

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“CALIBRACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CORRECCIÓN
DEL MODELO DE HARGREAVES-SAMANI PARA LA REGIÓN
DE ÑUBLE, CHILE”**

JUAN PABLO ANTONIO PACHECO OYANADEL

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO
A LA FACULTAD DE INGENIERÍA
AGRÍCOLA DE LA UNIVERSIDAD DE
CONCEPCIÓN, PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
AGRÍCOLA.

CHILLÁN-CHILE

2025

**CALIBRACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CORRECCIÓN DEL MODELO
DE HARGREAVES-SAMANI PARA LA REGIÓN DE ÑUBLE, CHILE**

Aprobado por:

Camilo Souto Escalona
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Guía

Octavio Lagos Roa
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Titular

Profesor Asesor

Jerónimo Paredes Cáceres
Ingeniero Matemático, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

José Luis Arumí Rivera
Ingeniera Civil, Ph. D.
Profesora Titular

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Asociado

Decana

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS	10
2.1. Objetivo general	10
2.2. Objetivos específicos.....	10
3. ANTECEDENTES GENERALES	11
3.1. Sitios de estudio	11
4. MATERIALES Y MÉTODOS	12
4.1. Distritos agroclimáticos donde se desarrolla agricultura en la región de Ñuble	12
4.2. Subdivisión agroclimática basado en las estaciones meteorológicas en la región de Ñuble	21
4.3. Modelo Hargreaves – Samani (H-S).	23
4.4. Modelo Estandarizado ASCE - Penman – Monteith (ASCE-PM).....	25
4.5. Tratamiento de los Datos.	27
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30

5.1. Análisis temporal de las variables meteorológicas en el sitio de estudio	30
5.1.1. Temperatura del aire	30
5.1.2. Humedad relativa	31
5.1.3. Radiación solar	32
5.1.4. Velocidad de viento	34
5.2. Factores de corrección del modelo de H-S (α y β) en el sitio de estudio	35
5.2.1. Coeficiente de corrección α	35
5.2.2. Coeficiente de corrección β	37
5.3. Evapotranspiración de referencia del modelo de H-S (ET_{HS}) y el modelo estandarizado ASCE Penman-Monteith (ASCE-PM) (ET_{PM}).	39
CONCLUSIONES	43
LITERATURA CITADA	45
ANEXO	49

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Estaciones meteorológicas disponibles en el estudio. D.D. es la disponibilidad de datos	22
Tabla 2. Evapotranspiración potencial (ETp) y radiación promedio anual (Rs) de los ocho distritos agroclimáticos del sitio de estudio.	23
Tabla 3. Valor de C_n y C_d de la ecuación ASCE P-M para un cultivo de referencia corto (pasto) y largo (alfa), para un intervalo de tiempo diario.	26
Tabla 4. Valores de los parámetros y condiciones en la ecuación ASCE-PM para cultivos de referencia corto y largo	27
Tabla 5. Factor de corrección a promedio para las estaciones meteorológicas del sitio de estudio. SD es la desviación estándar	37
Tabla 6. Factor de corrección b promedio para las estaciones meteorológicas del sitio de estudio. SD es la desviación estándar.	39
Tabla 7. RMSE y R^2 de la estimación de ET usando el modelo H-S con respecto al modelo ASCE-PM para las estaciones meteorológicas del sitio de estudio	42

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Distritos agroclimáticos en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017)	11
Figura 2.	Ubicación del distrito agroclimático de Linares en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017)	13
Figura 3.	Ubicación del distrito agroclimático de Chillán en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).	14
Figura 4.	Ubicación del distrito agroclimático de Cauquenes en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).	15
Figura 5.	Ubicación del distrito agroclimático de Coihueco en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).	16
Figura 6.	Ubicación del distrito agroclimático de Empedrado en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).	17
Figura 7.	Ubicación del distrito agroclimático de Constitución en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).	18
Figura 8.	Ubicación del distrito agroclimático de Angol en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).	19
Figura 9.	Ubicación del distrito agroclimático de Talca en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).	20
Figura 10.	Subdivisión agroclimática propuesta para la región de Ñuble. Distritos agroclimáticos: (1) Constitución, (2) Empedrado, (3) Cauquenes, (4) Chillán, (5) Linares, (6) Coihueco, (7) Angol y (8) Talca.	21
Figura 11.	Temperatura promedio del aire (T_a) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h)	31
Figura 12.	Humedad relativa promedio diario del aire (HR) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h)	32

Figura 13.	Radiación solar diaria (R_s) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h)	33
Figura 14.	Velocidad de viento promedio diario (u) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h).	34
Figura 15.	Coefficiente de corrección a promedio mensual (a_{prom}) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h)	36
Figura 16.	Coefficiente de corrección b promedio mensual (b_{prom}) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h)	38
Figura 17.	Evapotranspiración de referencia del año 2023 usando el modelo de H-S (ET_{HS}) con respecto al modelo estandarizado ASCE Penman-Monteith (ET_{PM}) para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h). La línea recta de color rojo representa la relación 1:1.	41

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Modelo Hargreaves 1975	23
Ecuación 2. Modelo Hargreaves y Samani (1982) para Radiación Solar	24
Ecuación 3. Unificación del Modelo Hargreaves y Samani (1982)	24
Ecuación 4. Modelo Estandarizado ASCE - Penman – Monteith (ASCE-PM).	25
Ecuación 5. La raíz del error cuadrático medio (RMSE)	28
Ecuación 6. Coeficiente de determinación (R^2)	29
Ecuación 7. Sumatoria de los cuadrados de residuos, para cálculos de R^2	29
Ecuación 8. Sumatoria total de los cuadrados, para cálculos de R^2	29

CALIBRACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CORRECCIÓN DEL MODELO DE HARGREAVES-SAMANI PARA LA REGIÓN DE ÑUBLE, CHILE

Palabras claves: Evapotranspiración, Datos meteorológicos, Riego, Cultivos y Frutales.

RESUMEN

El método de Hargreaves-Samani (H-S) fue aplicado para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_r) en ocho distritos agroclimáticos de la región de Ñuble, Chile. El estudio se centró en calibrar los coeficientes de corrección del modelo de H-S (α y β), con el propósito de adaptar su uso a las características específicas de la región. La calibración se realizó en función de la ET_r obtenida desde el modelo de Penman-Monteith (P-M) para un cultivo de pasto corto. Para ello, se utilizaron datos diarios de temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad de viento de las estaciones de Santa Rosa, Ninhue, Portezuelo, Yungay, Sauzal, Chanco, Bulnes y Monte Blanco - Tucapel, cubriendo un intervalo de tiempo de 14 años (2009-2023). Los resultados mostraron que los coeficientes α y β variaron entre 0,1428 y 0,00537 en zonas cordilleranas, mientras que en el valle central oscilaron entre 0,1235 y 0,00667, respectivamente. Con la corrección de α y β se encontraron R² y RMSE promedios de 0,81 y 1,30 mm día⁻¹, mientras que para zonas más cercanas a la costa, como Chanco, los valores de R² aumentaron en un 1,81%

y el RMSE disminuyó un 50% en comparación con los valores promedios. Finalmente este enfoque permite determinar la ETr en áreas donde el acceso a datos meteorológicos detallados es limitado con una correlación promedio mayor al 80%. Se espera que futuros desarrollos se enfoquen en incorporar estimaciones de ETr en una aplicación móvil para pronosticar la demanda de agua de cultivos y frutales a 1, 3 y 5 días, lo que permitirá programar el manejo de riego futuro en la región de Ñuble.

CALIBRATION OF THE CORRECTION COEFFICIENTS OF THE HARGREAVES-SAMANI MODEL FOR THE ÑUBLE REGION, CHILE

Keywords: Evapotranspiration, Meteorological data, Irrigation, Crops and Trees.

ABSTRACT

The Hargreaves-Samani (H-S) method was applied to calculate the reference evapotranspiration (ET_r) in eight agroclimatic districts of the Ñuble region, Chile. The study focused on calibrating the correction coefficients of the H-S model (α and β) to adapt its application to the specific characteristics of the region. Calibration was conducted based on the ET_r obtained from the Penman-Monteith (P-M) model for a short grass crop. Daily data on temperature, relative humidity, solar radiation, and wind speed were utilized from the stations of Santa Rosa, Ninhue, Portezuelo, Yungay, Sauzal, Chanco, Bulnes, and Monte Blanco - Tucapel, covering a time span of 14 years (2009-2023). The results indicated that the coefficients α and β varied between 0.1428 and 0.00537 in mountainous areas, while in the central valley, they ranged from 0.1235 to 0.00667, respectively. With the correction of α and β , average R² and RMSE values of 0.81 and 1.30 mm day⁻¹ were obtained. In coastal areas such as Chanco, the R² value increased by 1.81%, and the RMSE magnitude decreased by nearly 50% compared to the average values. Ultimately, this approach enables the determination of ET_r in regions where access to detailed

meteorological data is limited, achieving an average correlation greater than 80%. Future developments are expected to focus on incorporating ETr estimates into a mobile application to forecast (1, 3, and 5 days) the water demand of crops and fruit trees, facilitating the scheduling of future irrigation management in the Ñuble region.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, los pequeños y medianos agricultores en conjunto con las empresas ligadas al área agrícola, han visto cómo las variaciones climatológicas afectan directamente distintas labores diarias y futuras del rubro. Un factor importante en la calidad y rendimiento de las distintas variedades de cultivos y frutales es la aplicación de agua durante el periodo de crecimiento y maduración. La toma de decisiones de cuándo y cuánta agua aplicar, mediante un método de riego, es fundamental para mejorar la eficiencia del uso del agua y el rendimiento de cultivos y/o frutales.

Un riego eficiente se inicia conociendo la cantidad de agua utilizada por una superficie de cultivo en el proceso de evapotranspiración (Hunt et al., 2008) De acuerdo a Allen et al., (2006), la evapotranspiración (ET) es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo, por evaporación (E), y por otra parte mediante transpiración de cultivo (T). La E y T ocurren simultáneamente y no existe una manera sencilla de distinguir y cuantificar entre estos dos procesos (Faúndez de la Fuente, 2016).

La ET es una variable esencial en el diseño, manejo y planificación del riego. De ahí la importancia de su cuantificación y del análisis de cuáles métodos la miden o estiman de manera satisfactoria (Osses, 2019). Se han experimentado variadas metodologías para determinar ET, donde se han desarrollado una gran cantidad de modelos, tanto directos, teóricos o

empíricos. Sin embargo, todavía es necesario realizar evaluaciones de dichos modelos, lo que genera confusión y arbitrariedad en la selección de ellos. Algunos de los modelos son: combinados como el de FAO – 24 y Blaney – Criddle (BC) o FAO – 56 y Penman-Monteith (ASCE-PM); de radiación como Priestley y Taylor en 1972; y de temperatura como Hargreaves y Samani 1985. La metodología de ASCE-PM es un modelo de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE-PM), que fue seleccionado por la FAO para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_r) (Liu et al., 2017) La principal virtud de ASCE-PM es la capacidad para proporcionar resultados similares a los que se obtienen recurriendo a mediciones, directas (lisímetro) e indirectas (métodos micro-meteorológicos), de la evapotranspiración de cubiertas cespitosas. Además, posee una base física sólida e incorpora parámetros fisiológicos como aerodinámicos (Pereira et al., 2010).

La ET_r es un componente clave en estudios hidrológicos, siendo usado tanto en la planificación urbana, agrícola, programación de riego, estudios de balances de agua y zonificación agroclimática (Samani, 2000). Sin embargo, la cantidad de información que se requiere para la metodología ASCE-PM (radiación solar (R_s), temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR) y velocidad de viento (u), no se encuentra fácilmente disponible para pequeños/medianos agricultores y empresas ligadas al área agrícola.

Existen diversos casos en donde la dificultad o inexistencia de datos hace imposible utilizar la metodología de ASCE-PM. Es así como se han desarrollado otros métodos para determinar ET_r. Uno de ellos es el modelo de

Hargreaves-Samani (H-S) que considera, la temperatura máxima y mínima del aire diaria, y la radiación solar incidente (R_s). (Sánchez Martínez y Carvacho Bart, 2011) evaluaron distintos modelos para determinar ET_r en la región de O'Higgins, Chile. Ellos concluyeron que el método H-S es una buena alternativa ante la imposibilidad del cálculo de ET_r con ecuaciones de mayor demanda de datos agroclimáticos. Otros autores, con similares evaluaciones, han encontrado buenas aproximaciones de ET_r entre los modelos de H-S y ASCE-PM, con coeficientes de determinación (r^2) entre 0.93 a 0.95; y con la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre 0.3 a 1.05 mm dia^{-1} (Toro-Trujillo et al., 2015). Hargreaves y Allen, (2003) realizó comparaciones entre ASCE-PM y H-S, y recomendaron que ambos modelos son óptimos para cuantificar ET_r . De acuerdo a (Oliveira et al., 2005) el método propuesto por Samani no estima adecuadamente la radiación para zonas húmedas. (Raziei y Pereira, 2013) investigó sobre la distribución espacial de zonas muy áridas a húmedas de norte a sur en Irán. Ellos encontraron que los métodos H-S y ASCE-PM son alternativas apropiadas para la estimación de ET_r en todas las regiones climáticas de Irán, particularmente para las estaciones muy remotas que sólo tienen registros de temperatura mínima y máxima del aire. Similares variaciones climatológicas de Chile desde las zonas norte a sur.

Hargreaves, (1994) recomendó dar mayor énfasis a la recopilación y publicación de datos de temperatura del aire con mayor precisión y exactitud para facilitar la implementación del modelo H-S. Actualmente, la temperatura del aire es una de las variables de registro comúnmente medida, con alta

exactitud, que puede ser interpolada, espacial y temporalmente, con mayor seguridad que cualquier otra variable climática. Es así como el modelo H-S entrega, hoy en día, una buena alternativa para cuantificar ETr en aquellas zonas donde no existen registros de las variables usadas por el modelo ASCE-PM.

No obstante, los resultados de ETr desde el modelo H-S están condicionados a una buena calibración del modelo dependiendo de la zona geográfica y climática donde se implemente. Es así como para mejorar las estimaciones de ETr con el modelo H-S, los esfuerzos futuros deben centrarse en la calibración local. Liu et al., (2017) desarrolló una investigación bibliográfica de los modelos existentes para determinar ETr, y encontró que los modelos de temperatura tuvieron RMSE desde 1.09 a 2.48 mm día⁻¹ en un clima clasificado como semiárido, en términos de aridez (Xiaoying y Erda, 2005) Similares condiciones climáticas son las que se pueden encontrar en la zona centro sur de Chile (regiones de Maule, Ñuble y Biobío).

¿Qué tal si se pudieran desarrollar zonas diferenciadas de estimación de ETr mediante el modelo H-S? Cuantificar la cantidad de agua por zona en aquellos sectores donde el registro de variables agroclimáticas es limitado. En definitiva, utilizar el modelo H-S para determinar ETr.

Para la implementación del modelo H-S es necesario responder interrogantes que requieren de investigación. ¿Es posible determinar ETr mediante el modelo H-S con un coeficiente geográfico calibrado?, ¿Es necesario cuantificar de una forma más simple la demanda de agua de los diferentes

cultivos?, ¿Qué variabilidad existe en los coeficientes de calibración entre las zonas de estudio?. Por esta razón, el objetivo general de este estudio es calibrar los coeficientes de corrección del modelo de Hargreaves-Samani para la Región de Ñuble, Chile.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Calibrar los coeficientes de corrección del modelo de Hargreaves-Samani para la Región de Ñuble, Chile.

2.2. Objetivos específicos

- a) Analizar la variabilidad temporal de los datos meteorológicos que influyen en la cuantificación de la evapotranspiración de referencia en la Región de Ñuble.
- b) Cuantificar los factores de corrección del modelo de H-S (α y β) para la Región de Ñuble.
- c) Evaluar la evapotranspiración de referencia del modelo de H-S con el modelo estandarizado ASCE Penman-Monteith (ASCE-PM).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Distritos agroclimáticos donde se desarrolla agricultura en la región de Ñuble

Los principales distritos agroclimáticos de la región de Ñuble donde se desarrolla la agricultura son descritos por (Santibáñez, 2017) los cuales se enuncian a continuación:

a) Linares.

La temperatura varía entre un máximo de enero de 29,1°C (máxima de 29,9 °C y mínima de 27,4 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 3,5°C (máxima de 4,2 °C y mínima de 2,9 °C dentro del distrito). Tiene un promedio de 211 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 20 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 9 meses. Registra anualmente 1535 días grado y 949 horas de frío acumuladas hasta el 31 de Julio. La precipitación media anual es de 1137 mm y un período seco de 5 meses, con un déficit hídrico de 846 mm año⁻¹. El período húmedo dura 5 meses durante los cuales se produce un excedente hídrico de 528 mm. La altitud media aproximada es de 255 m sobre el nivel del mar (s.n.m) y la superficie territorial aproximada es de 4109 km².

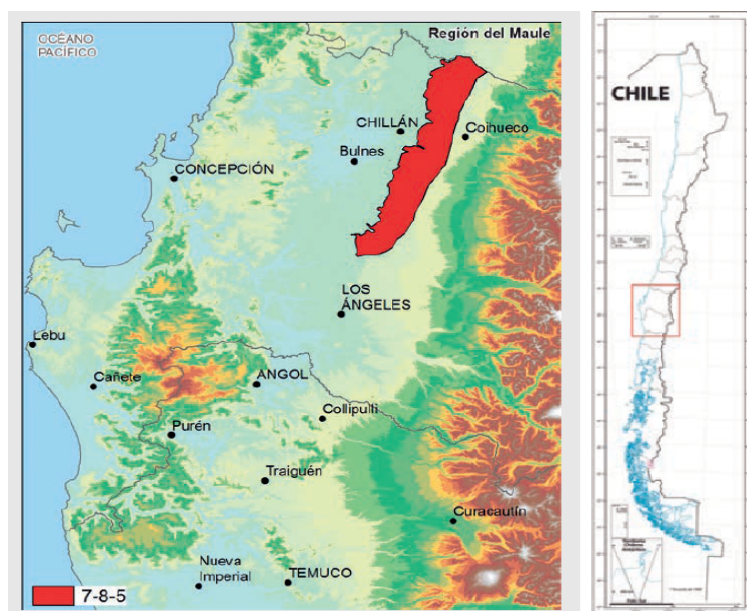


Figura 2. Ubicación del distrito agroclimático de Linares en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).

b) Chillán.

La temperatura varía entre un máximo de enero de 29,5°C (máxima de 30,8 °C y mínima de 24,6 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 3,5°C (máxima de 5,4 °C y mínima de 2,9 °C dentro del distrito). Tiene un promedio de 211 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 17 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 9 meses. Registra anualmente 1606 días grado y 949 horas de frío acumuladas hasta el 31 de Julio. La precipitación media anual es de 1035 mm y un período seco de 5 meses, con un déficit hídrico de 789 mm año⁻¹. El período húmedo dura 5 meses durante los cuales se produce un excedente

hídrico de 446 mm. La altitud media aproximada es de 137 m s.n.m. y la superficie territorial aproximada es de 6044 km².

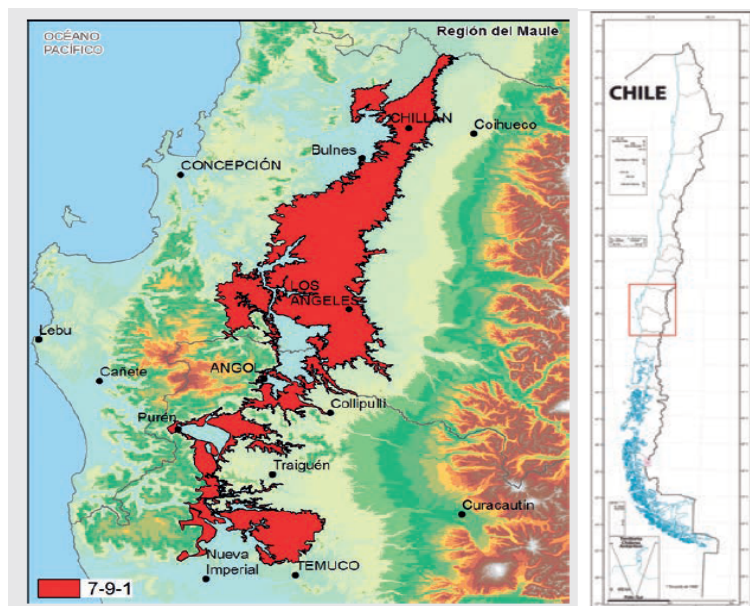


Figura 3. Ubicación del distrito agroclimático de Chillán en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).

c) Cauquenes.

La temperatura varía entre un máximo de enero de 29,5 °C (máxima de 31 °C y mínima de 27,8 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 5 °C (máxima de 6 °C y mínima de 4,3 °C dentro del distrito). Tiene un promedio de 262 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 6 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 9 meses. Registra anualmente 1754 días grado y 557 horas de frío acumuladas hasta el 31 de Julio. La precipitación media anual es de 816 mm y un período seco de 6 meses, con un déficit hídrico de 947 mm año⁻¹. El

período húmedo dura 4 meses durante los cuales se produce un excedente hídrico de 291 mm. La altitud media aproximada es de 186 m s.n.m. y la superficie territorial aproximada es de 3359 km².

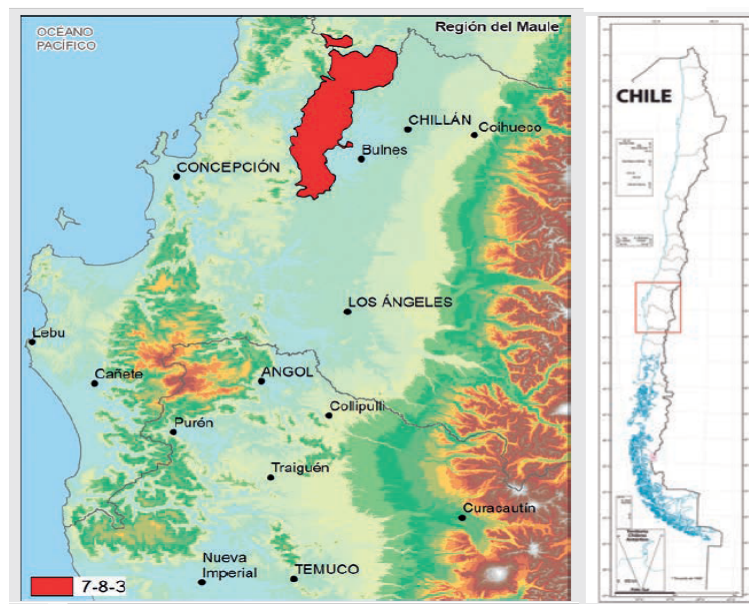


Figura 4. Ubicación del distrito agroclimático de Cauquenes en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).

d) Coihueco.

La temperatura varía entre un máximo de enero de 28,7 °C (máxima de 29,7 °C y mínima de 27,5 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 3,4 °C (máxima de 4,2 °C y mínima de 2,7 °C dentro del distrito). Tiene un promedio de 196 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 23 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 7 meses. Registra anualmente 1433 días grado y 1023 horas de frío acumuladas hasta el 31 de Julio. La precipitación media anual es de 1393 mm

y un período seco de 5 meses, con un déficit hídrico de 693 mm año⁻¹. El período húmedo dura 5 meses durante los cuales se produce un excedente hídrico de 700 mm. La altitud media aproximada es de 371 m s.n.m. y la superficie territorial aproximada es de 4073 km².

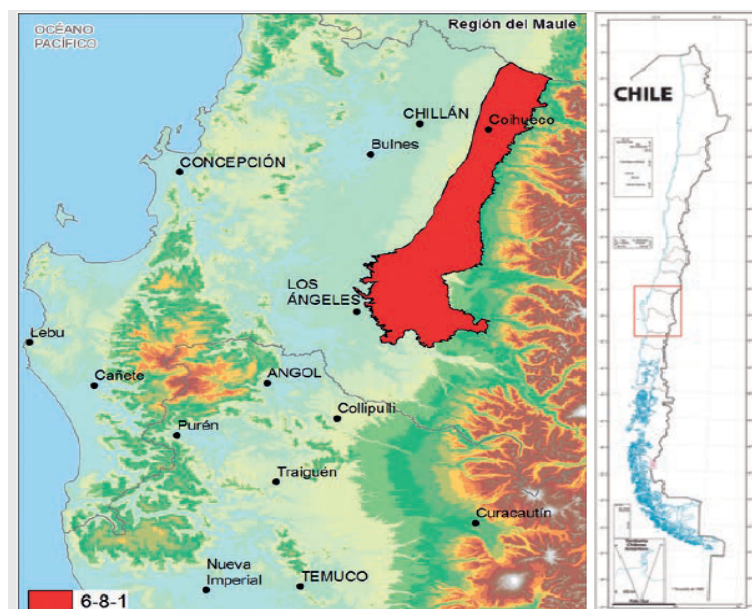


Figura 5. Ubicación del distrito agroclimático de Coihueco en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).

e) Empedrado.

La temperatura varía entre un máximo de enero de 27,1 °C (máxima de 29 °C y mínima de 24,6 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 5,7 °C (máxima de 6,5 °C y mínima de 4,7 °C dentro del distrito). Tiene un promedio de 300 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 3 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 9 meses. Registra anualmente 1595 días grado y 395 horas de frío

acumuladas hasta el 31 de Julio. La precipitación media anual es de 858 mm y un período seco de 6 meses, con un déficit hídrico de 838 mm año⁻¹. El período húmedo dura 4 meses durante los cuales se produce un excedente hídrico de 325 mm. La altitud media aproximada es de 244 m s.n.m. y la superficie territorial aproximada es de 2805 km².

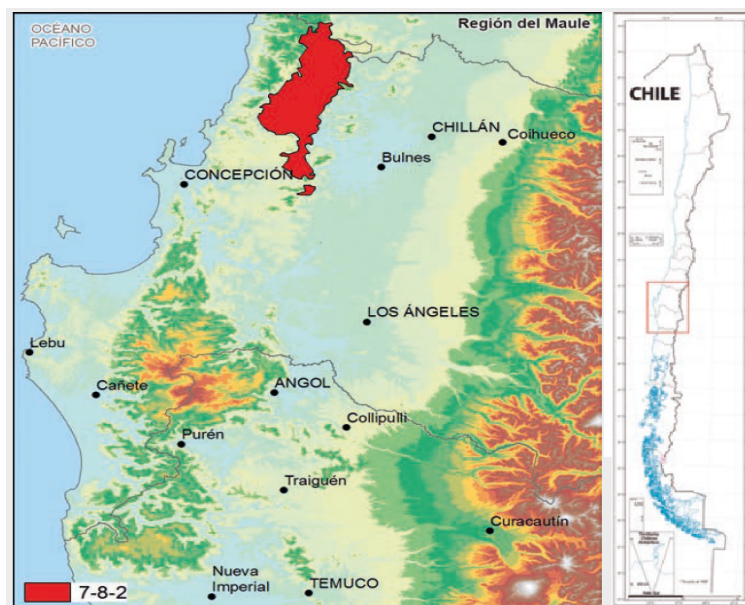


Figura 6. Ubicación del distrito agroclimático de Empedrado en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).

f) Constitución.

La temperatura varía entre un máximo de enero de 24,4 °C (máxima de 27,3 °C y mínima de 20 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 6,3 °C (máxima de 6,7 °C y mínima de 5,3 °C dentro del distrito). Tiene un promedio de 339 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 2 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura

11 meses. Registra anualmente 1362 días grado y 303 horas de frío acumuladas hasta el 31 de Julio. La precipitación media anual es de 920 mm y un período seco de 5 meses, con un déficit hídrico de 726 mm año⁻¹. El período húmedo dura 4 meses durante los cuales se produce un excedente hídrico de 375 mm. La altitud media aproximada es de 295 m s.n.m. y la superficie territorial aproximada es de 3103 km².

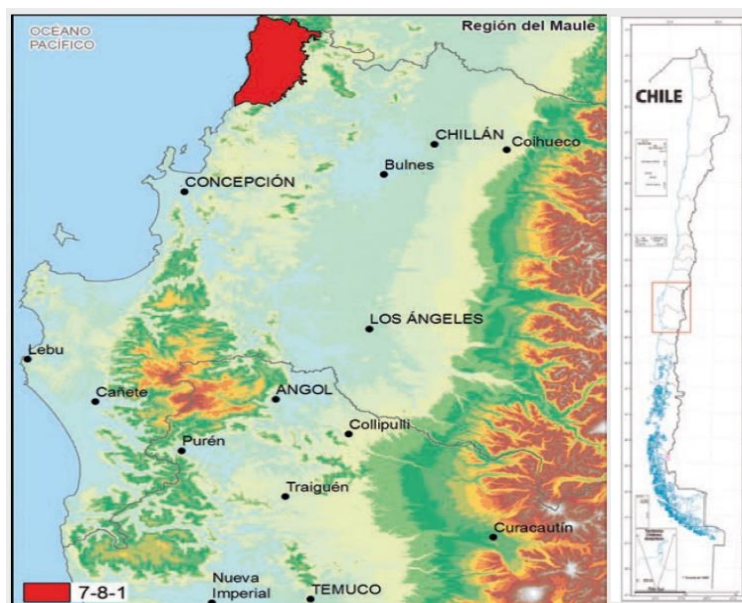


Figura 7. Ubicación del distrito agroclimático de Constitución en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).

g) Angol.

La temperatura varía entre un máximo de enero de 27,8 °C (máx. de 30 °C y mín. de 24,5 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 4,2 °C (máx. de 5,2 °C y mín. de 3,6 °C dentro del distrito) . Tiene un promedio de 231 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 10

heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 9 meses. Registra anualmente 1.541 días grado y 815 horas de frío acumuladas hasta el 31 de Julio. La precipitación media anual es de 1.000 mm y un período seco de 5 meses, con un déficit hídrico de 777 mm año⁻¹. El período húmedo dura 5 meses durante los cuales se produce un excedente hídrico de 405 mm. Altitud media: 89 m s.n.m. Superficie territorial: 1.911 km².

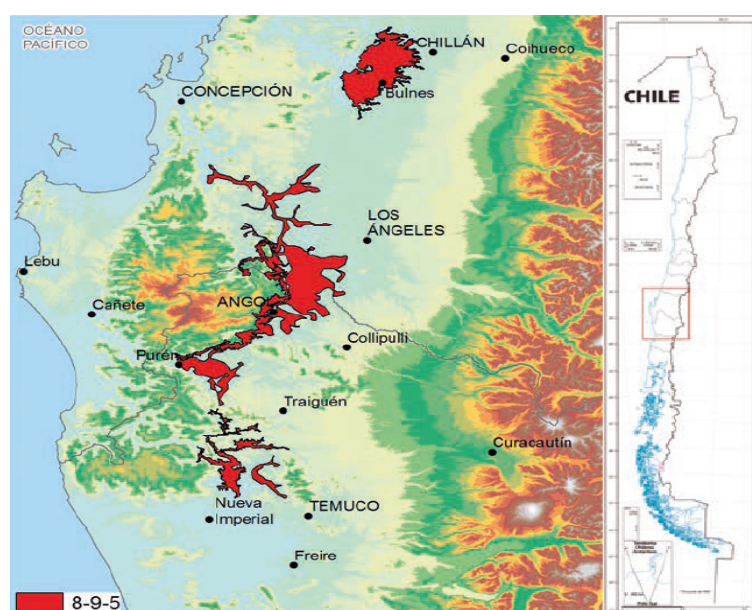


Figura 8. Ubicación del distrito agroclimático de Angol en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).

h) Talca.

La temperatura varía entre un máximo de enero de 29,7 °C (máx. de 31,6 °C y mín. de 28,2 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 3,9 °C (máx. de 5,2 °C y mín. de 4,7 °C dentro del distrito). Tiene un promedio de 228 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 15

heladas. El periodo de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 9 meses. Registra anualmente 1.707 días grado y 784 horas de frio acumuladas hasta el 31 de Julio.

La precipitación media anual es de 720 mm y un periodo seco de 7 meses, con un déficit hídrico de 1.030 mm año⁻¹. El período húmedo dura 4 meses durante los cuales se produce un excedente hídrico de 229 mm. Altitud media aproximada: 137 m s.n.m. Superficie territorial aproximada: 3.576 km².

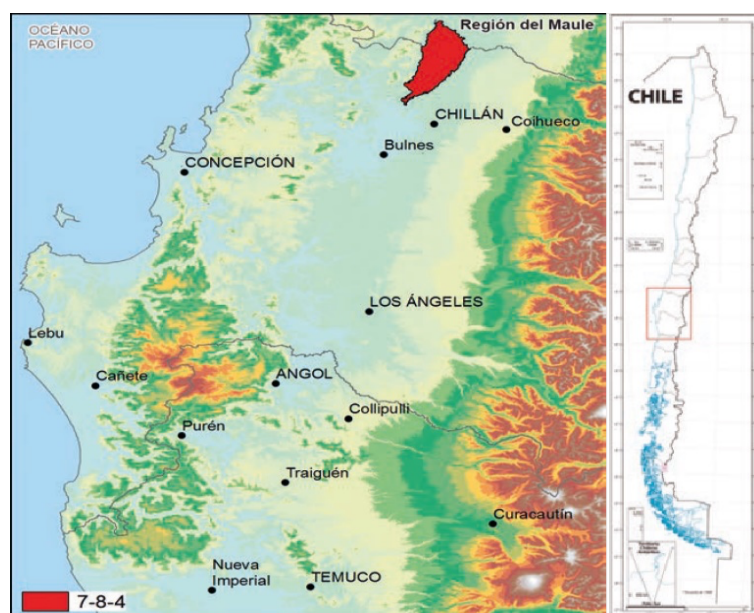


Figura 9. Ubicación del distrito agroclimático de Talca en la región de Ñuble (Santibáñez, 2017).

4.2. Subdivisión agroclimática basado en las estaciones meteorológicas en la región de Ñuble

De los distritos agroclimáticos (Figura 1) y de la red de estaciones de INIA se realizó una subdivisión de la región de Ñuble de acuerdo a las principales áreas que poseen desarrollo agrícola. La subdivisión propuesta es representada por ocho áreas transversales (norte-sur), en la región de Ñuble, las cuales son: zona precordillerana (distrito 6-8-1: Coihueco); valle central oriente (distrito 7-8-5: Linares), poniente (distrito 7-9-1: Chillán) y centrales norte (distrito 7-8-4: Talca) y sur (distrito 8-9-5 :Angol) ; secano oriente (distrito 7-8-3: Cauquenes) y poniente (distrito 7-8-2: Empedrado); y finalmente la zona costera (distrito 7-8-1: Constitución) (Figura 10).

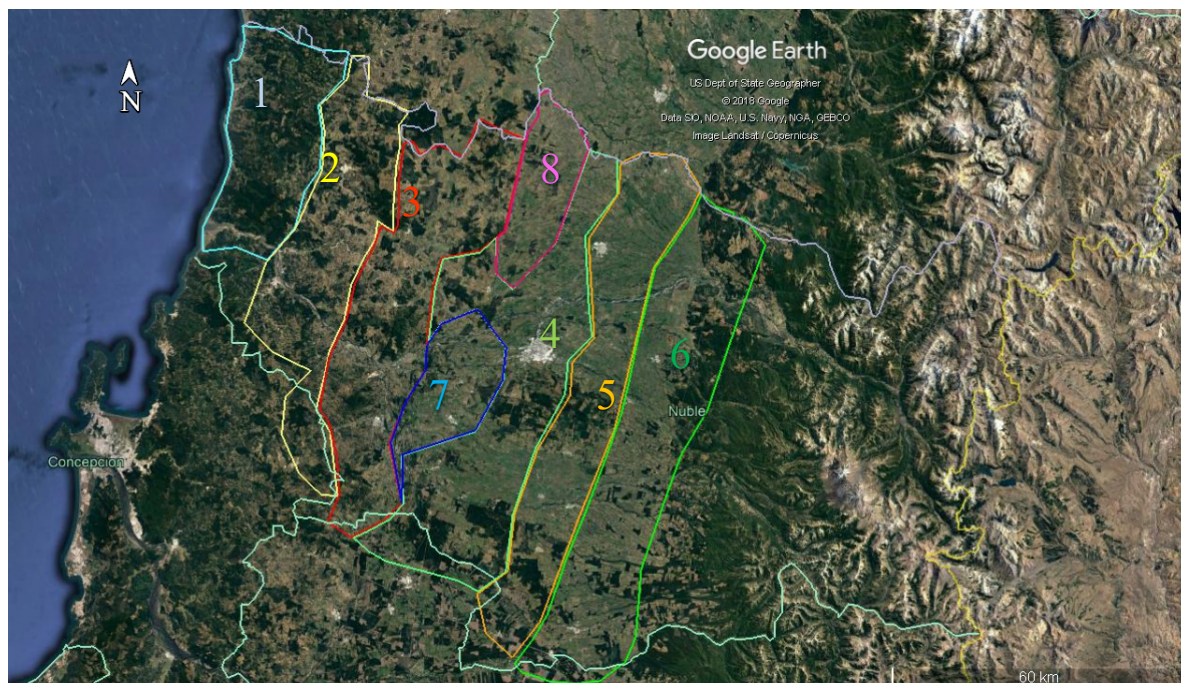


Figura 10. Subdivisión agroclimática propuesta para la región de Ñuble. Distritos agroclimáticos: (1) Constitución, (2) Empedrado, (3)

Cauquenes, (4) Chillán, (5) Linares, (6) Coihueco, (7) Angol y (8) Talca.

Con la subdivisión propuesta en la Figura 10, el área agrícola de la región queda cubierta por cada uno de los distritos. Es preciso mencionar que las divisiones territoriales políticas del país difieren de las zonas climáticas de este, debido a lo anterior y a las escasas estaciones meteorológicas en la región de Ñuble, se estudiaron dos estaciones meteorológicas (Chanco y Sauzal) de la región del Maule que comparten el mismo distrito agroclimático con la región de Ñuble. Las estaciones seleccionadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas disponibles en el estudio. D.D. es la disponibilidad de datos.

N°	Estación	Latitud Sur (°)	Longitud Este (°)	Altura (m)	D.D.	Zona Agroclimática	Código Atlas
1	Bulnes	36,73	72.370	56	01-04-10	Angol	8-9-5
2	Chanco	35,707	72,511	60	01-05-10	Constitución	7-8-1
3	Monte Flor-Tucapel	36.245	71.934	548	01-12-15	Talca	7-8-4
4	Ninhue	36,398	72,395	91	01-04-10	Chillán	7-9-1
5	Portezuelo	36,532	72,368	109	01-04-10	Cauquenes	7-8-3
6	Santa Rosa	36,535	71,916	194	08-02-11	Linares	7-8-5
7	Sauzal	35,715	72,111	162	01-09-09	Empedrado	7-8-2
8	Yungay	37,141	72,012	265	01-04-10	Coihueco	6-8-1

A continuación, en la Tabla 2, se muestra la evapotranspiración potencial anual y la radiación promedio anual para el sitio de estudio y sus distritos agroclimáticos.

Tabla 2. Evapotranspiración potencial (ETp) y radiación promedio anual (Rs) de los ocho distritos agroclimáticos del sitio de estudio.

N°	Distrito	ETp (mm)	Rs (MJ m ⁻² día ⁻¹)
1	6-8-1: Coihueco	1386	16,5
2	7-8-1: Constitución	1271	16,9
3	7-8-2: Empedrado	1371	16,9
4	7-8-3 Cauquenes	1472	17,0
5	7-8-4: Talca	1521	17,8
6	7-8-5: Linares	1456	17,4
7	7-9-1: Chillán	1378	16,2
8	8-9-5: Angol	1372	16,1

4.3. Modelo Hargreaves – Samani (H-S).

Hargreaves, (1975) encontró que la temperatura del aire (Ta) y la radiación solar (Rs) tiene una directa relación con la demanda de agua. Según Jensen et al., (1990), al menos el 80% de ETr puede explicarse por la Ta y la Rs. De acuerdo a Hargreaves (1975), la ETr puede obtenerse usando la Ecuación 1.

$$ET_r = \beta (T_{med} + 17,78) R_S \quad [1]$$

Donde:

ET_r : Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

β : Coeficiente de corrección de humedad relativa (adimensional).

T_{med} : Temperatura media del periodo de tiempo analizado ($^{\circ}\text{C}$).

R_s : Radiación solar incidente en ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$).

Posteriormente, Hargreaves y Samani (1982) encontraron que se podía simplificar la estimación de ET_r considerando la radiación solar extraterrestre (R_0). El modelo de H-S fue desarrollado con el objetivo de estimar la demanda de agua referencial en sitios de estudio donde la disponibilidad de datos meteorológicos fuese limitado. Así, Hargreaves y Samani, (1982) propusieron una modificación en la estimación de ET_r como se observa en la Ecuación 3.

$$R_s = \alpha (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_0 \quad [2]$$

$$ET_r = \alpha \beta \sqrt{\Delta T_a} (T_{med} + 17,78) R_0 \quad [3]$$

Donde:

α : Coeficiente de corrección de ubicación geográfica (adimensional).

$T_{m\acute{a}x}$: Temperatura máxima del periodo de tiempo ($^{\circ}\text{C}$).

$T_{m\acute{i}n}$: Temperatura mínima del periodo de tiempo ($^{\circ}\text{C}$).

R_0 : Radiación Solar extraterrestre ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$).

Los coeficientes α y β representan el efecto de los factores de nubosidad, humedad relativa, latitud, elevación, topografía, patrón de tormenta, advección y proximidad a un gran cuerpo de agua. Por ejemplo, a bajas latitudes, la diferencia de T_a se vuelve insignificante y consecuentemente las Ecuaciones

1 y 2 se vuelven insensibles y podrían subestimar significativamente tanto la R_s como la E_{Tr} (Jagtap, 1991).

4.4. Modelo Estandarizado ASCE - Penman – Monteith (ASCE-PM).

El término de ET representa la pérdida de agua a través de los procesos combinados de evaporación (desde el suelo) y transpiración de la planta (ASCE - Ewri, 2005). El modelo ASCE-PM define la E_{Tr} como la tasa de pérdida de agua de un cultivo estándar con 12 cm de altura (cultivo corto, como pasto) o 0.5 m (cultivo largo, como alfalfa). E_{Tr} depende de las condiciones climáticas, por lo tanto, es necesario utilizar datos meteorológicos precisos para determinarla.

El método estándar para estimar E_{Tr} es el modelo estandarizado de la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) y Penman – Monteith (ASCE-PM). El modelo ASCE-PM se puede calcular usando la Ecuación 4.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad [4]$$

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia para pasto corto (mm día⁻¹).

Δ : Pendiente de la curva presión de vapor de saturación y temperatura (kPa °C⁻¹),

R_n : Radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

G : Densidad de flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

γ : Constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

e_s : Presión de vapor de saturación (kPa).

e_a : Presión de vapor actual (kPa).

T : Temperatura media diaria del aire de 1.5 m a 2.5 m de altura ($^\circ\text{C}$).

u_2 : Velocidad de viento a 2 m de altura (m s^{-1}).

C_n y C_d : Constantes que dependen del tipo de referencia y del paso del tiempo de cálculo (diario).

Las constantes C_n y C_d en el modelo de ASCE-PM para determinar la ETr son diferentes cuando se trata de un cultivo estándar corto, con una altura aproximada de 0,12 m, como pasto, o cultivo estándar largo con una altura aproximada de 0,5 m, similar a α (ASCE, 2005). C_n considera el intervalo de tiempo y la rugosidad aerodinámica, mientras que C_d considera el intervalo de tiempo, la resistencia superficial total y la rugosidad aerodinámica de la superficie (ASCE, 2005). A continuación, en la Tabla 3 se presentan los valores C_n y C_d .

Tabla 3. Valor de C_n y C_d de la ecuación ASCE P-M para un cultivo de referencia corto (pasto) y largo (alfalfa), para un intervalo de tiempo diario.

Intervalo de tiempo	Cultivo de referencia corto		Cultivo de referencia alto		Unidad de medida	
	C_n	C_d	C_n	C_d	ET_0	Rn, G

Diario	900	0,34	1600	0,38	mm d ⁻¹	MJ m ⁻² d ⁻¹
--------	-----	------	------	------	--------------------	------------------------------------

Fuente: ASCE, 2005.

A continuación, en la Tabla 4 se muestran los parámetros que se deben considerar en la Ecuación 4.

Tabla 4. Valores de los parámetros y condiciones en la ecuación ASCE-PM para cultivos de referencia corto y largo.

Parámetros	Cultivo de referencia corto	Cultivo de referencia largo
Altura de cultivo de referencia (m)	0,12	0,5
Altura de medición de temperatura y humedad (m)	1,5-2,5	1,5-2,5
Altura de la medición de la velocidad de viento (m)	2,0	2,0
Altura del desplazamiento del espacio cero (m)	0,08	0,08
Calor latente de vaporización (MJ kg ⁻¹)	2,45	2,45

Fuente: ASCE 2005

4.5. Tratamiento de los Datos.

Los datos obtenidos de las ocho estaciones meteorológicas (Tabla 1) se trabajaron en el programa R-Studio (<https://posit.co/>) que tiene un fuerte componente de lenguaje estadístico y matemático. La ventaja principal del

programa usado es que es un código abierto, desarrollado para trabajar con una gran cantidad de datos.

Los datos de cada estación fueron obtenidos desde la red agrometeorológica del INIA (<https://agrometeorologia.cl/>). De las ocho estaciones, la estación Sauzal cuenta con 14 años de datos, , mientras que la estación Monte Flor-Tucapel cuenta con 8 años. El resto de estaciones seleccionadas cuenta con 13 años de registro de datos meteorológicos. Para la calibración de los coeficientes α y β se consideraron 12 años de datos meteorológicos, a excepción de la estación Monte Flor-Tucapel que se consideraron 7 años, mientras que para la evaluación del modelo se utilizó el periodo de un año (específicamente el año 2023).

La primera parte, calibración del modelo, el coeficiente α se calculó usando la Ecuación 2 del modelo H-S, considerando la temperatura del aire y la radiación solar diaria. Posteriormente, ETr diaria fue calculada con el modelo ASCE-PM (Ecuación 4) y utilizando la Ecuación 3 se obtuvo el coeficiente β .

La segunda parte, evaluación del modelo, consistió en utilizar el año 2023 para estimar ETr mediante el modelo H-S, donde α y β ya están calibrados, y se comparó con los datos obtenidos del modelo ASCE-PM. Para esto se utilizaron parámetros estadísticos para evaluar el desempeño del modelo H-S calibrado, tales como: La raíz del error cuadrático medio (RMSE) (Ecuación 5) y coeficiente de determinación (R^2) (Ecuación 6).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad [5]$$

Donde:

n : es el número total de observaciones.

y_i : son los valores observados.

y'_i : son los valores predichos.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad [6]$$

Donde:

SS_{res} : es la suma de cuadrados de los residuos, que se calcula como:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \quad [7]$$

SS_{tot} : es la suma total de los cuadrados, que se calcula como:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y''_i)^2 \quad [8]$$

Donde:

y'' : es la media de los valores observados

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis temporal de las variables meteorológicas en el sitio de estudio

5.1.1. Temperatura del aire

La temperatura promedio del aire (T_a) en el sitio de estudio tuvo una variación entre los 5 a 25 °C. Estos valores son típicos para zonas que poseen el clima templado predominante. Específicamente, para la estación Chanco (Figura 12b) la T_a promedio alcanzó valores inferiores a los 15 °C debido a su ubicación geográfica (cordillera de la Costa), cercana a un cuerpo de agua, en comparación con las estaciones del valle central, como por ejemplo la estación Ninhue (Figura 12d), donde T_a promedio es mayor a 15 °C. Para las estaciones analizadas, las T_a promedio máximas coinciden con el verano bordeando los 23,5 °C durante el periodo de estudio analizado.

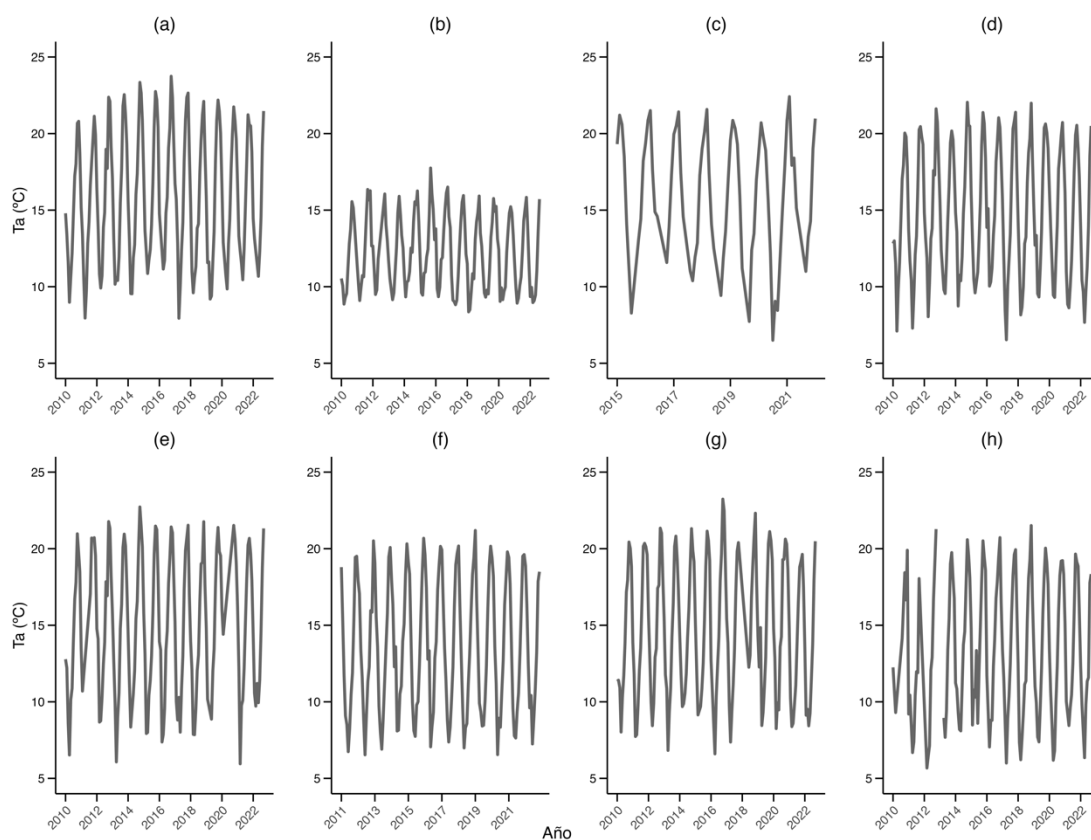


Figura 11. Temperatura promedio del aire (T_a) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h).

5.1.2. Humedad relativa

La humedad relativa (HR) en el sitio de estudio presentó una variación entre el 40% y 80%, con un valor promedio de 60%, lo que representa una zona relativamente húmeda (Figura 12). A diferencia de la T_a , los máximos de HR ocurren en invierno, alcanzando valores superiores al 80%. En la zona costera se observa una tendencia más constante y con menor variabilidad (Figura

12b), mientras que en la zona precordillerana (Figura 12h) se registran picos de HR > 80%, manteniendo un promedio de HR en torno al 70%.

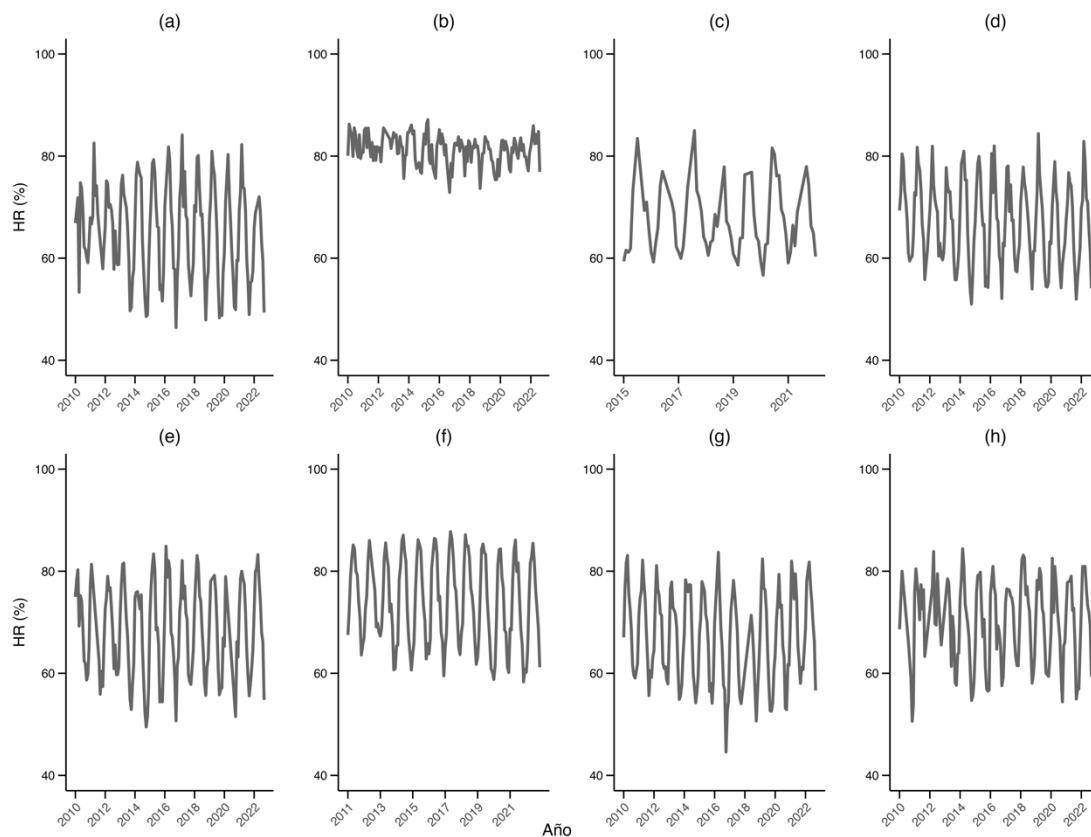


Figura 12. Humedad relativa promedio diario del aire (HR) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h).

5.1.3. Radiación solar

La radiación solar (R_s) en el sitio de estudio se presenta como una variable climatológica cíclica, ya que muestra una forma ondulada y permanente a lo

largo del tiempo (Figura 13). En la época de primavera, comienza a aumentar hasta alcanzar su máximo en verano (entre 22 y 30 MJ m⁻² día⁻¹), y luego empieza a disminuir a partir del otoño, alcanzando su valor mínimo en invierno (entre 5 y 10 MJ m⁻² día⁻¹). Al comparar la Figura 13c con la Figura 13g, se observa que la falta de registro de datos es un factor predominante para determinar el comportamiento general de una variable. Además, la Rs en el valle de la región de Ñuble (Figura 13a, 13e y 13g) alcanza los 30 MJ m⁻² día⁻¹.

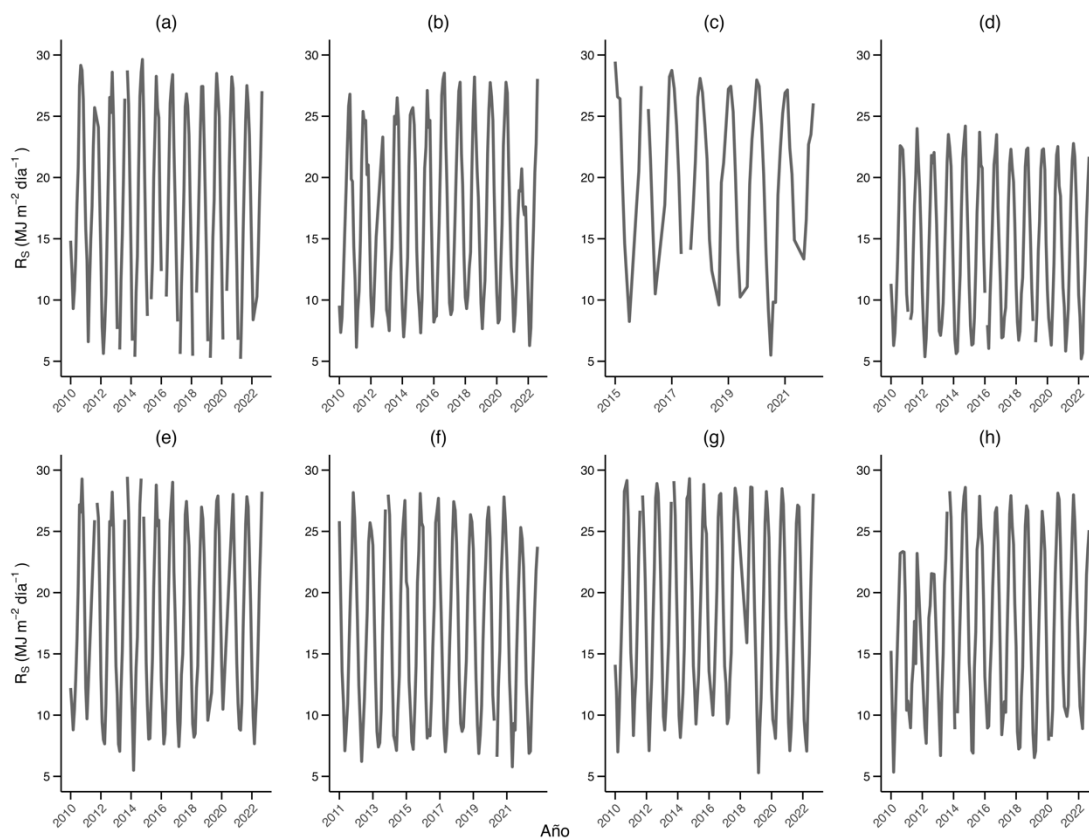


Figura 13. Radiación solar diaria (Rs) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h).

5.1.4. Velocidad de viento

La velocidad de viento (u) en el sitio de estudio presenta patrones distintivos según la ubicación geográfica. En las Figura 14d y 14e, que corresponden al valle de la región de Ñuble, se observan u constantes y patrones cíclicos oscilando entre 4 y 8 m s^{-1} . Por otro lado, las zonas costeras (Figura 14b) y cordilleranas (Figura 14h) muestran una mayor variabilidad en los datos, con fluctuaciones entre 2 y 12 m s^{-1} a lo largo del tiempo. Sin embargo, la zona costera (Figura 14b) muestra una tendencia general decreciente desde 2014 hasta 2022.

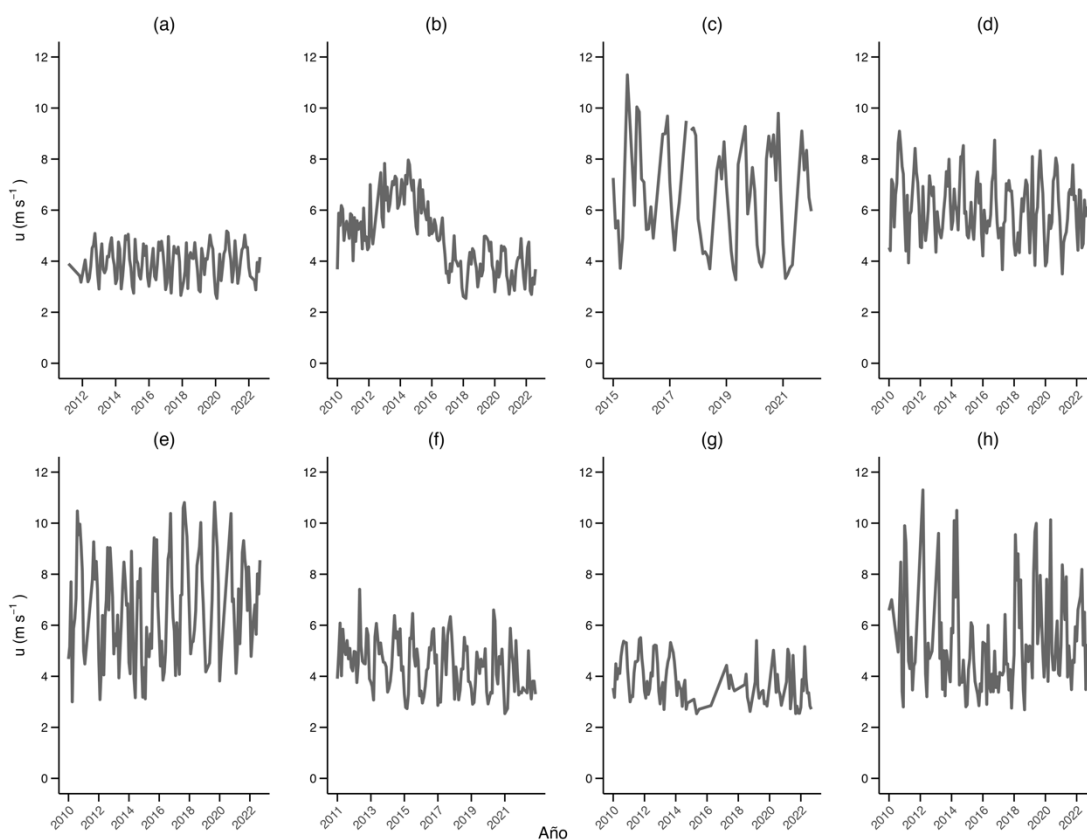


Figura 14. Velocidad de viento promedio diario (u) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h).

5.2. Factores de corrección del modelo de H-S (α y β) en el sitio de estudio

5.2.1. Coeficiente de corrección α

El coeficiente de corrección α se calculó para ocho estaciones meteorológicas, mostrando una tendencia relativamente constante y cíclica a lo largo del período de estudio (Figura 15). Los valores presentados corresponden a promedios mensuales del conjunto total de datos. En el análisis detallado de las estaciones, se observa que los valores de α oscilan principalmente entre 0,10 y 0,20, con patrones estacionales marcados en algunas ubicaciones. La estación costera (Figura 15b) muestra α más altos y estables, cercanos a 0,18, mientras que las estaciones del valle (Figura 15d, 15e y 15f) presentan α menores, alrededor de 0,12-0,15. Las fluctuaciones más pronunciadas se observan en la estación precordillerana (Figura 15h), con variaciones que reflejan posibles influencias topográficas y estacionales.

Similares resultados fueron encontrados por Lujano Laura, (2024), donde calibró el factor de corrección α para el altiplano en Perú (>2800 m s.n.m.). Lujano Laura, (2024), encontró valores promedio de α igual a 0,17, junto al valores del coeficiente de correlación (R) en rango de 0.84 a 0.97. Por otro

lado (Moeletsi et al., 2013), con similares evaluaciones, encontró rangos de α entre 0.150 y 0.215, valores cercanos a los encontrados en esta investigación para la región de Ñuble.

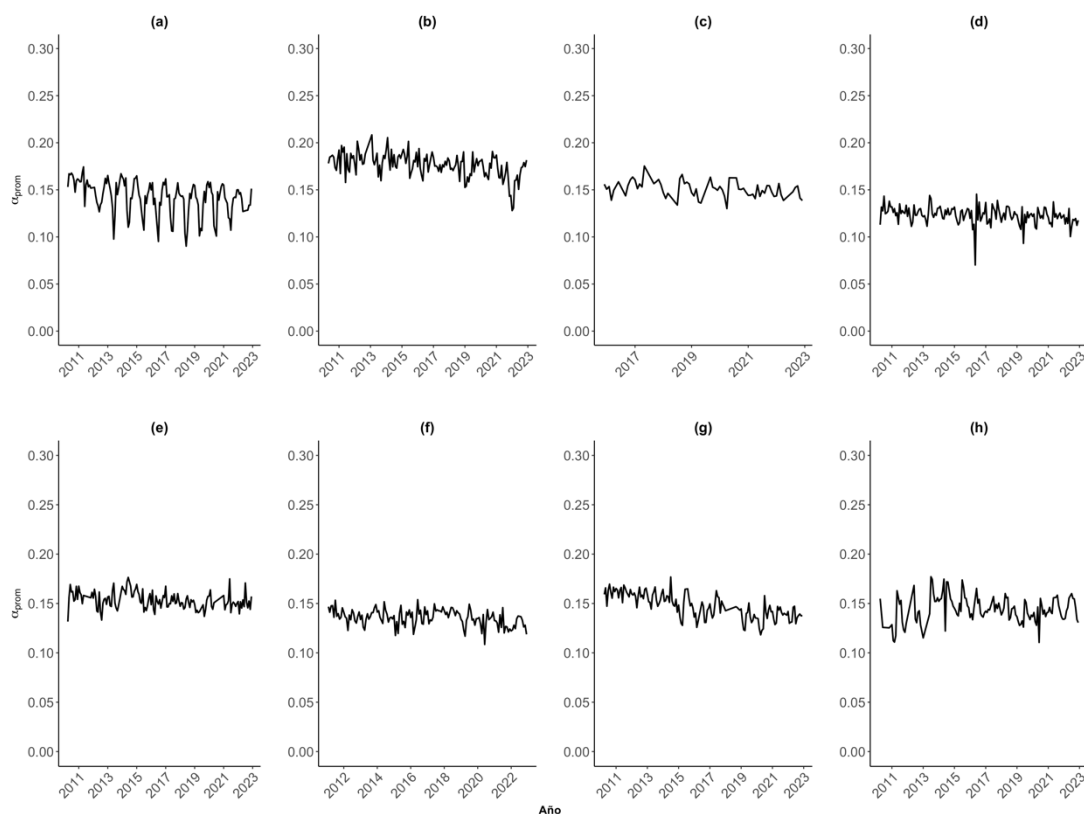


Figura 15. Coeficiente de corrección α promedio mensual (α_{prom}) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h).

A continuación en la Tabla 5 se muestran los valores calibrados de α para las estaciones analizadas en el sitio de estudio.

Tabla 5. Factor de corrección α promedio para las estaciones meteorológicas del sitio de estudio. SD es la desviación estándar.

Estación	α	SD
Bulnes	0,1479	0,0218
Chanco	0,1758	0,0291
Monte Flor-Tucapel	0,1507	0,0135
Ninhue	0,1235	0,0194
Portezuelo	0,1527	0,0181
Santa Rosa	0,1353	0,0180
Sauzal	0,1466	0,0203
Yungay	0,1428	0,0148

5.2.2. Coeficiente de corrección β

El coeficiente de corrección β fue analizado para ocho estaciones meteorológicas, revelando patrones distintivos según la ubicación geográfica. Los valores se mantienen generalmente entre 0,003 y 0,008, con variaciones cíclicas anuales (Figura 16). Las estaciones del valle central del sitio de estudio (Figura 16d, 16e y 16f) muestran una mayor amplitud en sus ciclos estacionales, con valores que oscilan regularmente entre 0,003 y 0,007. La zona costera (Figura 16b) presenta una menor variabilidad, con valores promedio de 0,004. Se observa que la zona precordillerana (Figura 16h) exhibe una mayor irregularidad en sus patrones, posiblemente debido a la influencia de factores orográficos locales. La serie temporal completa (2011-

2022) muestra una ligera tendencia a la estabilización de los valores en los últimos años, especialmente en el valle central del sitio de estudio.

Similares resultados fueron encontrados por Awal et al., (2020) donde estimó la ETr bajo datos climáticos limitados en Texas, USA. Awal et al., (2020) encontró valores promedio de β igual a 0,0023, mientras que al realizar un análisis mensual de β , éste varió entre 0,0020 y 0,0051. Por otro lado L. Morales-Salinas et al., (2017), evaluaron la variación espacial de ETr para la zona centro sur de Chile, dividiendo el sitio de estudio en “Costa”, “Valle” y “Montaña”. Ellos encontraron valores de β promedio de 0,0109, 0,0125, y 0,0155 para la Costa, el Valle y la Montaña, respectivamente.

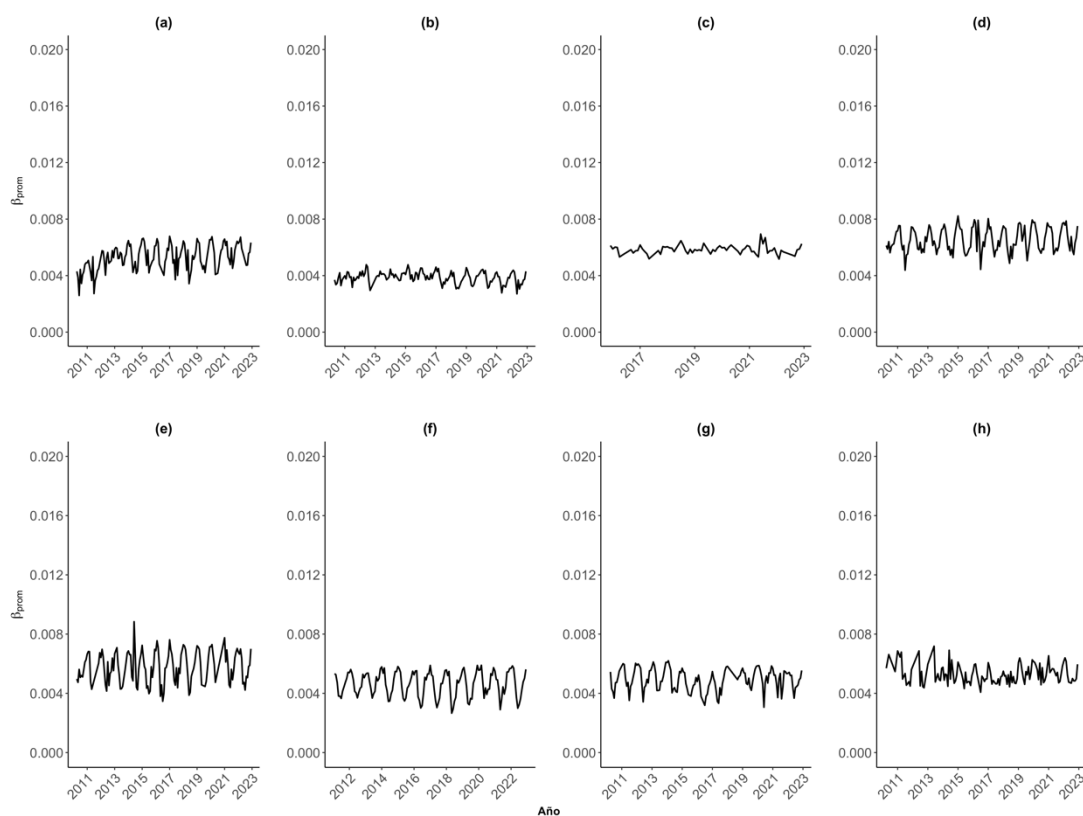


Figura 16. Coeficiente de corrección β promedio mensual (β_{prom}) con respecto al tiempo para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h).

A continuación en la Tabla 6 se muestran los valores calibrados de β para las estaciones analizadas en el sitio de estudio.

Tabla 6. Factor de corrección β promedio para las estaciones meteorológicas del sitio de estudio. SD es la desviación estándar.

Estación	Beta	Desviación Estándar
Bulnes	0,00553	0,00125
Chanco	0,00393	0,00080
Monte Flor-Tucapel	0,00586	0,00054
Ninhue	0,00667	0,00130
Portezuelo	0,00612	0,00150
Santa Rosa	0,00484	0,00109
Sauzal	0,00511	0,00093
Yungay	0,00537	0,00089

5.3. Evapotranspiración de referencia del modelo de H-S (ET_{HS}) y el modelo estandarizado ASCE Penman-Monteith (ASCE-PM) (ET_{PM}).

El análisis de la evapotranspiración en las ocho estaciones para el año 2023 muestra patrones característicos en la relación entre ET_{HS} y ET_{PM} . Se observa

que para épocas de primavera/verano y otoño/invierno la ETr oscila entre 0,5 y 8,0 mm día⁻¹. En general, la dispersión de los datos aumenta 25% cuando los valores de evapotranspiración son mayores a 6,5 mm día⁻¹. Este comportamiento es consistente en todos los distritos estudiados, aunque con variaciones específicas según la ubicación geográfica.

La zona costera (Figura 17b) presenta valores de ETr significativamente menores, con la mayoría de las mediciones concentradas entre 1 y 4 mm día⁻¹. Esta característica se atribuye a su ubicación geográfica costera, donde las condiciones climáticas marítimas moderan los procesos de evapotranspiración.

El valle Central (Figuras 17d, 17e, 17f) muestra una distribución más amplia de ETr, alcanzando frecuentemente valores de ETr entre 5 y 7 mm día⁻¹. La dispersión en estas estaciones sigue un patrón lineal (valores cercanos a la relación 1:1) para el periodo de estudio.

Las zonas precordilleranas (Figuras 17g y 17h) exhiben una mayor variabilidad en los valores de ET altos, con una mayor dispersión cuando la ET > 6 mm día⁻¹. La correlación entre ET_{HS} y ET_{PM} se mantiene similar para valores bajos (1 a 3 mm día⁻¹) y medios (3 a 5,5 mm día⁻¹) de ET.

Es importante destacar que, a pesar de la dispersión observada en valores altos, el modelo mantiene una tendencia general coherente en todas las estaciones, sin mostrar comportamientos atípicos significativos que pudieran indicar errores sistemáticos en las mediciones.

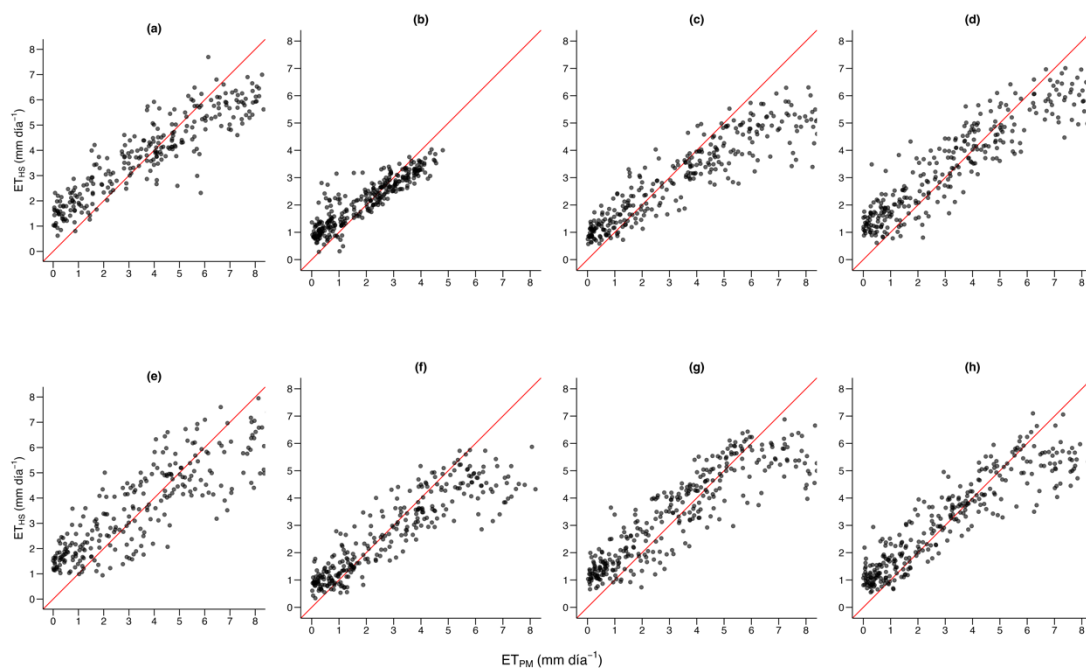


Figura 17. Evapotranspiración de referencia del año 2023 usando el modelo de H-S (ET_{HS}) con respecto al modelo estandarizado ASCE Penman-Monteith (ET_{PM}) para las estaciones meteorológicas Bulnes (a), Chanco (b), Monte Flor-Tucapel (c), Ninhue (d), Portezuelo (e), Santa Rosa (f), Sauzal (g) y Yungay (h). La línea recta de color rojo representa la relación 1:1.

Tabla 7. RMSE y R^2 de la estimación de ET usando el modelo H-S con respecto al modelo ASCE-PM para las estaciones meteorológicas del sitio de estudio.

Estación	R^2	RMSE (mm día ⁻¹)
Bulnes	0,83	1,2
Chanco	0,82	0,6
Monte Flor-Tucapel	0,82	1,2
Ninhue	0,82	1,4
Portezuelo	0,75	2,1
Santa Rosa	0,81	1,1
Sauzal	0,79	1,1
Yungay	0,82	1,2
Promedio de la región de Ñuble	0,81	1,3

Similar a Temesgen *et al.* (2005), en este estudio el método de Hargreaves muestra una buena alternativa de estimar ET_r cuando la disponibilidad de datos es limitada. Esto considerando que la temperatura del aire es una de las variables de registro más común y que puede ser interpolada, espacial y temporalmente, con mayor seguridad que cualquier otra variable meteorológica. Esto es útil, por ejemplo, en zonas cordilleranas donde el acceso a datos meteorológicos es escaso. Al comparar ET_{HS} y ET_{PM} el coeficiente de determinación promedio para el sitio de estudio fue 0,81 con un RMSE de 1,3 mm día⁻¹.

CONCLUSIONES

Se calibraron los coeficientes de corrección α y β del modelo de Hargreaves-Samani para la región de Ñuble, Chile, mediante un análisis de datos meteorológicos recopilados durante un período de 14 años (2009-2023). Los resultados mostraron que los coeficientes α y β presentan variaciones que reflejan las características específicas de cada distrito agroclimático, con valores promedio de 0,1462 y 0,00537 para α y β , respectivamente, y con una desviación estándar promedio para el sitio de estudio de 0,0189 y 0,00099, respectivamente, lo que valida la consistencia de los coeficientes calibrados.

Para respaldar la calibración de α y β , se analizó la variabilidad temporal de los datos meteorológicos que influyen en la ETr. Se encontró que la Ta fue desde los 5 a 25 °C, la u varió entre 2,5 a 12 m s⁻¹, la HR fue mayor en zonas costeras donde tiene un comportamiento constante comparado a la zona precordillerana, y la Rs se mantuvo similar en el periodo de estudio. A través de un análisis detallado de las variables climáticas, se identificaron las variaciones temporales de la Ta, Rs, HR y u, lo que permitió una calibración confiable de los coeficientes α y β .

Los resultados mostraron que la estimación de ET_{HS} con el modelo ET_{PM} usando α y β calibrados para el sitio de estudio podría mejorar las estimaciones de ETr. La evaluación mostró una alta correlación entre ambos modelos, con un R² promedio de 0,81 y un RMSE promedio de 1,30 mm·día⁻¹. Sin embargo, se observó que el modelo H-S tiende a subestimar la ETr cuando la ET_{PM} es

mayor a $6,5 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, lo que subraya la necesidad de una calibración específica para cada zona agroclimática.

Finalmente, este estudio valida la efectividad del modelo H-S y proporciona una alternativa viable para estimar ET en contextos donde los datos meteorológicos son limitados. La adaptación del modelo a las condiciones locales contribuye al manejo sostenible de los recursos hídricos en el sector agrícola, lo que es crucial para enfrentar los desafíos del cambio climático y la variabilidad climática en la región. A futuro se espera que este enfoque pueda ser implementado en una aplicación móvil que permita a los agricultores conocer la ETr diaria y su pronóstico para facilitar la planificación y gestión eficiente del riego en la región de Ñuble.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, 298(0).
- Asce-Ewri. (2005). The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. En *ASCE–EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committe Rep.* ASCE Reston, Va.
- Awal, R., Habibi, H., Fares, A., & Deb, S. (2020). Estimating reference crop evapotranspiration under limited climate data in West Texas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100677>
- Faúndez de la Fuente, F. I. (2016). *Balance de energía superficial y evotranspiración en arándano (Vaccinium corymbosum) bajo riego.*
- Hargreaves, G. H. (1975). Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, 18(5), 980–984.
- Hargreaves, G. H. (1994). Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 120(6), 1132–1139.
- Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129(1), 53–63.

- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225–230.
- Hunt, J. F., Honeycutt, C. W., Starr, G., & Yarborough, D. (2008). Evapotranspiration rates and crop coefficients for Lowbush Blueberry (*Vaccinium angustifolium*). *International Journal of Fruit Science*, 8(4), 282–298. <https://doi.org/10.1080/15538360802597549>
- Jagtap, S. S. (1991). Spatial pattern of reference evapotranspiration in Africa. *Paper-American Society of Agricultural Engineers (USA)*.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements: a manual. *ASCE manuals and reports on engineering practice (USA)*. no. 70.
- Liu, X., Xu, C., Zhong, X., Li, Y., Yuan, X., & Cao, J. (2017). Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. *Agricultural Water Management*, 184, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.01.017>
- Lujano Laura, A. (2024). *Modificación de la ecuación de Hargreaves-Samani para la estimación de la evapotranspiración de referencia en el Altiplano peruano*.
- Moeletsi, M. E., Walker, S., & Hamandawana, H. (2013). Comparison of the Hargreaves and Samani equation and the Thornthwaite equation for estimating dekadal evapotranspiration in the Free State Province, South

Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 66, 4–15.

<https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.08.003>

Oliveira, R. Z., Oliveira, L. F. C. de, Wehr, T. R., Borges, L. B., & Bonomo, R. (2005). *Comparative study of estimative models for reference evapotranspiration for the region of Goiânia, GO.*

Osses Bobadilla, F.J. 2019. Determinación de la evapotranspiración de cultivo y evaporación de suelo en frutales. Memoria de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.

Pereira, L. S., De Juan, J. A., Picornell, M. R., & Tarjuelo, J. M. (2010). El riego y sus tecnologías. *Albacete: CREA-UCLM*, 296.

Raziei, T., & Pereira, L. S. (2013). Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 121, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.019>

Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 126(4), 265–267.

Sánchez Martínez, M., & Carvacho Bart, L. (2011). *Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile 1* (Vol. 50). Otros temas.

- Santibáñez, Q. (2017). *Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo IV: Regiones del Biobío y de La Araucanía.*
- Toro-Trujillo, A. M., Arteaga-Ramírez, R., Alberto Vázquez-Peña, M., & Alicia Ibáñez-Castillo, L. (2015). MODELOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN LA ZONA NORTE BANANERA DEL URABÁ ANTIOQUEÑO (COLOMBIA) ESTIMATION MODELS FOR THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION VALUE IN THE NORTHERN BANANA ZONE OF ANTIOQUIAN URABA (COLOMBIA). En *Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia* (Vol. 49).
- Xiaoying, L., & Erda, L. (2005). Performance of the Priestley–Taylor equation in the semiarid climate of North China. *Agricultural Water Management*, 71(1), 1–17.

q

ANEXO

A. Código R para la calibración de los coeficientes alfa y beta.

Librerías

```
library(readxl)
```

```
library(writexl)
```

```
library(dplyr)
```

```
library(lubridate)
```

```
library(tidyr)
```

```
library(stringr)
```

```
library(scales)
```

```
library(ggplot2)
```

0. Datos geográficos de la estación Santa Rosa

```
latitud <- -36.535 # Latitud en grados decimales (Sur)
```

```
longitud <- -71.916 # Longitud en grados decimales (Este)
```

```
altitud <- 194 # Altitud sobre el nivel del mar (m)
```

1. Definir parámetros generales y rutas

```
archivo <- '/Users/juanpablo/Documents/Tesis final /datos estaciones /datos  
extraidos agroclima /santa rosa años 2009 - 2023.xlsx'
```

```
ruta_salida <- '/Users/juanpablo/Documents/Tesis final /datos estaciones  
/datos calculados por Rstudio/datos generado por IA'
```

```
nombre_archivo_resultados <- file.path(ruta_salida,
'resultados_alfa_beta.xlsx')
```

```
nombre_archivo_salida_2022 <- file.path(ruta_salida,
'procesados_hasta_2022.xlsx')
```

#2 Parámetros meteorológicos y constantes para pasto corto

```
msnm <- altitud
```

```
Pat <- 101.3 * ((293 - 0.0065 * msnm) / 293)^5.26 # Presión atmosférica (kPa)
```

```
psyco <- 0.000665 * Pat # Constante psicrométrica (kPa/°C)
```

```
G <- 0 # Flujo de calor del suelo (MJ/m2/día), se considera 0 para periodos
diarios
```

```
Cp <- 1.013e-3 # Calor específico del aire (MJ/kg/°C)
```

```
epsilon <- 0.622 # Relación de peso molecular del vapor de agua/aire seco
```

```
sigma <- 4.903e-9 # Constante de Stefan-Boltzmann (MJ/K4/m2/día)
```

```
albe <- 0.23 # Albedo (coeficiente de reflexión)
```

```
Cn <- 900 # Constante para pasto corto (mm s/MJ)
```

```
Cd <- 0.24 # Constante para pasto corto
```

```
Kc <- 0.65 # Coeficiente de cultivo para pasto corto
```

```
rs <- 70 # Resistencia superficial (s/m)
```

3. Lectura y preprocesamiento de datos

```
datos <- read_xlsx(archivo, col_names = FALSE)
```

```
colnames(datos) <- c("N", "Fecha", "Tmin", "Tmax", "Humedad", "Radmax",
"VViento")
```

3.1.- Preprocesamiento

```

datos <- datos %>%
  drop_na() %>%
  filter_all(all_vars(. != "")) %>%
  mutate(
    Fecha = suppressWarnings(dmy(Fecha)),
    across(c(Tmin, Tmax, Humedad, Radmax, VViento), ~
as.numeric(str_replace_all(.x, "[^0-9.-]", "")))
  ) %>%
  filter(
    !is.na(Fecha), !is.na(Tmin), !is.na(Tmax),
    !is.na(Humedad), !is.na(Radmax), !is.na(VViento),
    Radmax != 0, Tmax > Tmin
  )

```

4. Cálculos de evapotranspiración y otros parámetros

```

datos <- datos %>%
  mutate(
    Tmean = (Tmin + Tmax) / 2,
    Dia_Juliano = yday(Fecha),
    esat = (0.6108 * exp((17.27 * Tmin) / (Tmin + 237.3)) + 0.6108 * exp((17.27
* Tmax) / (Tmax + 237.3))) / 2,
    eact = (Humedad / 100) * esat,
    delta = (4098 * (0.6108 * exp((17.27 * Tmean) / (Tmean + 237.3)))) / ((Tmean
+ 237.3)^2),

```

```

Rns = (1 - albe) * Radmax,
Rnl = sigma * (((Tmax + 273.16)^4 + (Tmin + 273.16)^4) / 2) * (0.34 - 0.14 *
sqrt(eact)),
Rn = Rns - Rnl,
ET_P_M = pmax((0.408 * delta * (Rn - G) + (psyco * (900 / (Tmean + 273))
* VViento * (esat - eact))) / (delta + psyco * (1 + 0.34 * VViento)), 0)
) %>%
filter(ET_P_M != 0)

```

5. Calcular coeficientes alfa y beta del modelo de Hargreaves-Samani

```

datos <- datos %>%
mutate(
  ws = acos(-tan(latitud * pi / 180) * tan(0.409 * sin((2 * pi / 365) * Dia_Juliano
- 1.39))),
  dr = 1 + 0.033 * cos((2 * pi / 365) * Dia_Juliano),
  decli = 0.409 * sin((2 * pi / 365) * Dia_Juliano - 1.39),
  Ra = (24 / pi) * 4.92 * dr * (ws * sin(latitud * pi / 180) * sin(decli) + cos(latitud
* pi / 180) * cos(decli) * sin(ws)),
  alfa_HS = Radmax / (Ra * sqrt(Tmax - Tmin)),
  beta_HS = ET_P_M / ((Tmean + 17.8) * Radmax)
)

```

5.1.- Calcular coeficientes globales y estadísticas

```

alfa_HS_global <- mean(datos$alfa_HS, na.rm = TRUE)
beta_HS_global <- mean(datos$beta_HS, na.rm = TRUE) #*1.1 #0.00675

```

```

desviacion_alfa <- sd(datos$alfa_HS, na.rm = TRUE)
desviacion_beta <- sd(datos$beta_HS, na.rm = TRUE)
coef_var_alfa <- (desviacion_alfa / alfa_HS_global) * 100
coef_var_beta <- (desviacion_beta / beta_HS_global) * 100
rmse_alfa <- sqrt(mean((datos$alfa_HS - alfa_HS_global)^2, na.rm = TRUE))
rmse_beta <- sqrt(mean((datos$beta_HS - beta_HS_global)^2, na.rm =
TRUE))

```

6.- Resultados

```

resultados <- data.frame(
  Estadística = c("Promedio Alfa Global", "Promedio Beta Global", "Desviación
Estándar Alfa", "Desviación Estándar Beta", "Coeficiente de Variación Alfa",
"Coeficiente de Variación Beta", "RMSE Alfa", "RMSE Beta"),
  Valor = c(alfa_HS_global, beta_HS_global, desviacion_alfa,
desviacion_beta, coef_var_alfa, coef_var_beta, rmse_alfa, rmse_beta)
) write_xlsx(resultados, path = nombre_archivo_resultados)

```

6.1.- Guardar datos procesados hasta 2022

```

datos_hasta_2022 <- datos %>% filter(Fecha < as.Date("2023-01-01"))
write_xlsx(datos_hasta_2022, path = nombre_archivo_salida_2022)

```

7.- Procesar y guardar datos desde 2023 en adelante

```

datos_desde_2023 <- datos %>%
  filter(Fecha >= as.Date("2023-01-01")) %>%
  mutate(ET_H_S = ifelse(Tmax > Tmin & ET_P_M != 0, alfa_HS_global * Ra
* sqrt(Tmax - Tmin) * beta_HS_global * (Tmean + 17.8), 0))

```

```
write_xlsx(datos_desde_2023, path = file.path(ruta_salida,
'datos_desde_2023.xlsx'))
```

7.1.- Calcular R² y RMSE para ET H-S vs ET P-M en 2023

```
modelo_ET <- lm(ET_H_S ~ ET_P_M, data = datos_desde_2023)
```

```
r2_ET <- summary(modelo_ET)$r.squared
```

```
rmse_ET <- sqrt(mean((datos_desde_2023$ET_H_S -
datos_desde_2023$ET_P_M)^2, na.rm = TRUE))
```

Agregar estos valores a los resultados

```
resultados <- rbind(resultados,
```

```
data.frame(Estadística = c("R2 ET H-S vs ET P-M (2023)", "RMSE
```

```
ET H-S vs ET P-M (2023)",
```

```
Valor = c(r2_ET, rmse_ET)))
```

```
write_xlsx(resultados, path = nombre_archivo_resultados)
```

B. Código utilizado para la aplicación móvil en lenguaje Swift

```
struct ContentView: View {
```

```
    @StateObject private var viewModel = WeatherViewModel()
```

```
    @StateObject private var locationManager = LocationManager()
```

```
var body: some View {
```

```
    NavigationView {
```

```
        ScrollView {
```

```
            VStack(spacing: 20) {
```

```
if let location = locationManager.userLocation {  
    if let closestCity = City.closestCity(to: location) {  
        Text("Ciudad más cercana: \("\(closestCity.name)")")  
            .font(.caption)  
            .padding(.top)  
    }  
}  
  
Picker("Ciudad", selection: $viewModel.selectedCity) {  
    ForEach(City.cities) { city in  
        Text(city.name).tag(city)  
    }  
}  
  
.pickerStyle(MenuPickerStyle())  
.padding()  
  
if let confirmedLocation = viewModel.confirmedLocation {  
    Text("Ubicación: \("\(confirmedLocation)")")  
        .font(.headline)  
        .padding(.horizontal)  
}  
  
Button("Actualizar Pronóstico") {
```

```
        viewModel.fetchWeather()
    }

    .buttonStyle(.borderedProminent)
    .padding()

    ForEach(viewModel.forecasts) { forecast in
        DayForecastView(forecast: forecast)
    }
}

.padding()
}

.navigationTitle("ET Calculator")

.onAppear {
    if let location = locationManager.userLocation,
        let closestCity = City.closestCity(to: location) {
        viewModel.selectedCity = closestCity
        viewModel.fetchWeather()
    }
}
}
}
```

```
struct SplashView: View {  
  
    @State private var isActive = false  
  
    var body: some View {  
  
        if isActive {  
  
            ContentView()  
  
        } else {  
  
            VStack {  
  
                Text("Bienvenido a tu\npronóstico de")  
  
                    .font(.title)  
  
                    .multilineTextAlignment(.center)  
  
  
                Text("Evapotranspiración")  
  
                    .font(.title)  
  
                    .foregroundColor(.red)  
  
                    .underline()  
  
                    .padding()  
  
  
                Text("By Cachupencio.com apoyado por IA")  
  
                    .font(.caption)  
  
                    .padding(.top, 50)  
  
            }  
  
            .onAppear {
```

```
DispatchQueue.main.asyncAfter(deadline: .now() + 2.0) {  
    withAnimation {  
        self.isActive = true  
    }  
}  
}  
}  
}  
}  
}
```