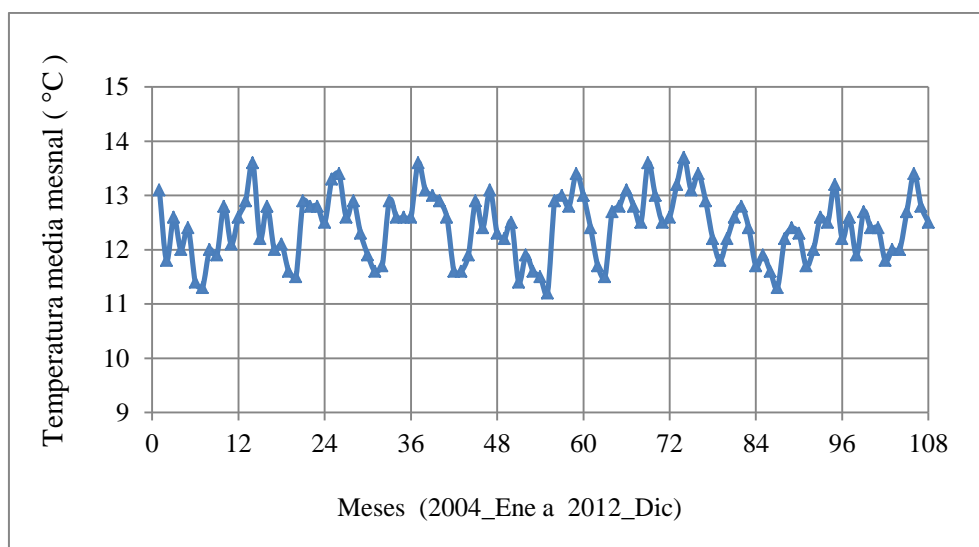


Figura 4.1: Temperatura media mensual (°C) estacionaria – estación meteorológica de Recuay

Según la figura 4.1 la temperatura media mensual de la estación de Recuay no presentan tendencia, para confirmar el análisis gráfico se hizo la prueba de Cox-Stuart, tal como se indica en la tabla 4.3:

Hipótesis:

H₀: no existe tendencia

H₁: existe tendencia

Tabla 4.3: Análisis de la tendencia de la temperatura media mensual
Estación meteorológica de Recuay, 2004 - 2012

| N° | T (°C) | T (°C) | Signo | N° | T (°C) | T (°C) | Signo |
|----|--------|--------|-------|----|--------|--------|-------|
| 1 | 13.1 | 11.2 | - | 28 | 12.9 | 12.8 | - |
| 2 | 11.8 | 12.9 | + | 29 | 12.3 | 12.4 | + |
| 3 | 12.6 | 13 | + | 30 | 11.9 | 11.7 | - |
| 4 | 12 | 12.8 | + | 31 | 11.6 | 11.9 | + |
| 5 | 12.4 | 13.4 | + | 32 | 11.7 | 11.6 | - |
| 6 | 11.4 | 13 | + | 33 | 12.9 | 11.3 | - |
| 7 | 11.3 | 12.4 | + | 34 | 12.6 | 12.2 | - |
| 8 | 12 | 11.7 | - | 35 | 12.6 | 12.4 | - |
| 9 | 11.9 | 11.5 | - | 36 | 12.6 | 12.3 | - |
| 10 | 12.8 | 12.7 | - | 37 | 13.6 | 11.7 | - |
| 11 | 12.1 | 12.8 | + | 38 | 13.1 | 12 | - |
| 12 | 12.6 | 13.1 | + | 39 | 13 | 12.6 | - |
| 13 | 12.9 | 12.8 | - | 40 | 12.9 | 12.5 | - |
| 14 | 13.6 | 12.5 | - | 41 | 12.6 | 13.2 | + |
| 15 | 12.2 | 13.6 | + | 42 | 11.6 | 12.2 | + |
| 16 | 12.8 | 13 | + | 43 | 11.6 | 12.6 | + |
| 17 | 12 | 12.5 | + | 44 | 11.9 | 11.9 | 0 |
| 18 | 12.1 | 12.6 | + | 45 | 12.9 | 12.7 | - |
| 19 | 11.6 | 13.2 | + | 46 | 12.4 | 12.4 | 0 |
| 20 | 11.5 | 13.7 | + | 47 | 13.1 | 12.4 | - |
| 21 | 12.9 | 13.1 | + | 48 | 12.3 | 11.8 | - |
| 22 | 12.8 | 13.4 | + | 49 | 12.2 | 12 | - |
| 23 | 12.8 | 12.9 | + | 50 | 12.5 | 12 | - |
| 24 | 12.5 | 12.2 | - | 51 | 11.4 | 12.7 | + |
| 25 | 13.3 | 11.8 | - | 52 | 11.9 | 13.4 | + |
| 26 | 13.4 | 12.2 | - | 53 | 11.6 | 12.8 | + |
| 27 | 12.6 | 12.6 | 0 | 54 | 11.5 | 12.5 | + |

Número de signos positivos, negativos, y ceros: $N (+) = 26$, $N (-) = 25$,

$N (0) = 3$

Decisión:

Si $p(X \geq N (+)) > 5 \%$ se acepta la hipótesis nula, la probabilidad se refiere a la distribución binomial.

$$p(X \geq N (+)) = 0.6583 > 0.5$$

Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula H_0 , es decir, la temperatura media mensual de la estación de Recuay correspondientes al período 2004 - 2012 no tienen tendencia.

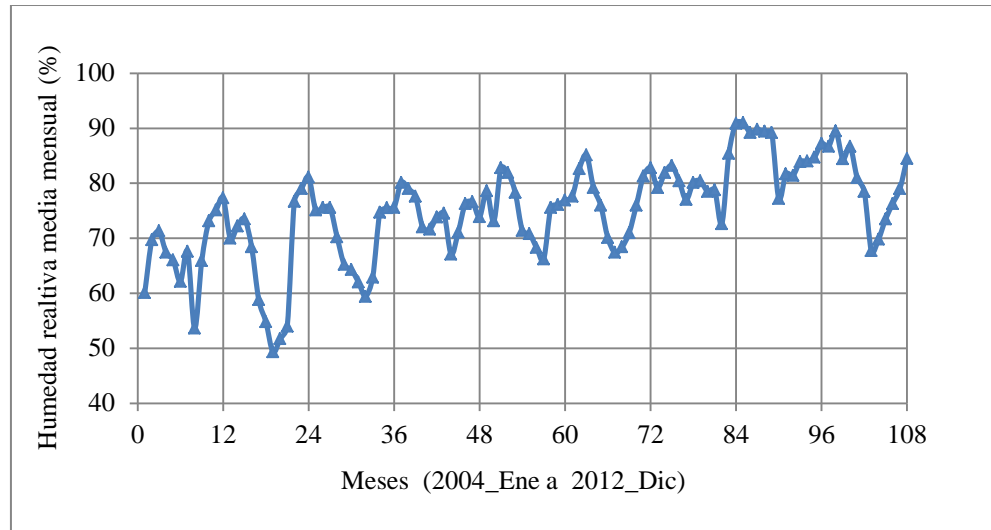


Figura 4.2: Humedad relativa media mensual (%) no estacionaria – estación meteorológica de Recuay.

Como la serie temporal del porcentaje de humedad relativa media mensual según el análisis gráfico tiene tendencia, para confirmar el análisis gráfico se realizó el análisis de tendencia de Cox – Stuart como se indica en la tabla 4.4:

Hipótesis:

H_0 : no existe tendencia

H_1 : existe tendencia

Tabla 4.4: Análisis de la tendencia del % humedad relativa media mensual
Estación meteorológica de Recuay, 2004 - 2012

| N° | % Hr | % Hr | Signo | N° | % Hr | % Hr | Signo |
|----|------|------|-------|----|------|------|-------|
| 1 | 60.1 | 61.5 | + | 28 | 61.0 | 62.9 | + |
| 2 | 69.7 | 59.6 | - | 29 | 57.2 | 72.8 | + |
| 3 | 71.3 | 58.0 | - | 30 | 56.5 | 77.0 | + |
| 4 | 67.4 | 65.2 | - | 31 | 54.7 | 77.1 | + |
| 5 | 66.0 | 65.6 | - | 32 | 52.7 | 75.7 | + |
| 6 | 62.1 | 66.2 | + | 33 | 55.4 | 76.2 | + |
| 7 | 67.6 | 66.8 | - | 34 | 64.5 | 75.9 | + |
| 8 | 53.6 | 70.6 | + | 35 | 65.1 | 75.7 | + |
| 9 | 65.9 | 72.5 | + | 36 | 65.2 | 66.4 | + |
| 10 | 73.1 | 68.0 | - | 37 | 68.7 | 69.9 | + |
| 11 | 75.1 | 65.5 | - | 38 | 67.8 | 69.7 | + |
| 12 | 77.3 | 61.0 | - | 39 | 66.8 | 71.6 | + |
| 13 | 70.0 | 58.9 | - | 40 | 62.4 | 71.7 | + |
| 14 | 72.2 | 59.7 | - | 41 | 62.1 | 72.2 | + |
| 15 | 73.5 | 61.7 | - | 42 | 63.8 | 74.2 | + |
| 16 | 68.4 | 65.5 | - | 43 | 64.4 | 73.8 | + |
| 17 | 58.8 | 69.6 | + | 44 | 58.7 | 75.9 | + |
| 18 | 75.1 | 70.8 | - | 45 | 61.7 | 72.0 | + |
| 19 | 75.6 | 68.0 | - | 46 | 65.8 | 73.8 | + |
| 20 | 75.6 | 70.1 | - | 47 | 66.0 | 69.4 | + |
| 21 | 70.2 | 71.1 | + | 48 | 63.9 | 67.4 | + |
| 22 | 65.2 | 68.9 | + | 49 | 67.5 | 59.1 | - |
| 23 | 64.3 | 66.3 | + | 50 | 63.3 | 60.7 | - |
| 24 | 62.0 | 68.7 | + | 51 | 70.8 | 63.6 | - |
| 25 | 64.8 | 68.9 | + | 52 | 70.1 | 65.8 | - |
| 26 | 65.2 | 67.4 | + | 53 | 67.3 | 67.8 | + |
| 27 | 65.2 | 67.7 | + | 54 | 62.0 | 72.1 | + |

Número de signos positivos, negativos, y ceros: $N(+) = 35$,
 $N(-) = 19$.

Decisión:

Si $p(X \geq N(+)) > 5\%$ se acepta la hipótesis nula, la probabilidad se refiere a la distribución binomial.

$$p(X \geq N(+)) = 0.0201 < 0.05$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula H_0 , es decir, el porcentaje de humedades relativas media mensuales de la estación de Recuay presentan tendencia, por lo que fue necesario estacionarizar esta serie tal como se indica en la figura 4.5:

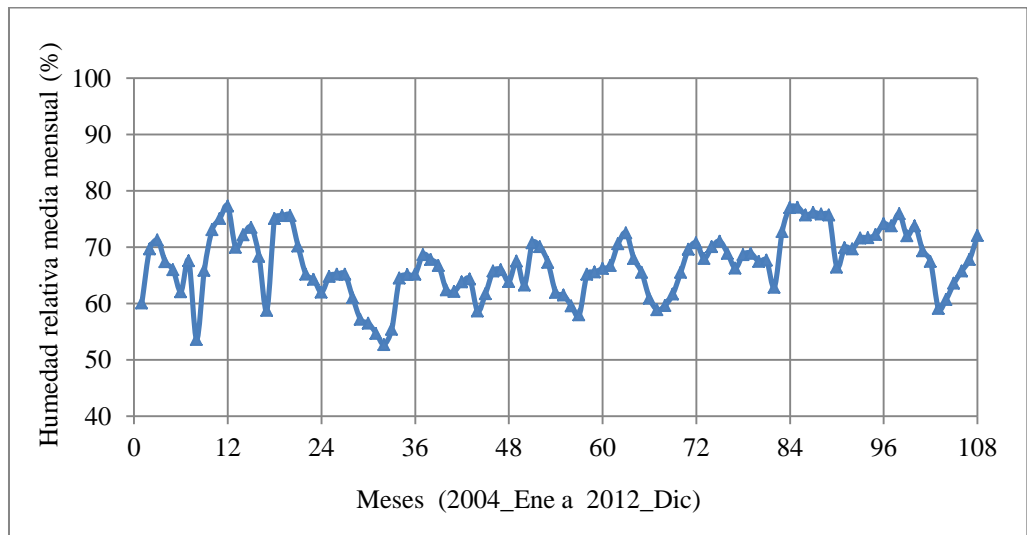


Figura 4.3: Humedad relativa media mensual (%) estacionarizada – estación meteorológica de Recuay.

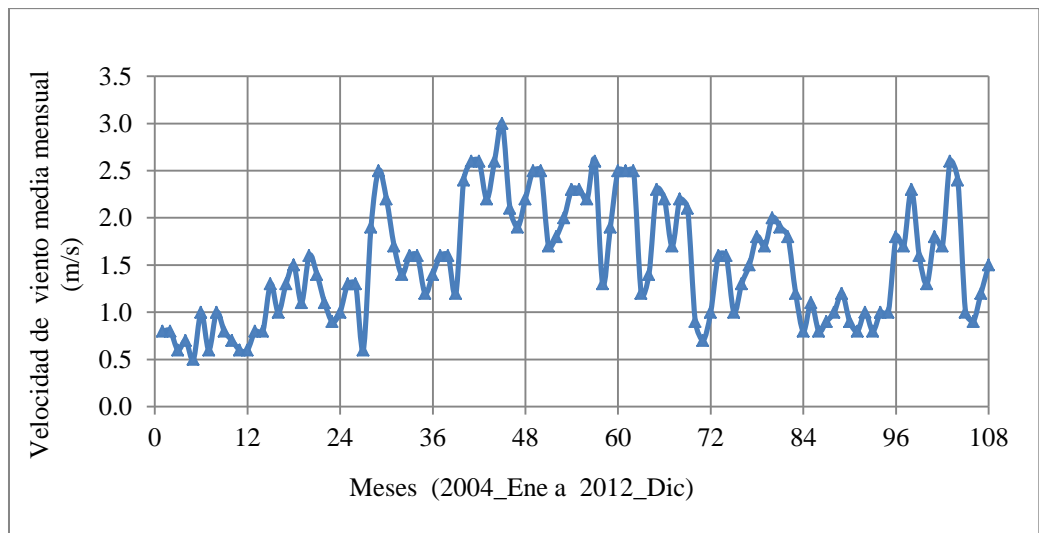


Figura 4.4: Velocidad de viento media mensual (m/s) – estación meteorológica de Recuay.

Según el análisis gráfico la serie temporal de la velocidad del viento media mensual de la estación de Recuay correspondiente al período 2004 – 2012 no tiene una estacionariedad definida, se hizo el análisis de tendencia de Cox – Stuart para determinar si tenía tendencia, tal como se indica en la tabla 4.5:

Hipótesis:

H_0 : no existe tendencia

H_1 : existe tendencia

Tabla 4.5: Análisis de tendencia de la velocidad del viento mensual
Estación meteorológica de Recuay, 2004 - 2012

| N° | V (m/s) | V(m/s) | Signo | N° | V (m/s) | V(m/s) | Signo |
|----|---------|--------|-------|----|---------|--------|-------|
| 1 | 0.8 | 2.3 | + | 28 | 1.9 | 1.8 | - |
| 2 | 0.8 | 2.2 | + | 29 | 2.5 | 1.2 | - |
| 3 | 0.6 | 2.6 | + | 30 | 2.2 | 0.8 | - |
| 4 | 0.7 | 1.3 | + | 31 | 1.7 | 1.1 | - |
| 5 | 0.5 | 1.9 | + | 32 | 1.4 | 0.8 | - |
| 6 | 1 | 2.5 | + | 33 | 1.6 | 0.9 | - |
| 7 | 0.6 | 2.5 | + | 34 | 1.6 | 1 | - |
| 8 | 1 | 2.5 | + | 35 | 1.2 | 1.2 | 0 |
| 9 | 0.8 | 1.2 | + | 36 | 1.4 | 0.9 | - |
| 10 | 0.7 | 1.4 | + | 37 | 1.6 | 0.8 | - |
| 11 | 0.6 | 2.3 | + | 38 | 1.6 | 1 | - |
| 12 | 0.6 | 2.2 | + | 39 | 1.2 | 0.8 | - |
| 13 | 0.8 | 1.7 | + | 40 | 2.4 | 1 | - |
| 14 | 0.8 | 2.2 | + | 41 | 2.6 | 1 | - |
| 15 | 1.3 | 2.1 | + | 42 | 2.6 | 1.8 | - |
| 16 | 1 | 0.9 | - | 43 | 2.2 | 1.7 | - |
| 17 | 1.3 | 0.7 | - | 44 | 2.6 | 2.3 | - |
| 18 | 1.5 | 1 | - | 45 | 3 | 1.6 | - |
| 19 | 1.1 | 1.6 | + | 46 | 2.1 | 1.3 | - |
| 20 | 1.6 | 1.6 | 0 | 47 | 1.9 | 1.8 | - |
| 21 | 1.4 | 1 | - | 48 | 2.2 | 1.7 | - |
| 22 | 1.1 | 1.3 | + | 49 | 2.5 | 2.6 | + |
| 23 | 0.9 | 1.5 | + | 50 | 2.5 | 2.4 | - |
| 24 | 1 | 1.8 | + | 51 | 1.7 | 1 | - |
| 25 | 1.3 | 1.7 | + | 52 | 1.8 | 0.9 | - |
| 26 | 1.3 | 2 | + | 53 | 2 | 1.2 | - |
| 27 | 0.6 | 1.9 | + | 54 | 2.3 | 1.5 | - |

Número de signos positivos, negativos, y ceros: $N(+)=23$, $N(-)=29$, y $N(0)=2$

Decisión:

Si $p(X \geq N(+)) > 5\%$ se acepta la hipótesis nula, la probabilidad se refiere a la distribución binomial.

$$p(X \geq N(+)) = 0.8898 > 0.05$$

Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula H_0 , es decir, la velocidad media mensual del viento no tienen tendencia.

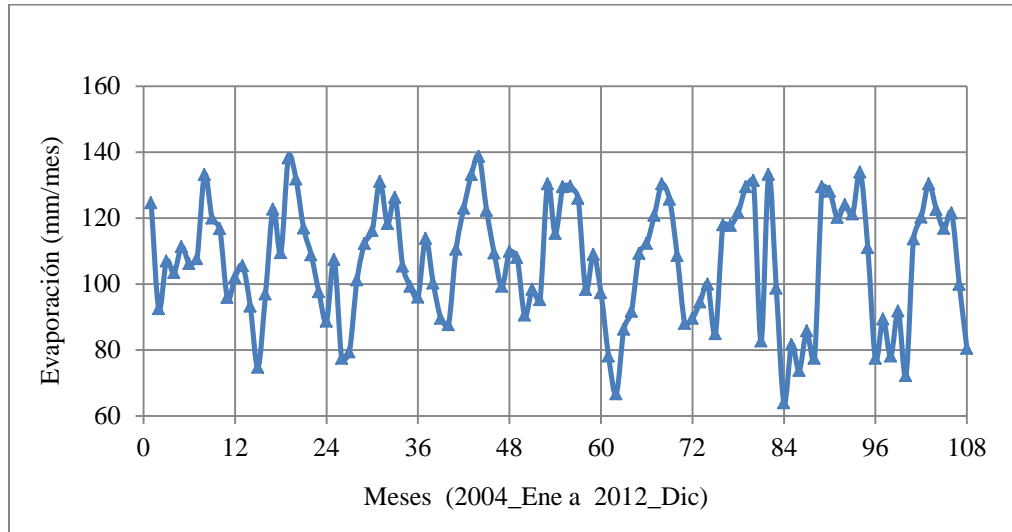


Figura 4.5: Evaporación (mm/mes) estacionaria– estación meteorológica de Recuay

El análisis gráfico de la evaporación (mm/mes) indica que la serie es estacionaria, para corroborar se hizo complementariamente el análisis de tendencia de Cox – Stuart:

Hipótesis:

H_0 : no existe tendencia

H_1 : existe tendencia

Además, se hizo el ajuste periódico de la evaporación para la estación de Recuay en función del tiempo, tal como se expresa con la fórmula (4.1):

$$E_v = 106.7 + 25.5\text{sen}(0.5236t + 3.85) \quad (4.1)$$

Donde:

E_v = evaporación (mm/mes)

t = número de mes, $t = 1$ para enero_2004 hasta $t = 108$ para diciembre_2012

En la figura 4.6 se hace una comparación de la evaporación (mm/mes) observados y simulados con la fórmula (4.1):

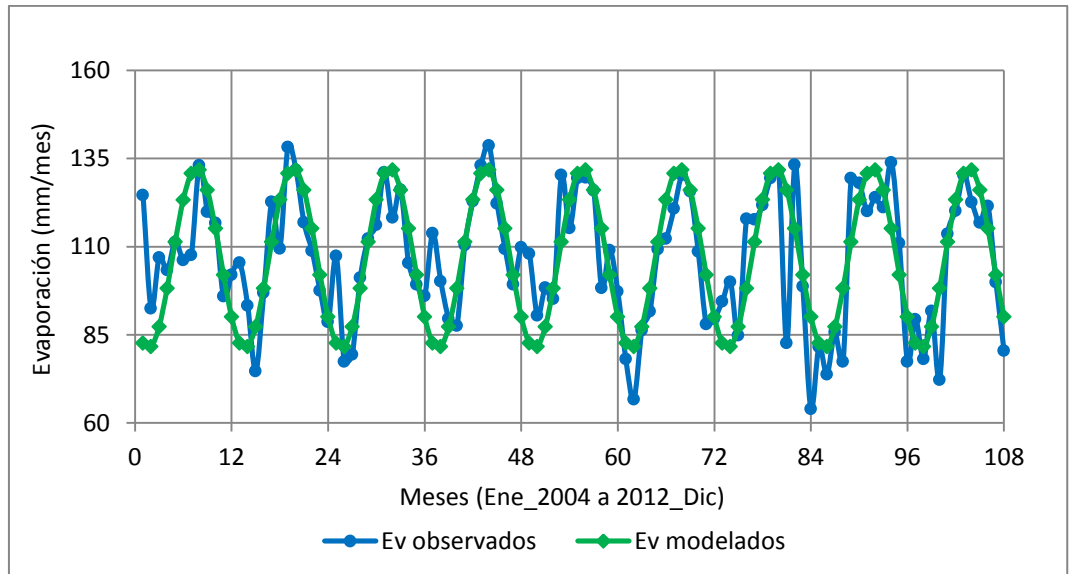


Figura 4.6: Evaporación (mm/mes) en función del número de meses – estación meteorológica de Recuay

En la figura 4.6 se observa que las evaporaciones máximas ocurren en los meses más secos (julio y agosto) y las evaporaciones mínimas en los meses diciembre de cada año. Es decir, las evaporaciones (mm/mes) máximas y mínimas tienen periodicidad anual.

Tabla 4.6: Análisis de tendencia de la evaporación (mm/mes)
Estación meteorológica de Recuay, 2004 - 2012

| N° | Ev | Ev | Signo | N° | Ev | Ev | Signo |
|----|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|
| 1 | 124.6 | 129.4 | + | 28 | 101.2 | 133.2 | + |
| 2 | 92.5 | 129.6 | + | 29 | 112.3 | 98.7 | - |
| 3 | 106.9 | 126 | + | 30 | 116.2 | 64 | - |
| 4 | 103.4 | 98.3 | - | 31 | 131.1 | 81.6 | - |
| 5 | 111.3 | 109 | - | 32 | 118.3 | 73.8 | - |
| 6 | 106.2 | 97.3 | - | 33 | 126.2 | 85.8 | - |
| 7 | 107.6 | 78.1 | - | 34 | 105.4 | 77.4 | - |
| 8 | 133.1 | 66.7 | - | 35 | 99.3 | 129.4 | + |
| 9 | 119.9 | 86.3 | - | 36 | 96 | 128.1 | + |
| 10 | 116.7 | 91.7 | - | 37 | 113.8 | 120.1 | + |
| 11 | 95.9 | 109.3 | + | 38 | 100.2 | 124 | + |
| 12 | 102 | 112.3 | + | 39 | 89.6 | 121.2 | + |
| 13 | 105.5 | 120.8 | + | 40 | 87.6 | 133.9 | + |
| 14 | 93.3 | 130.3 | + | 41 | 110.5 | 111 | + |
| 15 | 74.7 | 125.7 | + | 42 | 122.9 | 77.4 | - |
| 16 | 96.9 | 108.6 | + | 43 | 133.1 | 89.4 | - |
| 17 | 122.7 | 88 | - | 44 | 138.7 | 78.1 | - |
| 18 | 109.5 | 89.6 | - | 45 | 122.3 | 91.8 | - |
| 19 | 138.2 | 94.5 | - | 46 | 109.4 | 72.2 | - |
| 20 | 131.8 | 100 | - | 47 | 99.3 | 113.6 | + |
| 21 | 116.9 | 84.9 | - | 48 | 109.8 | 120.2 | + |
| 22 | 108.8 | 117.9 | + | 49 | 108 | 130.3 | + |
| 23 | 97.6 | 117.7 | + | 50 | 90.5 | 122.6 | + |
| 24 | 88.7 | 121.8 | + | 51 | 98.4 | 116.8 | + |
| 25 | 107.4 | 129.4 | + | 52 | 95.2 | 121.5 | + |
| 26 | 77.4 | 131.4 | + | 53 | 130.3 | 99.9 | - |
| 27 | 79.4 | 82.7 | + | 54 | 115.3 | 80.5 | - |

Número de signos positivos, negativos, y ceros: $N(+) = 29$, $N(-) = 25$, y $N(0) = 0$

Decisión:

Si $p(X \geq N(+)) > 5\%$ se acepta la hipótesis nula, la probabilidad se refiere a la distribución binomial.

$$p(X \geq N(+)) = 0.3417 > 0.05$$

Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula H_0 , es decir, la evaporación (mm/mes) no tienen tendencia.

4.1.4 PRUEBA DE NORMALIDAD

Con el software estadístico SPSS 22 se hizo la prueba de normalidad de todos las informaciones mensuales de: temperatura media mensual T ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa media mensual Hr (%), velocidad del viento media mensual V (m/s), y la evaporación Ev (mm/mes); obteniéndose los resultados que se indican en la tabla 4.2:

Tabla 4.2: Prueba de normalidad de las informaciones meteorológicas mensuales de la estación de Recuay, período 2004 - 2012

| Variables | Prueba de Kolmogorov-Smirnov | | |
|-----------|------------------------------|-----|-------|
| | Estadístico | gl | sig. |
| T | 0.082 | 108 | 0.07 |
| Hr | 0.054 | 108 | 0.20 |
| V | 0.133 | 108 | 0.002 |
| Ev | 0.072 | 108 | 0.20 |

Se observa en la tabla 4.2 que las variables meteorológicas: temperatura media mensual T ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa media mensual estacionarizada (%), y evaporación (mm/mes) se ajustan a la distribución normal ($\text{sig} > 0.05$), y la velocidad media mensual del viento (m/s) no se ajusta a la distribución normal ($\text{sig} < 0.05$) en la estación de Recuay, correspondiente al período 2004 – 2012.

4.2 COEFICIENTE SINTÉTICO DE TRANSFERENCIA DE VAPOR DE AGUA (B)

Para determinar el coeficiente sintético de transferencia de vapor de agua (B) previamente se determinó la presión de vapor saturado del agua (e_s) y los valores de $(1 - \text{Hr})e_s$.

La presión de vapor saturado (e_s) se determinó con la fórmula (4.2) de Koutsoyiannis:

$$e_s = 612 \exp \left[24.921 \left(1 - \frac{273.2}{T} \right) \right] \left(\frac{273.2}{T} \right)^{5.06} \quad (4.2)$$

Donde e_s = la presión de vapor saturado (Pa) y T = temperatura media mensual (K)

Para determinar el coeficiente sintético de transferencia de vapor de agua (B) en la formula (4.3) se hizo el análisis de regresión de $(1 - \text{Hr})e_s$ y evaporación E_v (mm/mes) con el software SPSS 22, determinándose B igual a 0.222 de modo que la fórmula semianalítica (4.3) para la determinación de la evaporación queda expresada como:

$$E_v = 0.222 e_s (1 - \text{Hr}) \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0.968$$

$$S_e = 19.534 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = -2.00 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

H_r = humedad relativa media mensual (decimal)

e_s = presión de vapor saturado del agua media mensual (Pa) determinada con la fórmula de Koutsoyiannis

R^2 = coeficiente de determinación

S_e = error estándar de estimación (mm)

En la figura 4.7 se hace la comparación de la evaporación de agua (mm/mes) observada y generada por la fórmula semianalítica (4.3):

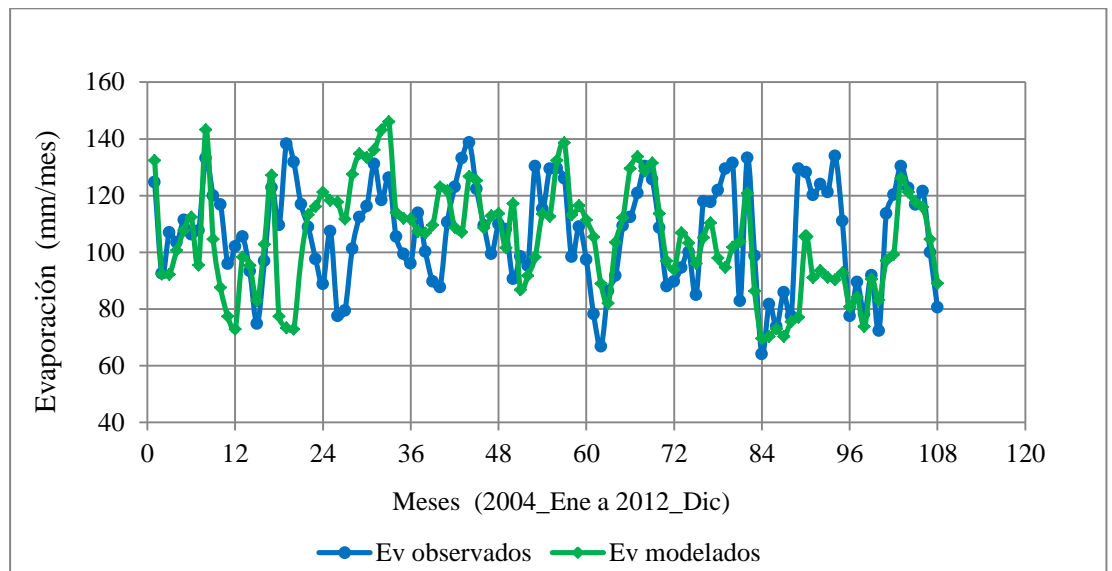


Figura 4.7: Evaporación (mm/mes) observada y generada semianalíticamente con la fórmula (4.4), estación meteorológica Recuay.

4.3 COEFICIENTE SINTÉTICO DE LA FÓRMULA TIPO HAMON

Para determinar el coeficiente sintético de la fórmula semianalítica tipo Hamon se determinaron: el ángulo de declinación solar mensual (δ), el ángulo de radiación a la hora de puesta del sol (W_s), y la duración máxima de insolación (D) correspondiente a la estación de Recuay - Ancash, tal se indica en la tabla 4.8:

Fórmula de tipo Hamon:

$$E_v = C d_{m\acute{a}x} \left(\frac{2.165e_s}{T+273} \right) \quad (4.4)$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

C = coeficiente sintético de Hamon

$d_{m\acute{a}x}$ = duración máxima de la insolación media mensual (horas/día)

e_s = presión de vapor saturado del agua media mensual (Pa)

T = temperatura media mensual ($^{\circ}C$)

Tabla 4.8: Duración máxima de insolación media mensual $d_{m\acute{a}x}$ (horas/día) en la estación Recuay (Ancash – Perú)

| Descripción | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|-----------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| δ (rad) | -0.364 | -0.249 | -0.042 | 0.147 | 0.328 | 0.377 | 0.368 | 0.232 | 0.021 | -0.172 | -0.335 | -0.403 |
| W_s (rad) | 1.636 | 1.614 | 1.578 | 1.545 | 1.512 | 1.503 | 1.505 | 1.530 | 1.567 | 1.601 | 1.630 | 1.644 |
| $d_{m\acute{a}x}$ (h) | 12.50 | 12.33 | 12.05 | 11.81 | 11.55 | 11.48 | 11.50 | 11.69 | 11.97 | 12.23 | 12.45 | 12.56 |

La latitud de la estación meteorológica de Recuay es igual a - 0.1696 radianes

Después con el software SPSS 22 se obtuvo el coeficiente C de Hamon de la fórmula semianalítica (4.5):

$$E_v = C d_{m\acute{a}x} \left(\frac{2.16e_s}{T+273} \right) \quad (4.5)$$

Obteniéndose el coeficiente sintético de Hamon igual a $C = 0.815$, la fórmula tipo Hamon para la estación meteorológica de Recuay se expresa como se indica en fórmula (4.6):

$$E_v = 0.815 d_{\text{máx}} \left(\frac{2.165 e_s}{T+273} \right) \quad (4.6)$$

$$R^2 = 0.962$$

$$S_e = 21.132 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = -0.658 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

$d_{\text{máx}}$ = duración máxima de la insolación media mensual (horas/día)

e_s = presión de vapor saturado media mensual (Pa)

T = temperatura media mensual (°C)

R^2 = coeficiente de determinación

S_e = Error estándar de estimación (mm)

En la figura 4.8 se indican la evaporación (mm/mes) observada y generada con la fórmula semianalítica tipo Hamon (4.6):

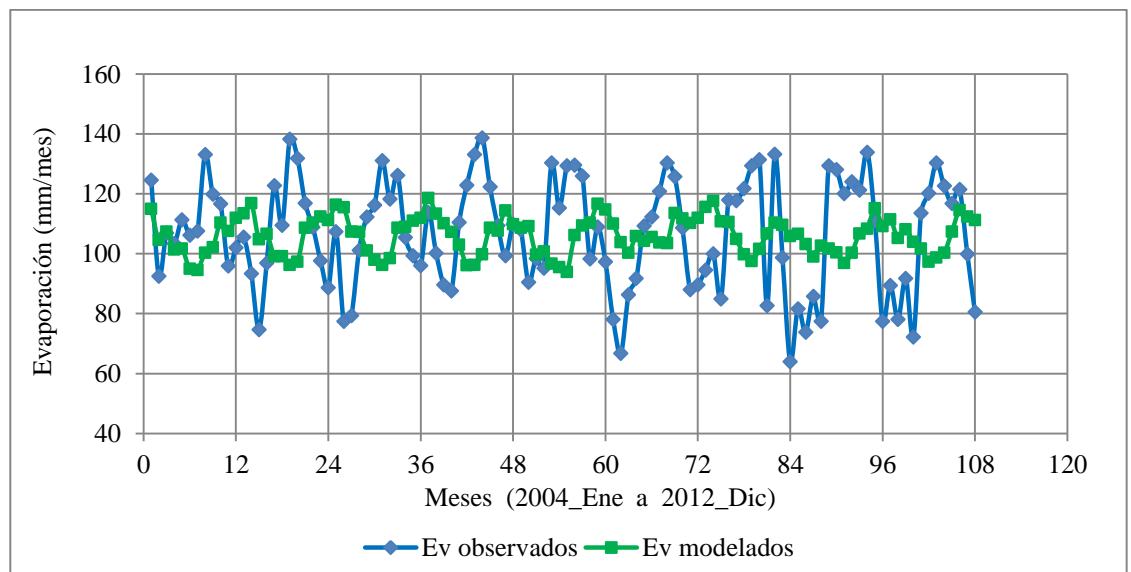


Figura 4.8: Evaporación (mm/mes) observada y generada con la fórmula semianalítica tipo Hamon (4.5), estación meteorológica Recuay.

4.4 FÓRMULAS SINTÉTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EVAPORACIÓN

Las fórmulas sintéticas significativas para la determinación de la evaporación se indican:

FÓRMULA SINTÉTICA 1

$$E_v = 7.687T + 7.151V \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0.970$$

$$S_e = 18.774 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = - 0.266 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

T = temperatura mensual (°C)

V = velocidad del viento (m/s)

R^2 = coeficiente de determinación

S_e = error estándar de estimación (mm)

En la figura 4.9 se hace la comparación de la evaporación observada y la modelada con la fórmula sintética 1:

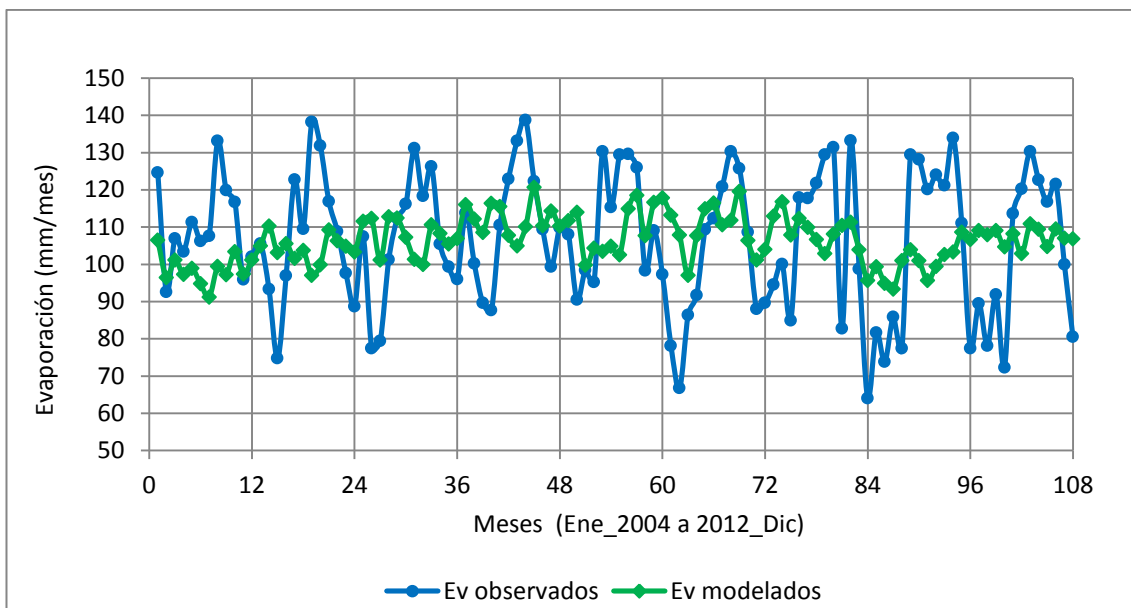


Figura 4.9: Evaporación (mm/mes) observada y generada con la fórmula sintética 1

FÓRMULA SINTÉTICA 2

$$E_v = 11.587T - 0.564H_r \quad (4.8)$$

$$R^2 = 0.970$$

$$Se = 18.926 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = -0.004 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación (mm/mes)

T = temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)

H_r = humedad relativa media mensual (%)

e_s = presión de vapor saturado media mensual (kPa)

R^2 = coeficiente de determinación

Se = error estándar de estimación (mm)

En la figura 4.10 se hace la comparación de las evaporaciones (mm/mes) observadas y las modeladas con fórmula sintética 2:

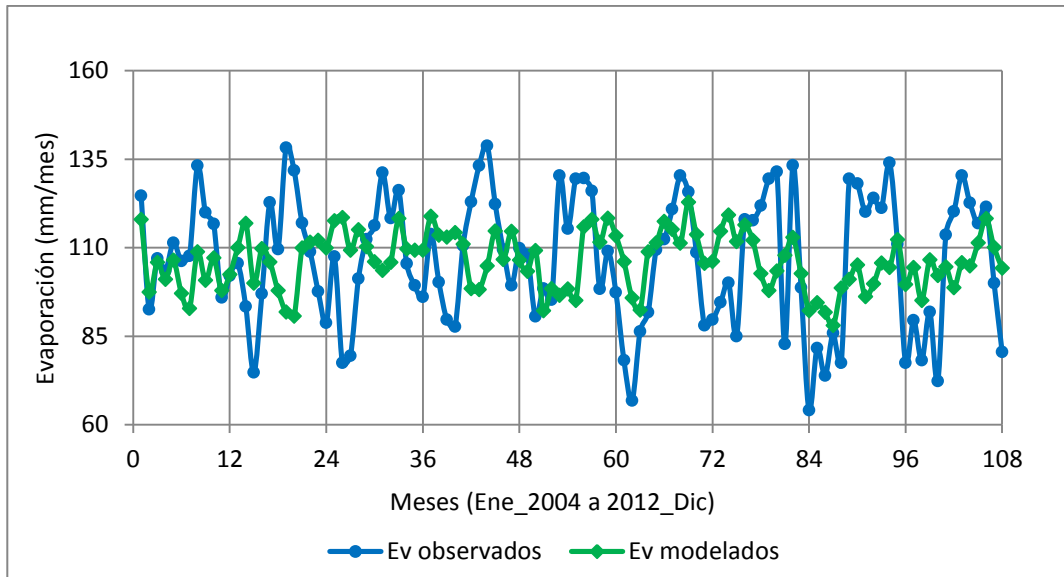


Figura 4.10: Evaporación (mm/mes) observada y generada con la fórmula sintética 2

V. DISCUSIÓN

5.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

5.1.1 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y VARIABILIDAD

Las informaciones meteorológicas de la estación de Recuay correspondientes al período 2004 – 2012, tienen las siguientes características según sus medidas de tendencia central y variabilidad:

La temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$), la humedad relativa media mensual (%), y la evaporación (m/mes) tienen menor coeficiente de variación de 0.04, 0.108, y 0.17 respectivamente. La velocidad media mensual del viento (m/s) tiene mayor coeficiente de variación igual a 0.4.

5.1.2 ANÁLISIS DE TENDENCIA

La temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$), velocidad de viento media mensual (m/s) y la evaporación (mm/mes) no tienen tendencia creciente, la humedad relativa media mensual (%) tiene una tendencia creciente; por eso, se hizo la corrección para transformarla en una serie estacionaria.

La evaporación mensual de la estación de Recuay tiene comportamiento periódico, con media igual a 106.7 mm, amplitud de 25.5 mm, período de 12 meses y un ángulo de fase de 3.85 radianes.

5.1.3 ANÁLISIS DE NORMALIDAD

Según la prueba de Kolmogorov – Smirnov realizada con el software SSPS 22, la temperatura media mensual (°C), la humedad relativa media mensual estacionarizada (%), y la evaporación (mm/mes) se ajustan a la distribución normal; y la velocidad media mensual del viento (m/s) no se ajusta a la distribución normal.

5.2 COEFICIENTE SINTÉTICO DE TRANSFERENCIA DE VAPOR DE AGUA (B)

El coeficiente sintético de transferencia de vapor de agua B obtenido para el caso de la estación de Recuay es igual a 0.222, según Chow (1994) varía de un lugar a otro, de tal manera que la fórmula para la determinación de la evaporación queda como:

$$E_v = 0.222e_s(1 - H_r) \quad (5.1)$$

$$R^2 = 0.968$$

$$S_e = 19.534 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = -2.00 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

H_r = humedad relativa media mensual (decimal)

e_s = presión de vapor saturado media mensual (Pa) determinada con la fórmula de Koutsoyiannis

R^2 = coeficiente de determinación

S_e = error estándar de estimación (mm)

El coeficiente de determinación (R^2) indica que 96.8 % de la variación total de la evaporación (mm/mes) observada en la estación de Recuay es explicada por la fórmula (5.1)

5.3 COEFICIENTE SINTÉTICO C DE LA FÓRMULA TIPO HAMON

El coeficiente de la fórmula semianalítica tipo Hamon (C) para la estación de Recuay es igual a 0.815, quedando la fórmula semianalítica tipo Hamon para el caso de la estación de Recuay como:

$$E_v = 0.815d_{m\acute{a}x} \left(\frac{2.165e_s}{T+273} \right) \quad (5.2)$$

$$R^2 = 0.962$$

$$Se = 21.132 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = - 0.658 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

D = duración máxima de la insolación media mensual (horas/día)

e_s = presión de vapor saturado media mensual (Pa)

T = temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)

R^2 = coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación (R^2) indica que 96.2 % de la variación total de la evaporación (mm/mes) observada en la estación de Recuay es explicada por el la fórmula (5.2)

5.4 FÓRMULAS SINTÉTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EVAPORACIÓN

Las fórmulas sintéticas que se indican para la estación de Recuay se generaron para los siguientes rangos de las variables meteorológicas:

Temperatura media mensual de 11.2 a 13.7 °C

Humedad relativa media mensual de 52.7 a 77.3 %

FÓRMULA SINTÉTICA 1

$$E_v = 7.687T + 7.151V \quad (5.3)$$

$$R^2 = 0.970$$

$$S_e = 18.774 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = -0.266 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación (mm/mes)

T = temperatura media mensual (°C)

H_r = humedad relativa media mensual (%)

V = velocidad del viento (m/s)

R^2 = coeficiente de determinación

S_e = error estándar de estimación (mm)

Se observa que existe relación directa de la temperatura media mensual y la velocidad media mensual del viento con la evaporación (mm/mes), la cual es compatible con lo que Raghunath (2006) indica que la evaporación aumenta cuando la temperatura y velocidad del viento aumentan.

El coeficiente de determinación (R^2) indica que 97.1 % de la variación total de la evaporación observada en la estación de Recuay es explicada por la fórmula (5.3).

FÓRMULA SINTÉTICA 2

$$E_v = 11.587T - 0.564H_r \quad (5.4)$$

$$R^2 = 0.970$$

$$S_e = 18.926 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = - 0.004 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

T = temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)

H_r = Humedad relativa media mensual (%)

R^2 = coeficiente de determinación

S_e = error estándar de estimación (mm)

Según los indicadores estadísticos las fórmulas por orden de prelación son las siguientes que se utilizarán como metodología para la determinación de la evaporación: (5.3), (5.1), (5.4), y (5.2). Sin embargo, como la fórmula semianalítica tiene mayor grado de generalización se puede utilizar la fórmula semianalítica (5.1) y la fórmula sintética (5.3).

Con la fórmula (4.1) se puede hacer una buena estimación de la evaporación (mm/mes) función del número de meses.

Las fórmulas semianalíticas y sintéticas obtenidas tienen bias negativas, que según McCuen (2002) indican que las fórmulas obtenidas subestiman los valores de la evaporación (mm/mes) en la estación de Recuay.

Es importante tener en consideración que las regresiones que se realizaron para obtener las fórmulas semianalíticas y sintéticas son a través del origen, es decir, sin intercepción, en estos casos, el coeficiente de determinación (R^2) mide la proporción de la variabilidad en la variable dependiente sobre el origen, explicado por el modelo. No puede compararse con el coeficiente de determinación (R^2) de los modelos que incluyen intercepto.

VI. CONCLUSIONES

Las conclusiones relevantes del trabajo de investigación son:

1. La temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$), la humedad media mensual estacionarizada (%), y la evaporación (mm/mes) en la estación de Recuay, período 2004 - 2012 se ajustan a la distribución de probabilidades normal, pero la velocidad media mensual no se ajusta a la distribución de probabilidad normal.

La temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$), la velocidad de viento media mensual (m/s) y la evaporación (mm/mes) en la estación de Recuay, período 2004 – 2012 no tienen tendencia, es decir, son estacionarias. En cambio, la humedad relativa mensual (%) tiene tendencia por lo que se corrigió para transformarla a una serie estacionaria.

La evaporación (mm/mes) de la estación Recuay tiene comportamiento periódico de 12 meses, media igual 106.7 mm, amplitud igual a 25.5 mm, y ángulo de fase de 3.85 radianes.

2. El coeficiente sintético de transferencia de vapor de agua (B) tiene un valor determinado para cada lugar, para el caso de la estación meteorológica de Recuay su valor es igual a 0.222.

La fórmula semianalítica para determinar la evaporación en la estación de Recuay está dada por la fórmula (6.1):

$$E_v = 0.222e_s(1 - Hr) \quad (6.1)$$

$$R^2 = 0.968$$

$$S_e = 19.534 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = - 2.00 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

H_r = humedad relativa media mensual (decimal)

e_s = presión de vapor saturado media mensual (Pa) determinada con la fórmula de Koutsoyiannis

R^2 = coeficiente de determinación

S_e = error estándar de estimación (mm)

3. El coeficiente sintético de la fórmula semianalítica tipo Hamon es $C = 0.815$ expresándose la fórmula semianalítica tipo Hamon así:

$$E_v = 0.815d_{\text{máx}} \left(\frac{2.165e_s}{T+273} \right) \quad (6.2)$$

$$R^2 = 0.962$$

$$S_e = 21.132 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = -0.658 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

$d_{\text{máx}}$ = duración máxima de la insolación media mensual (horas/día)

e_s = presión de vapor saturado mensual (Pa)

T = temperatura media mensual (°C)

R^2 = coeficiente de determinación

4. Para la estación meteorológica de Recuay se tienen las siguientes fórmulas sintéticas:

FÓRMULA SINTÉTICA 1:

$$E_v = 7.687T + 7.151V \quad (6.3)$$

$$R^2 = 0.970$$

$$S_e = 18.774 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = -0.266 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

T = temperatura media mensual (°C)

V = velocidad media mensual del viento (m/s)

R^2 = coeficiente de determinación

S_e = error estándar de estimación (mm)

FÓRMULA SINTÉTICA 2:

$$E_v = 11.587T - 0.564H_r \quad (6.4)$$

$$R^2 = 0.970$$

$$S_e = 18.926 \text{ mm}$$

$$\text{Bias} = -0.004 \text{ mm}$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

T = temperatura media mensual (°C)

H_r = humedad relativa media mensual (decimal)

R^2 = coeficiente de determinación

S_e = error estándar de estimación (mm)

Según los indicadores estadísticos las fórmulas por orden de prelación que se pueden utilizar como metodología para la determinación de la evaporación son:

(6.3), (6.1), (6.4), y (6.2). Por su mayor generalización de la fórmula semianalítica se puede utilizar preferiblemente la fórmula (6.1):

$$E_v = 0.222e_s(1 - Hr)$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

H_r = humedad relativa media mensual (decimal)

e_s = la presión de vapor saturado (Pa), dada por la fórmula de Koutsoyiannis:

$$e_s = 612 \exp \left[24.921 \left(1 - \frac{273.2}{T} \right) \right] \left(\frac{273.2}{T} \right)^{5.06}$$

T = temperatura media mensual (K)

Además se puede utilizar la fórmula sintética (6.3):

$$E_v = 7.687T + 7.151V$$

Donde:

E_v = evaporación de agua (mm/mes)

T = temperatura media mensual (°C)

V = velocidad media mensual del viento (m/s)

VII. RECOMENDACIONES

1. Para la determinación de la evaporación (mm/mes) se puede utilizar la fórmula semianalítica que se indica, con la condición que la humedad relativa media mensual varíe de 52.7 a 77.3 %, y la temperatura media mensual varíe de 11.2 a 13.7 °C:

$$E_v = 0.222e_s(1 - Hr)$$

Donde: E_v es la evaporación (mm/mes), H_r es la humedad relativa media mensual (decimal), e_s = la presión de vapor saturado (Pa) que está en función de la temperatura media mensual, y se determina con la fórmula de Koutsoyiannis.

También se puede utilizar la fórmula sintética:

$$E_v = 7.687T + 7.151V$$

Donde: E_v es la evaporación (mm/mes), T es la temperatura media mensual (°C) y V es la velocidad del viento media mensual (m/s).

Asimismo, se puede utilizar la fórmula periódica sintética:

$$E_v = 106.7 + 25.5\text{sen}(0.5236t + 3.85)$$

Donde:

E_v = evaporación (mm/mes)

t = número del mes $t = 1$ para enero

2. Las fórmulas obtenidas en esta tesis deben falsarse aplicándolas a otras estaciones meteorológicas. Todo conocimiento fáctico es probable, contingente y particular.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Roma: FAO.
- Archibald, J. (2012). *Applying the Priestley – Taylor PET equations without radiation measurements*. Poster, Cornell University, USA. http://fallmeeting.agu.org/2012/files/2012/12/AGU2012_ET_foursites.pdf.
- Bras, R. (1990). Hydrology. USA: Addison – Wesley Publishing Company, Inc.
- Carrasco, D. (2013). Metodología de la investigación científica. Lima: editorial San Marcos.
- Cengel, Y. (2011). Transferencia de calor y masa. México: McGrawHill.
- Chang, R. (1999). Química. México: McGrawHill.
- Chow, V.T., Maidment, D., Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. Colombia: McGraw – Hill.
- Cong, Z. (2009). *Does the evaporation paradox exist in China?* Hydrology and Earth System Sciences: 13: 357 – 366.
- Davie, T. (2002). Fundamentals of Hydrology. New York: Routledge.
- Dingman, S. (2002). Physical hydrology. USA: Waveland press, inc.
- Giancoli, D. (1997). Física, principios con aplicaciones. México: Prentice Hall.
- Hernandez, R. (2010). Metodología de la investigación. México: editorial McGraw Hill
- Huapaya, Y. (2013). *Regionalización de la evapotranspiración en función las variables meteorológicas en zona circunlascustre del Titicaca Peruano*. Revista de Investigaciones Altoandinas: 16 (1), 117-124.
- Kessler, A, Monheim, F. (1966). *Balance hidrológico del lago Titicaca, una contribución al aprovechamiento de sus aguas*. 23 mayo 2015, Instituto de Meteorología y Climatología, sitio web: <http://www.cva.itesm.mx>.
- Koutsoyiannis, D. (2012). *Clausius - Clapeyron equation and saturation vapour pressure: simple theory reconciled with practice*. European Journal of Physics: 33(2), 295-305.
- Manrique, J. (1984). Energía Solar. México: Harla.

- Mccuen, R. (2002). *Modeling Hydrologic Change*. New York: Lewis Publishers.
- Mccuen, R. (2005). *Hydrologic analysis and design*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Mendenhall, W. (1997). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Prentice Hall.
- Morán, G. (2010). *Métodos de investigación*. México: editorial Pearson.
- Levenspiel, O. (1997). *Fundamentos de termodinámica*. México: Prentice Hall.
- Linsley, R, Kohler, M, Paulhus, J. (1994). *Hidrología para ingenieros*. México: McGraw-Hill.
- Luna, P. (2015). *Esferas de polietileno contra la sequía en Chile*. 20 mayo 2015, Técnica Industrial 312, sitio web: <http://www.tecnicaindustrial.es>.
- Potter, M. (1998). *Mecánica de fluidos*. México: Prentice Hall.
- Raghunath, H. (2006). *Hydrology*. New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers.
- Shames, I. (1995). *Mecánica de fluidos*. Colombia: McGrawHill
- Singh, V. (1997). *Sensitivity of mass transfer based evaporation equations to errors in daily and monthly input data*. *Hydrology Process*: 11: 1465 - 1473.
- Streeter, V. (1997). *Mecánica de fluidos*. México: McGrawHill.
- Tanny, J, Colen, S, Assouline, S. (2008). *Evaporation from a small water reservoir: direct measurements and estimates*. *Journal of Hydrology*: 351, 218– 229.
- Wang, J., Salvucci, G., Bras, R. (2004). *An extremum of evaporation*. *Water Resources Resources*. 10 abril 2005, <http://www.cva.itesm.mx>
- White, F. (2008). *Mecánica de fluidos*. México: McGrawHill

IX. ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Anexo 2. Temperatura media mensual de la estación meteorológica de Recuay

Anexo 3. Velocidad de viento media mensual de la estación meteorológica de Recuay

Anexo 4. Humedad relativa media mensual de la estación meteorológica de Recuay

Anexo 5. Humedad relativa media mensual estacionarizada de la estación meteorológica de Recuay

Anexo 6. Evaporación mensual de la estación meteorológica de Recuay

ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EVAPORACIÓN, CASO: ESTACIÓN METEOROLÓGICA RECUAY, PERÍODO 2004 – 2012

| Preguntas de investigación | Objetivos de la investigación | Hipótesis de investigación | Variables de investigación |
|---|--|---|---|
| <p style="text-align: center;">Pregunta general</p> <p>¿Se puede proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 - 2012?</p> <p style="text-align: center;">Preguntas específicas</p> <p>1. ¿Se pueden obtener los coeficientes sintéticos de transferencia de vapor de agua (B), y el coeficiente C de la fórmula tipo Hamon para proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación de Recuay, período 2004 - 2012?</p> <p>2. ¿Se pueden obtener fórmulas sintéticas para proponer una metodología para la determinación de la evaporación en función de la temperatura, velocidad del viento, y la humedad relativa, caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 – 2012?</p> | <p style="text-align: center;">Objetivo general</p> <p>Proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 - 2012.</p> <p style="text-align: center;">Objetivos específicos</p> <p>1. Obtener los coeficientes sintéticos de transferencia de vapor de agua (B), y el coeficiente C de la fórmula tipo Hamon para proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: la estación de Recuay, período 2004 – 2012.</p> <p>2. Generar fórmulas sintéticas para proponer una metodología para la determinación de la evaporación en función de la temperatura, velocidad del viento, y la humedad relativa, caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 – 2012.</p> | <p style="text-align: center;">Hipótesis general</p> <p>Se propondría una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación meteorológica de Recuay, período 2004 – 2012.</p> <p style="text-align: center;">H₁: Hipótesis 1</p> <p>Se obtendrían los coeficientes sintéticos de transferencia de vapor de agua (B) y el coeficiente C de la fórmula tipo Hamon para proponer una metodología para la determinación de la evaporación, caso: estación de Recuay, período 2004 – 2012.</p> <p style="text-align: center;">H₂: Hipótesis 2</p> <p>Se generarían fórmulas sintéticas para proponer una metodología para la determinación de la evaporación en función de la temperatura, velocidad del viento, y la humedad relativa, caso: estación de Recuay, 2004 – 2012.</p> | <p style="text-align: center;">Variable correlacional</p> <p style="text-align: center;">X</p> <p style="text-align: center;">Evaporación</p> <p style="text-align: center;">Variables correlacionales</p> <p style="text-align: center;">Y</p> <p>Temperatura, velocidad de viento, humedad relativa atmosféricos</p> |

ANEXO 2. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C)

Estación: Recuay/000441/DRE-04

Longitud: 77°27'W

Latitud: 09°43'S

Altitud: 3444 msnm

Región: Ancash

Provincia: Recuay

Distrito: Recuay

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2004 | 13.1 | 11.8 | 12.6 | 12.0 | 12.4 | 11.4 | 11.3 | 12.0 | 11.9 | 12.8 | 12.1 | 12.6 |
| 2005 | 12.9 | 13.6 | 12.2 | 12.8 | 12.0 | 12.1 | 11.6 | 11.5 | 12.9 | 12.8 | 12.8 | 12.5 |
| 2006 | 13.3 | 13.4 | 12.6 | 12.9 | 12.3 | 11.9 | 11.6 | 11.7 | 12.9 | 12.6 | 12.6 | 12.6 |
| 2007 | 13.6 | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.6 | 11.6 | 11.6 | 11.9 | 12.9 | 12.4 | 13.1 | 12.5 |
| 2008 | 12.2 | 12.5 | 11.4 | 11.9 | 11.6 | 11.5 | 11.2 | 12.4 | 13.0 | 12.8 | 13.4 | 13.0 |
| 2009 | 12.4 | 11.7 | 11.5 | 12.7 | 12.8 | 13.1 | 12.8 | 12.5 | 13.6 | 13.0 | 12.5 | 12.6 |
| 2010 | 13.2 | 13.7 | 13.1 | 13.4 | 12.9 | 12.2 | 11.8 | 12.2 | 12.6 | 12.8 | 12.4 | 11.7 |
| 2011 | 11.9 | 11.6 | 11.3 | 12.2 | 12.4 | 12.3 | 11.7 | 12.0 | 12.6 | 12.5 | 13.2 | 12.2 |
| 2012 | 12.6 | 11.9 | 12.7 | 12.4 | 12.4 | 11.8 | 12.0 | 12.0 | 12.7 | 13.4 | 12.8 | 12.5 |

Fuente: SENAMHI, Oficina General de Estadística e Informática, 2014

Prohibida su reproducción parcial o total

Nota: en negrita información completada

ANEXO 3. VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA MENSUAL (m/s)

Estación: Recuay/000441/DRE-04

Longitud: 77°27'W

Latitud: 09°43'S

Altitud: 3444 msnm

Región: Ancash

Provincia: Recuay

Distrito: Recuay

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|------------|------------|-----|
| 2004 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 0.7 | 0.5 | 1.0 | 0.6 | 1.0 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.6 |
| 2005 | 0.8 | 0.8 | 1.3 | 1.0 | 1.3 | 1.5 | 1.1 | 1.6 | 1.4 | 1.1 | 0.9 | 1.0 |
| 2006 | 1.3 | 1.3 | 0.6 | 1.9 | 2.5 | 2.2 | 1.7 | 1.4 | 1.6 | 1.6 | 1.2 | 1.4 |
| 2007 | 1.6 | 1.6 | 1.2 | 2.4 | 2.6 | 2.6 | 2.2 | 2.6 | 3.0 | 2.1 | 1.9 | 2.2 |
| 2008 | 2.5 | 2.5 | 1.7 | 1.8 | 2.0 | 2.3 | 2.3 | 2.2 | 2.6 | 1.3 | 1.9 | 2.5 |
| 2009 | 2.5 | 2.5 | 1.2 | 1.4 | 2.3 | 2.2 | 1.7 | 2.2 | 2.1 | 0.9 | 0.7 | 1.0 |
| 2010 | 1.6 | 1.6 | 1.0 | 1.3 | 1.5 | 1.8 | 1.7 | 2.0 | 1.9 | 1.8 | 1.2 | 0.8 |
| 2011 | 1.1 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.2 | 0.9 | 0.8 | 1.0 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.3 |
| 2012 | 1.7 | 2.3 | 1.6 | 1.3 | 1.8 | 1.7 | 2.6 | 2.4 | 1.0 | 0.9 | 1.2 | 1.5 |

Fuente: SENAMHI, Oficina General de Estadística e Informática, 2014

Prohibida su reproducción parcial o total

Nota: en negrita información completada

ANEXO 4. HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL (%)

Estación: Recuay/000441/DRE-04

Longitud: 77°27'W

Latitud: 09°43'S

Altitud: 3444 msnm

Región: Ancash

Provincia: Recuay

Distrito: Recuay

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2004 | 60.1 | 69.7 | 71.3 | 67.4 | 66.0 | 62.1 | 67.6 | 53.6 | 65.9 | 73.1 | 75.1 | 77.3 |
| 2005 | 70.0 | 72.2 | 73.5 | 68.4 | 58.8 | 54.8 | 49.5 | 51.7 | 54.0 | 76.7 | 79.0 | 81.1 |
| 2006 | 75.1 | 75.6 | 75.6 | 70.2 | 65.2 | 64.3 | 62.0 | 59.4 | 62.9 | 74.7 | 75.9 | 75.6 |
| 2007 | 80.1 | 79.0 | 77.6 | 72.0 | 71.6 | 73.8 | 74.5 | 67.1 | 71.7 | 76.3 | 76.6 | 73.9 |
| 2008 | 78.6 | 73.1 | 82.8 | 81.9 | 78.3 | 71.4 | 70.8 | 68.3 | 66.2 | 75.6 | 76.1 | 76.9 |
| 2009 | 77.6 | 82.6 | 85.1 | 79.2 | 76.0 | 70.1 | 67.4 | 68.4 | 71.0 | 76.0 | 81.3 | 82.8 |
| 2010 | 79.2 | 81.9 | 83.2 | 80.4 | 77.0 | 80.1 | 80.4 | 78.5 | 78.8 | 77.6 | 83.4 | 90.9 |
| 2011 | 91.0 | 89.0 | 89.8 | 89.4 | 84.2 | 77.2 | 81.7 | 81.4 | 83.9 | 84.0 | 84.7 | 87.2 |
| 2012 | 86.7 | 89.5 | 84.4 | 86.7 | 81.0 | 78.5 | 67.7 | 69.8 | 73.5 | 76.3 | 79.0 | 84.5 |

Fuente: SENAMHI, Oficina General de Estadística e Informática, 2014

Prohibida su reproducción parcial o total

Nota: en negrita información completada

ANEXO 5. HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL ESTACIONARIZADA (%)

Estación: Recuay/000441/DRE-04

Longitud: 77°27'W

Latitud: 09°43'S

Altitud: 3444 msnm

Región: Ancash

Provincia: Recuay

Distrito: Recuay

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2004 | 60.1 | 69.7 | 71.3 | 67.4 | 66.0 | 62.1 | 67.6 | 53.6 | 65.9 | 73.1 | 75.1 | 77.3 |
| 2005 | 70.0 | 72.2 | 73.5 | 68.4 | 58.8 | 75.1 | 75.6 | 75.6 | 70.2 | 65.2 | 64.3 | 62.0 |
| 2006 | 64.8 | 65.2 | 65.2 | 61.0 | 57.2 | 56.5 | 54.7 | 52.7 | 55.4 | 64.5 | 65.1 | 65.2 |
| 2007 | 68.7 | 67.8 | 66.8 | 62.4 | 62.1 | 63.8 | 64.4 | 58.7 | 61.7 | 65.8 | 66.0 | 63.9 |
| 2008 | 67.5 | 63.3 | 70.8 | 70.1 | 67.3 | 62.0 | 61.5 | 59.6 | 58.0 | 65.2 | 65.6 | 66.2 |
| 2009 | 66.8 | 70.6 | 72.5 | 68.0 | 65.5 | 61.0 | 58.9 | 59.7 | 61.7 | 65.5 | 69.6 | 70.8 |
| 2010 | 68.0 | 70.1 | 71.1 | 68.9 | 66.3 | 68.7 | 68.9 | 67.4 | 67.7 | 62.9 | 72.8 | 77.0 |
| 2011 | 77.1 | 75.7 | 76.2 | 75.9 | 75.7 | 66.4 | 69.9 | 69.7 | 71.6 | 71.7 | 72.2 | 74.2 |
| 2012 | 73.8 | 75.9 | 72.0 | 73.8 | 69.4 | 67.4 | 59.1 | 60.7 | 63.6 | 65.8 | 67.8 | 72.1 |
| Media | 68.5 | 70.1 | 71.0 | 68.4 | 65.4 | 64.8 | 64.5 | 62.0 | 64.0 | 66.6 | 68.7 | 69.9 |

ANEXO 6. EVAPORACIÓN (mm/mes)

Estación: Recuay/000441/DRE-04

Longitud: 77°27'W

Latitud: 09°43'S

Altitud: 3444 msnm

Región: Ancash

Provincia: Recuay

Distrito: Recuay

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|
| 2004 | 124.6 | 92.5 | 106.9 | 103.4 | 111.3 | 106.2 | 107.6 | 133.1 | 119.9 | 116.7 | 95.9 | 102.0 |
| 2005 | 105.5 | 93.3 | 74.7 | 96.9 | 122.7 | 109.5 | 138.2 | 131.8 | 116.9 | 108.8 | 97.6 | 88.7 |
| 2006 | 107.4 | 77.4 | 79.4 | 101.2 | 112.3 | 116.2 | 131.1 | 118.3 | 126.2 | 105.4 | 99.3 | 96.0 |
| 2007 | 113.8 | 100.2 | 89.6 | 87.6 | 110.5 | 122.4 | 133.1 | 138.7 | 122.3 | 109.4 | 99.3 | 109.8 |
| 2008 | 108.9 | 90.5 | 98.4 | 95.2 | 130.3 | 115.3 | 129.4 | 129.6 | 126.0 | 98.3 | 109.0 | 97.3 |
| 2009 | 78.1 | 66.7 | 86.3 | 91.7 | 109.3 | 112.3 | 120.8 | 130.3 | 125.7 | 108.6 | 88.0 | 89.6 |
| 2010 | 94.5 | 100.0 | 84.9 | 117.9 | 117.7 | 121.8 | 129.4 | 131.9 | 82.7 | 133.2 | 98.7 | 64.0 |
| 2011 | 81.6 | 73.8 | 85.8 | 77.4 | 129.4 | 128.1 | 120.1 | 124.0 | 121.2 | 133.9 | 111.0 | 77.4 |
| 2012 | 89.4 | 78.1 | 91.8 | 72.2 | 113.6 | 120.2 | 130.3 | 122.6 | 116.8 | 121.5 | 99.9 | 80.5 |

Fuente: SENAMHI, Oficina General de Estadística e Informática, 2014

Prohibida su reproducción parcial o total

Nota: en negrita información completada