



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

VALIDACIÓN DEL MODELO WRF EN EL VALLE DE CAJAMARCA, REGIÓN  
CAJAMARCA, PERÚ.

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y  
CLIMATOLOGÍA

YENNY MARISOL SAAVEDRA MURRUGARRA

PROFESOR GUÍA  
RICARDO MUÑOZ MAGNINO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JOSÉ RUTLLANT COSTA  
JUAN QUINTANA ARENA

SANTIAGO DE CHILE

2016

## Resumen

En el valle de Cajamarca, ubicado en la sierra norte del Perú, la utilización de modelos meteorológicos de mesoescala y la modelación atmosférica son escasos al igual que los estudios de caracterización climática. En la presente investigación se realizó la caracterización climática de las principales variables meteorológicas en el valle utilizando datos de la red de estaciones del SENAMHI. Además se modelaron las condiciones de mesoescala para los meses de marzo y agosto de 2010 y así medir el desempeño del modelo meteorológico de mesoescala WRF en la representación de temperatura, precipitación y vientos. Los resultados de la modelación reproducen de buena forma el ciclo diario de temperatura, la modesta variabilidad inter-diaria de las temperaturas máximas y la mayor variabilidad de las temperaturas mínimas. El modelo sobrestimó en magnitud a las temperaturas mínimas en las partes altas y en el fondo del valle, mientras que en la ladera fueron subestimadas. Reproduce de buena manera la circulación local durante el día, lo que no ocurre con los vientos nocturnos. El modelo logra captar la estacionalidad marcada de la precipitación con condiciones secas durante agosto y las lluviosas que ocurren en marzo, sobrestimando sus valores sobre todo en las partes altas del valle.

## **Agradecimientos**

Doy gracias a Dios y a la vida por brindarme esta oportunidad.

A mis padres, hermanos, sobrinas y abuelas por darme todo y esto es para ellos.

A las Religiosas de María Inmaculada por brindarme un hogar en Santiago.

Agradezco a los profesores del Departamento de Geofísica y en especial al Prof.

Ricardo Muñoz por todo el apoyo y la paciencia durante el desarrollo del programa.

También agradecer a: Andrea, Hernaldo, Sergio, Camilo, Gigi, Juan Carlos y Andy por su apoyo y disponibilidad durante toda mi permanencia y a mis amigos de ayer y siempre Cheli y Carlos que pese a la distancia conmigo siempre.

## Tabla de contenido

1. Introducción .....	1
1.1. Contexto geográfico y climático del trabajo .....	1
1.2. Aplicaciones de modelación numérica para la región de estudio .....	3
1.3. Objetivos .....	6
2. Área de estudio, datos y modelación.....	7
2.1. Área de estudio y clima.....	7
2.2. Datos.....	9
2.3. Modelo WRF .....	11
3. Climatología del lugar.....	16
3.1. Temperatura .....	16
3.1.1. Ciclo diario .....	16
3.1.2. Variación estacional .....	17
3.1.3. Variación interdiaria .....	20
3.1.4. Variación interanual y relación con El Niño.....	23
3.1.5. Variación con la altura .....	28
3.2. Caracterización de heladas.....	29
3.3. Precipitación .....	33
3.4. Vientos.....	37
4. Validación del modelo .....	40
4.1. Temperatura .....	42
4.2. Precipitación .....	53
4.3. Velocidad y dirección del viento .....	59
5. Conclusiones .....	61
Bibliografía.....	63
Anexos .....	68

# 1. Introducción

## 1.1. Contexto geográfico y climático del trabajo

La región Cajamarca se ubica en la zona norte del Perú, entre los 4°30' y 7°30' S y los 77°47' y 79°20'O (Figura 1.1.). En la región la actividad agropecuaria es una de sus principales actividades económicas, la cual se ve muchas veces limitada por la ocurrencia de heladas, sequías, friajes, veranillos, inundaciones, etc., asociados a anomalías de los patrones de sistemas atmosféricos (Ministerio de Agricultura, 2013).



Figura 1.1: Ubicación de la región Cajamarca en el mapa del Perú.

Históricamente se ha presentado diversos fenómenos climáticos adversos, tales como: fenómeno de El Niño en los años 1982-1983 y 1997-1998 cuya clasificación fue de extremadamente severa, las sequías de los años 1991-1992 y 2003-2004, y las heladas en el año 2004 con una ocurrencia de cerca de 15 días durante el mes de enero. Uno de los principales fenómenos que se presenta siempre a causa del descenso de la temperatura, es la helada meteorológica que ocurre de abril a agosto de cada año. Este fenómeno afecta la sierra sur y central del Perú, alcanzando el sur de la región de Cajamarca en los meses de julio y agosto (Sistema Nacional de Defensa Civil, 2006).

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI (2010), en la sierra norte del Perú las heladas se presentan en dos períodos de frecuencia máxima (invierno y primavera). De acuerdo a Sánchez y Vásquez (2010), las temperaturas por debajo de 0 °C son más frecuentes en localidades altas de la provincia de Cajamarca, pero de menor ocurrencia de heladas respecto a la zona centro y sur del país.

Por su ubicación latitudinal, Cajamarca se encuentra en los trópicos. Esta región tropical se caracteriza por condiciones más homogéneas de temperatura donde la variación anual es de menor importancia que el ciclo diario (Baraer et al., 2012).

La circulación de la tropósfera superior sobre los trópicos de América del sur durante el verano se asocia con una amplia región de convección intensa centrada sobre la cuenca del Amazonas (Horel et al., 1989). La precipitación de Los Andes tropicales es producto de las tormentas convectivas profundas que se desarrollan sobre la cordillera (Garreaud, 2009). La precipitación presenta una estacionalidad marcada y controlada por la circulación de aire superior, con viento del Este el que transporta humedad de la Amazonía (Aceituno, 1989). En esta región se presentan dos estaciones: la estación lluviosa de octubre a abril (Vuille et al., 2008), y la estación seca, de mayo a agosto (Garreaud, 2009).

El patrón de precipitación anual principal entre 5 y 30° S, presenta un contraste entre condiciones secas y frías en la vertiente occidental de los Andes y las condiciones cálidas, húmedas y lluviosas de la zona oriental (Garreaud, 2009). En el verano austral, el ligero debilitamiento del anticiclón del sureste del Pacífico y el desplazamiento hacia el sur de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) permite el desarrollo de una temporada lluviosa (Lavado et al., 2012).

En el norte de Perú la precipitación es más concentrada durante el otoño austral, cuando la ZCIT alcanza su posición más al sur. Frente a la costa, la ZCIT apenas se mueve hacia el sur del ecuador porque las aguas frías en el Pacífico inhiben el desarrollo de la convección profunda (Garreaud, 2009).

En esta investigación, dada la escasa información climatológica disponible en la literatura, se realizará un breve análisis y caracterización climatológica del valle, haciendo uso de datos de estaciones pertenecientes al SENAMHI.

## **1.2. Aplicaciones de modelación numérica para la región de estudio**

Los modelos numéricos de pronóstico de tiempo constituyen una herramienta importante para entender, explicar y predecir el comportamiento atmosférico. El modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model) es un modelo numérico de predicción del tiempo de mesoescala que ofrece una amplia gama de aplicaciones meteorológicas (Skamarock et al., 2008).

En el Perú, entre los trabajos con uso del modelo WRF, se encuentran los realizados, por ejemplo, por Gálvez y Douglas (2006) quienes utilizan el modelo WRF para investigar el papel del lago Titicaca en la modelación de tormentas convectivas en la región.

Chamorro (2012), usa el modelo WRF para simular el comportamiento de la atmosfera sobre la región del Perú, tanto en condiciones normales como bajo condiciones ideales, evaluando la trascendencia de la variación de la TSM

(temperatura superficial del mar) en la intensificación de los vientos costeros y llegando a la conclusión de que los vientos costeros en Perú se intensifican durante El Niño como consecuencia del debilitamiento de los gradientes negativos de la TSM a lo largo de la costa.

Pasapera y Saavedra (2013), demuestran que la configuración de WRF implementada en el SENAMHI de la región Puno es apta para pronosticar nevadas con más de 24 horas de anticipación. También se puede mencionar los trabajos que viene realizando el Instituto Geofísico del Perú (IGP) como: “Estudios de nubes bajas sobre el Pacífico” (Segura et al., 2014) o sobre downscaling climático en varias regiones de los Andes tropicales peruanos: en particular en el valle del Mantaro, en la región de Cuzco (norte del Altiplano) y en la cuenca del río Santa. También cabe mencionar a Mourre et al. (2016), que aplica WRF para entender los mecanismos orográficos asociados a la dinámica atmosférica y a la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones en los Andes tropicales.

Referente a la validación del comportamiento del modelo, se puede mencionar la investigación de Junquas et al. (2013) en su estudio “Influencia de la orografía sobre las precipitaciones en los Andes tropicales”, donde se determina que el modelo sobreestima las lluvias en las alturas, siendo responsable de esto las lluvias no-convectivas. El modelo representa además mínimos de lluvias en los valles y en el lago Titicaca

De igual forma, Uribe (2014) investigó la capacidad que tiene el modelo WRF para simular valores extremos de precipitación comparando principalmente el esquema de parametrización de la precipitación de cúmulos Kain-Fritsch y el microfísico de dos momentos de Morrison en la región andina de Colombia, concluyendo que el esquema de Kain-Fritsch posee una baja capacidad de simular eventos extremos puesto que subestima las precipitaciones, mientras que el microfísico de Morrison tiene una mayor habilidad de hacerlo, aunque tiende a sobrestimar. También en el mismo país, Jiménez (2014) analizó la capacidad del modelo WRF para simular precipitaciones intensas en regiones con terrenos complejos, haciendo una comparación entre las técnicas de estadística tradicional



(TET) y las técnicas orientadas a objetos (TOO), concluyendo que las regiones en las que el modelo sobrestima las precipitaciones generalmente están asociadas con la mayor complejidad en la topografía. En el contexto chileno, Montes (2010) realizó una descripción de la variabilidad de temperaturas mínimas en el valle de Casablanca y las comparó con resultados del modelo WRF, teniendo como resultados la buena reproducción de la variabilidad temporal y espacial de las temperaturas mínimas en el Valle de Casablanca, representando bien la variabilidad de escala sinóptica, pero sobreestimando la magnitud de las temperaturas durante todo el periodo de simulación, siendo esta sobreestimación mayor en las temperaturas mínimas que las máximas.

Por su parte, Prabha y Hoogenboom (2008) realizaron una evaluación del modelo WRF para dos eventos de heladas en Georgia-USA, mostrando como resultado que la adecuada elección de las parametrizaciones físicas, el uso de suelo y la inclusión de alta resolución de la topografía, ayudan a reproducir razonablemente y con buena precisión las variables meteorológicas en superficie, en un escenario de clima cambiante.

La validación del modelo WRF en el Valle de Cajamarca, se realizará mediante la comparación de los resultados de las simulaciones con los datos observados de las estaciones meteorológicas en superficie, para de esta manera determinar el correcto o inadecuado desempeño del modelo numérico para el lugar señalado.

### 1.3. Objetivos

Actualmente en la región de Cajamarca no existen estudios de caracterización climática regional, salvo algunos estudios de carácter local, elaborados para proyectos específicos (Sánchez y Vásquez, 2010). De igual manera, la utilización de modelos meteorológicos de mesoescala y la modelación atmosférica con fines de pronóstico son escasos. Por lo tanto, para efectos de esta tesis se plantea el siguiente objetivo general:

- Validar los resultados del modelo WRF para el Valle de Cajamarca, Región Cajamarca, Perú.

Para conseguir este objetivo, se plantea los siguientes objetivos específicos:

- Analizar y describir las variables climáticas (temperatura, precipitación y viento) en el Valle de Cajamarca determinando ciclos diarios y anuales.
- Medir el desempeño del modelo para representar las temperaturas mínimas, precipitación y viento en el Valle de Cajamarca, con énfasis en la ocurrencia de heladas

## **2. Área de estudio, datos y modelación**

### **2.1. Área de estudio y clima**

La Cordillera de los Andes en el norte del Perú, es más baja y angosta que en el sur y en el centro del país. La región Cajamarca se encuentra en la zona norte del Perú, entre 4°30' y 7°30'S y los 77°47' y 79°20'O, ubicándose por su latitud en la zona tropical y en la vertiente oriental de los Andes. Presenta diferentes pisos altitudinales como: Yunga marítima, Quechua, Suni, Puna y Rupa Rupa; presentando un relieve con suave pendiente y baja altura en comparación con el resto de los andes peruanos, su paisaje es menos agreste, formado por numerosos valles interandinos.

El presente estudio se focaliza, concretamente, en el Valle de Cajamarca, que se ubica en la zona sur oriental de la región, abarcando las cuencas de los ríos Chonta y San Lucas, que contribuyen a la formación del río Cajamarca. Este río es afluente del Crisnejas, el cual alimenta al Marañón y éste a su vez desemboca en el río Amazonas. El río Cajamarca que desciende desde la provincia de Cajamarca, riega las tierras más ricas y productivas del Valle principal, donde se ubica la ciudad de Cajamarca. Los picos más altos de la cuenca del Río Cajamarca, están alrededor de 4000 metros sobre el nivel del mar y las cotas más bajas, desde los 2000 metros (Figura 2.1).

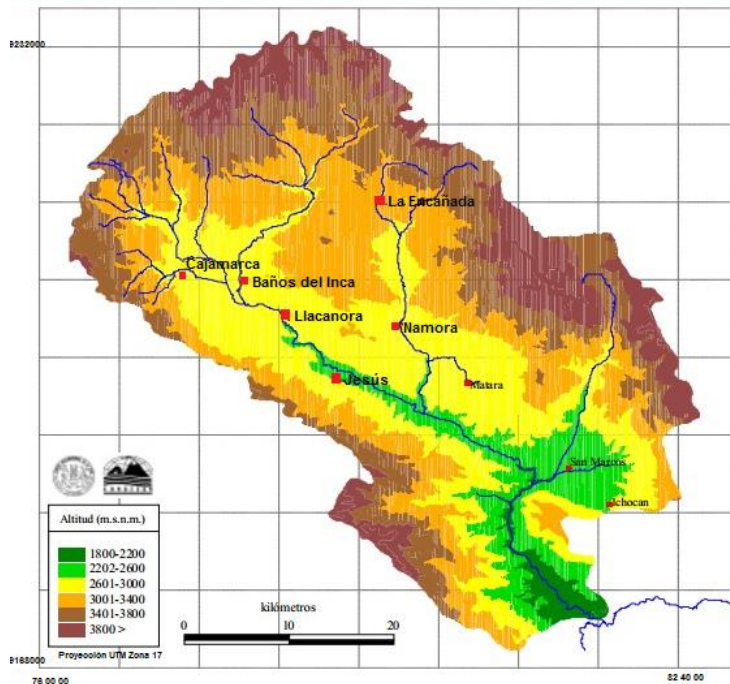


Figura 2.1 Altitudes de la cuenca del río Cajamarca, donde está inmerso el Valle de Cajamarca, figura tomada de De la Cruz et al. (1999).

El estudio de Sánchez y Vásquez (2010) hace uso de la clasificación de Köppen basada en el mapa climático nacional, sectorizado para la región e identifica una gran diversidad de climas en la región tales como: selva o ecuatorial (Af), estepa (Bsw), desierto (BW), templado moderado lluvioso (Cw) y frío boreal (Dwb). Esto es debido a la influencia de la cordillera de los Andes, su cercanía respecto de la línea ecuatorial y otros factores orográficos como el abra del Porculla. El abra del Porculla es el punto de encuentro entre la costa y la sierra Cajamarquina. En esta región se presentan montañas no tan abruptas, orientadas hacia la Amazonía. Además este punto marca una diferencia considerable entre las zonas centro y sur con la zona norte de la región. Al norte de  $6^{\circ} 30' S$  se obtienen temperaturas de distribución más o menos uniforme durante el año y mayores volúmenes de precipitación. Además, se detecta menor proporción de déficit hídrico durante la estación de estiaje hacia las laderas medias con ecosistemas de Bosques Montanos (Selva Alta) y Páramos. Hacia el sur de  $6^{\circ} 30'$ , se muestra un clima típicamente de sierra, donde las

temperaturas también tienen distribución más o menos uniforme, pero ellas son más bajas, pudiendo llegar a la formación de heladas a altitudes de 2600 m.s.n.m. Las precipitaciones también son bimodales, pero los volúmenes máximos son menores que hacia el norte y los mínimos pueden llegar a cero en los meses de estiaje. La amplitud de la depresión de mínimas precipitaciones es más amplia que hacia el norte. También se presentan casos de déficit hídrico durante la estación de estiaje, principalmente al sur de 7 °.

## 2.2. Datos

La información meteorológica usada en la tesis proviene de la red de estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI – Cajamarca), con un total de 9 estaciones meteorológicas distribuidas en lugares topográficamente distintos que se muestran en la figura 2.2 y se describen en la tabla 2.1. Esta información fue clasificada en tres tipos de datos:

- Datos multianuales de 5 estaciones tipo convencional, que comprenden desde el año 1997 hasta 2014, con información diaria de temperatura máxima y mínima y precipitación.
- Datos del año 2010 de 2 estaciones tipo convencional, con información diaria de temperatura máxima y mínima y precipitación.
- Datos del año 2010 de 2 estaciones automáticas con resolución horaria de dirección e intensidad de viento, temperatura ambiente, precipitación.

Las estaciones automáticas, Ronquillo y UNC<sup>1</sup>, al poseer una resolución horaria, permitieron el análisis del ciclo diario de la temperatura y demás variables.

Todos los datos fueron sometidos en primer lugar a una evaluación de calidad, descartando datos negativos en cuanto a precipitación y velocidad de viento y valores extremos para la temperatura máxima y mínima. Los valores descartados

---

<sup>1</sup> UNC: Universidad Nacional de Cajamarca.

fueron reemplazados con NaN. También se encontraron datos faltantes en algunas estaciones, correspondientes a valores diarios u horarios, los que de igual manera fueron reemplazados con NaN.

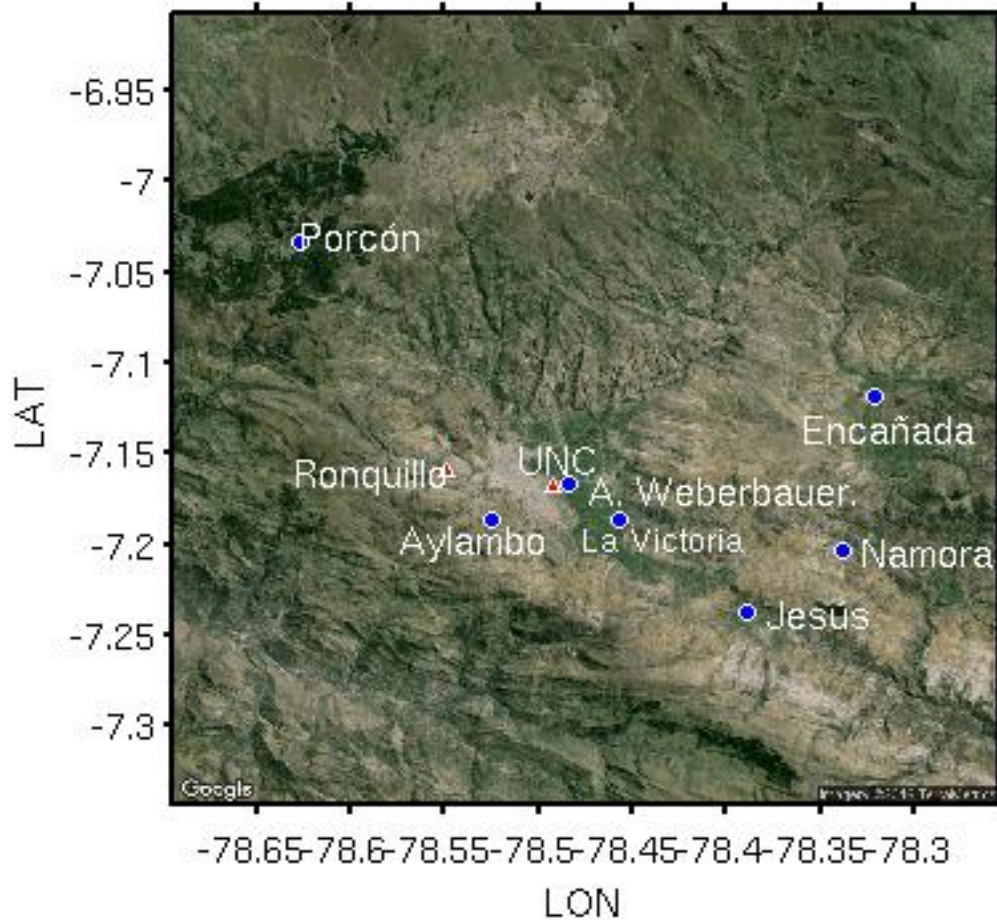


Figura 2.2: Ubicación de la red de estaciones del SENAMHI dentro del Valle de Cajamarca. En azul las estaciones tipo convencional y en rojo las estaciones automáticas.

Tabla 2.1. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

Estaciones	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m.s.n.m.)	Período		Tipo
				Inicio	Fin	
Jesús	-78.3894	-7.2372	2519	1997	2014	convencional
La Victoria	-78.4875	-7.1863	2611	1997	2014	convencional
Augusto Weberbauer*	-78.4994	-7.162	2660	1997	2014	convencional
Namora	-78.3388	-7.2033	2782	1997	2014	convencional
Granja Porcón*	-78.6266	-7.0388	3261	1997	2014	convencional
UNC	-78.4913	-7.1522	2678	2010	2010	automática
Ronquillo	-78.5497	-7.1591	3313	2010	2010	automática
Aylambo	-78.5252	-7.1863	3154	2010	2010	convencional
Encañada	-78.3694	-7.1361	2950	2010	2010	convencional

\*La estación Granja Porcón se denominará en adelante Porcón y la estación Augusto Weberbauer se denominará A. Weberbauer.

### 2.3. Modelo WRF

El Weather Research and Forecasting Model (WRF) es un modelo numérico de predicción del tiempo de mesoescala no hidrostático desarrollado por el National Center for Atmospheric Research (NCAR) en colaboración con otras organizaciones, que ofrece una amplia gama de aplicaciones meteorológicas a través de escalas de decenas de metros a miles de kilómetros (Skamarock et al. 2008)

La modelación numérica en el presente estudio se realizó para el mes de marzo del año 2010, mes en que se presenta mayor precipitación, y el mes de agosto de 2010 donde se registran los mínimos valores de temperaturas. La primera corrida se realizó a partir de las 00 UTC de 01 de marzo hasta el 31 de marzo a las 23 UTC, y para el mes de agosto desde las 00 UTC del 01 hasta las 23 UTC del 31 de agosto. Las simulaciones se realizaron con tres dominios anidados, con

resolución de 27 km, 9 km y 3 km el dominio de mayor resolución el cual contiene al Valle de Cajamarca (Figura 2.3). Además de utilizar 27 niveles en la vertical. Las condiciones de borde se obtuvieron a partir del reanálisis NCEP FNL. Se utilizó las parametrizaciones estándar que se describen en la tabla 2.3.

Se utilizó la cobertura de suelo MODIS, con 20 categorías de uso de suelos. En la figura 2.3 b) se puede observar que las categorías predominantes en el Valle de Cajamarca son: pastizales (10) y sabanas (9) en su tercer dominio. La figura 2.4 se reproduce el relieve obtenido con la topografía del modelo a su resolución de 3 km



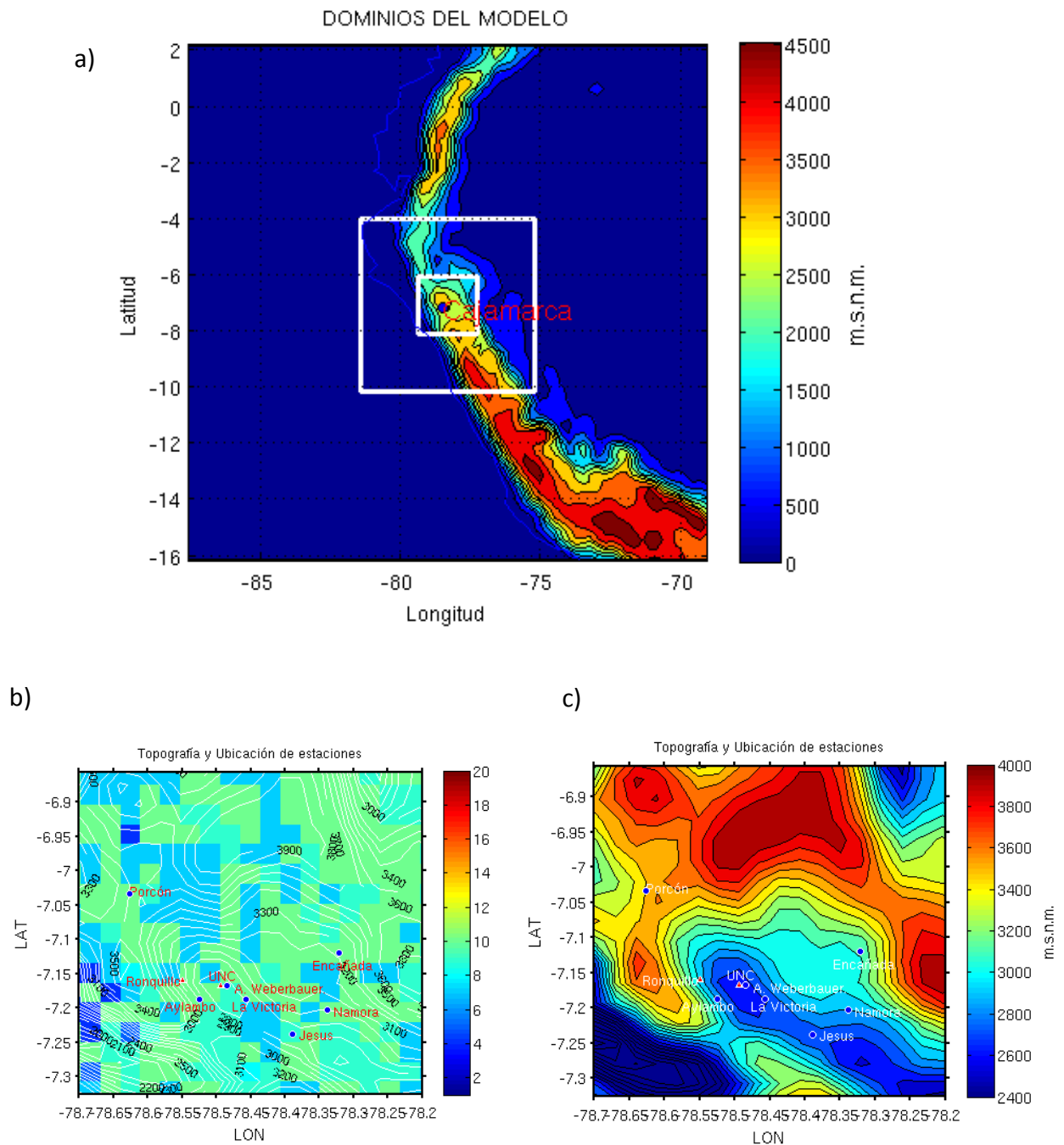


Figura 2.3: a) Ubicación del valle de Cajamarca, en recuadros muestran los dominios del modelo utilizados, b) Uso de suelo en el tercer dominio. c) Mapa topográfico del lugar con la ubicación de las estaciones en el tercer dominio, con topografía modelada.

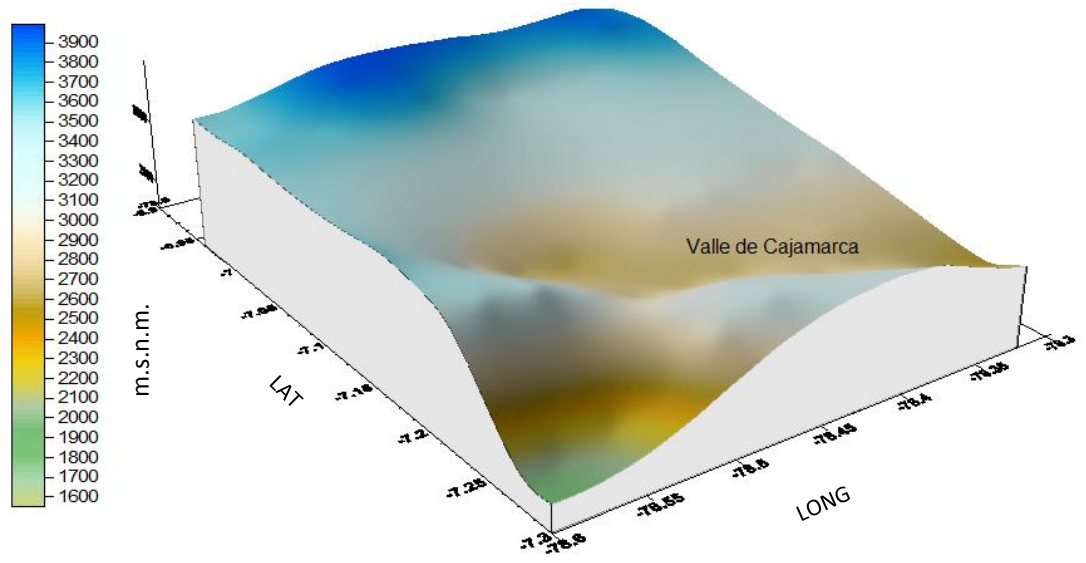


Figura 2.4. Relieve reproducido con la topografía obtenida del modelo WRF en su tercer dominio.

Tabla 2.3. Esquemas de parametrización utilizados para la ejecución del modelo WRF

<b>Física</b>	<b>Valores en el modelo</b>	<b>Parametrización</b>	<b>Referencia</b>
Microfísica			
mp_physics	6,6,6	WSM 6 scheme	Hong et al. (2006)
Radiación de onda larga			
ra_lw_physics	1,1,1	RRTM scheme	Mlawer et al. (1997)
Radiación de onda corta			
ra_sw_physics	1,1,1	Dudhia scheme	Dudhia (1989)
Física de Capa superficial			
sf_sfclay_physics	1,1,1	Monin-Obukhov scheme	Zhang(1982)
Física capa límite planetaria			
bl_pbl_physics	1,1,1	YSU	Hong et al. (2006)
Física del suelo			
sf_surphace_physics	2,2,2	Thermal diffusion scheme	
Opción de cumulus			
cu_physics	1,1,0	Kain- Fritsch	Kain(2004)

### **3. Climatología del lugar**

Este capítulo describe la climatología del Valle de Cajamarca, mediante un análisis que muestra: variación diaria y estacional de temperatura y vientos obtenidos con las estaciones de resolución horaria cuya información corresponde al año 2010. La variabilidad inter-anual y espacial de la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitaciones, se obtuvo con las estaciones tipo convencional con información de los años 1997 al 2014.

#### **3.1. Temperatura**

##### **3.1.1. Ciclo diario**

La figura 3.1 muestra el ciclo diario de temperatura del aire en superficie de las estaciones Ronquillo y UNC. El ciclo diario es el resultado del balance local entre la energía proveniente de la radiación solar incidente y los flujos netos de calor sensible, calor latente y radiación de onda larga en la superficie (Hughes, 2007). Con la salida del sol a partir de las 06 horas aproximadamente, la radiación solar excede a dichos flujos, la superficie comienza a calentarse y a almacenar energía. El calor continúa almacenándose y la temperatura aumenta hasta la tarde, alcanzando su máximo valor al promediar las 14 horas, momento en que los flujos de energía desde la superficie comienzan a ser superiores en magnitud que la radiación solar. Cuando el sol se oculta al promediar las 18 horas los flujos de energía ascendentes enfrían la superficie y la temperatura del aire disminuye continuamente alcanzando un mínimo al amanecer a las 06 horas aproximadamente. Dicho ciclo es similar para ambas estaciones presentando valores máximos y mínimos en el mismo horario. La estación UNC presenta valores de temperatura mayores con respecto a la estación Ronquillo. Esta diferencia podría deberse a las distintas altitudes de cada estación UNC (2678 msnm) y Ronquillo (3313 msnm).

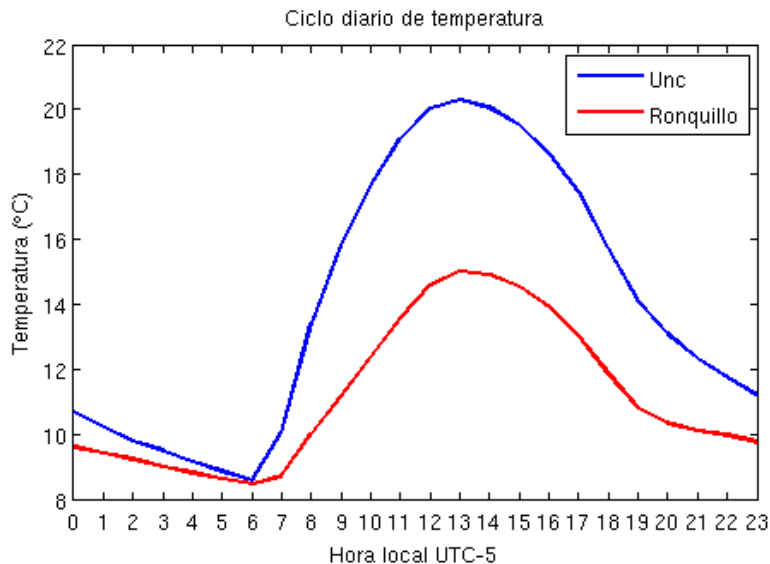


Figura 3.1. Ciclo diario de temperatura de las estaciones UNC (2678 msnm) y Ronquillo (3313 msnm). Información obtenida a partir de los datos horarios del año 2010.

### 3.1.2. Variación estacional

El ciclo anual/diario de la temperatura del aire de las estaciones UNC y Ronquillo, se obtuvo a partir de los datos horarios del año 2010. Las figuras 3.2 y 3.3 muestran la variación de temperatura diaria y mensual. Durante todo el año los valores más altos de temperatura se presentan entre las 12 y 14 horas aproximadamente, valores que se incrementan en los meses de julio y agosto. Los valores promedio de temperatura que registran son de 23.6 °C para UNC y 17.9 °C para Ronquillo. Las temperaturas más bajas ocurren en los meses de julio y agosto entre las 4 y 7 horas. La estación UNC (Figura 3.2) presenta una temperatura mínima promedio de 4.7 °C y para Ronquillo el valor promedio de temperatura mínima es de 6.6 °C (Figura 3.3). Para ambas estaciones, durante agosto se presenta la mayor amplitud térmica: cerca de 22°C en UNC y 13°C en Ronquillo.

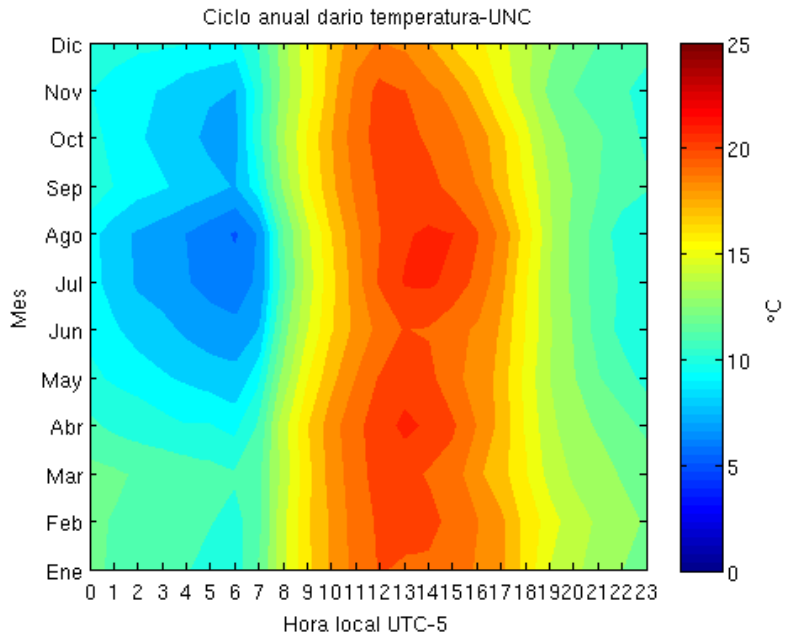


Figura 3.2: Ciclo anual diario de la temperatura, obtenido a partir de datos horarios durante el año 2010 para la estación UNC. Contorno de las isotermas cada 1°C.

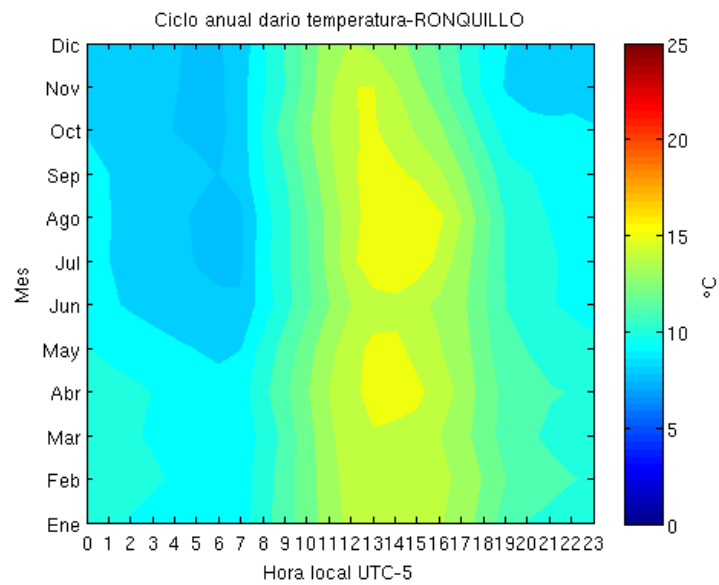


Figura 3.3: Ciclo anual diario de la temperatura, obtenido a partir de datos horarios durante el año 2010 para la estación Ronquillo. Contorno de las isotermas cada 1°C.

El comportamiento diurno y la estacionalidad de ambas estaciones son similares, pero al igual que en el ciclo diario, se observa que la temperatura máxima presenta valores mayores en la estación UNC ubicada en la parte baja del valle diferenciándose hasta en 5 °C con respecto a la estación Ronquillo. Para el caso de las temperaturas mínimas, en la estación Ronquillo nuevamente se observa que esta presenta valores mayores en comparación a la estación UNC, diferencia que aumenta durante los meses de julio y agosto

La estacionalidad de la temperatura en las estaciones automáticas como UNC y Ronquillo puede ser corroborada con otras 7 estaciones de tipo convencional presentadas en la figura 3.4. Esta figura muestra los promedios mensuales de temperaturas mínimas y máximas para 9 estaciones, incluyendo 5 estaciones (Namora, La Victoria, Augusto Weberbauer, Porcón) con datos diarios comprendidos entre 1997 y 2014 y 4 estaciones con disponibilidad de información sólo para el año 2010 (UNC, Ronquillo, Encañada y Aylambo). En todas las estaciones se puede observar la modesta variación anual de las temperaturas máximas, con una oscilación anual menor que 3 °C.

En cambio, las temperaturas mínimas son más variables, como ya se mencionó, presentando sus valores más bajos durante los meses de julio y agosto, incrementándose a partir de noviembre y alcanzando sus valores más altos durante febrero-marzo, con una amplitud térmica anual de más de 5 °C en algunas estaciones.

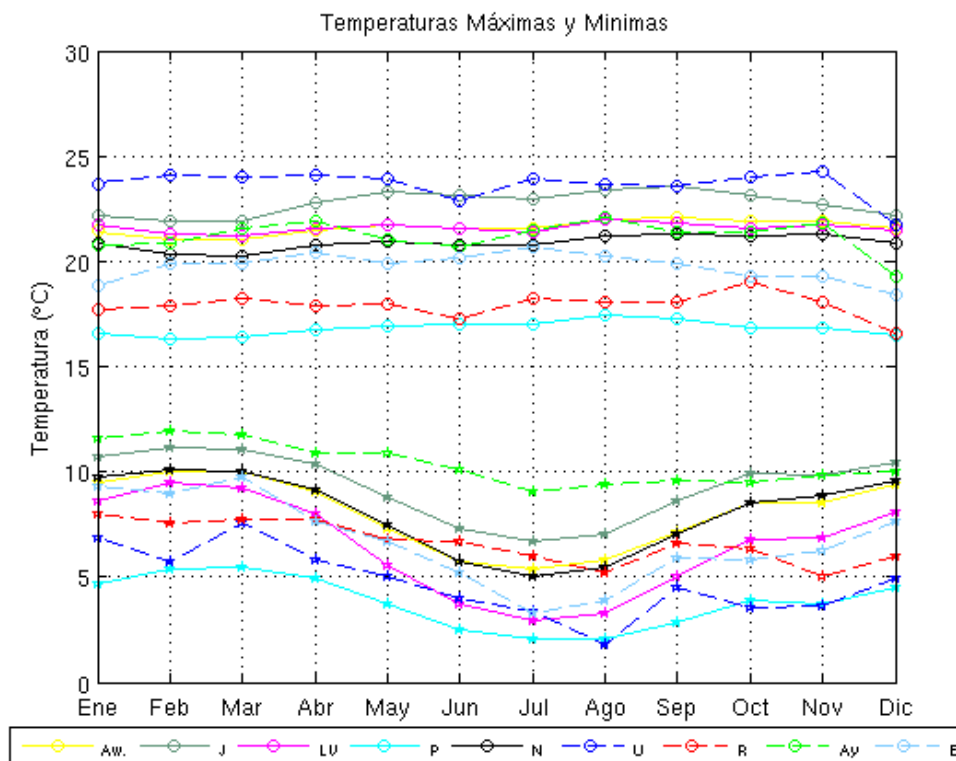


Figura 3.4: Promedios mensuales de temperatura máxima (círculos) y temperatura mínima (puntos). Línea sólida: información correspondiente a los años 1997 - 2014 para las estaciones de Aw: A. Weberbauer, J: Jesús, LV: La Victoria, P: Porcón y N: Namora. Línea entrecortada: estaciones con información del año 2010 U: UNC, R: Ronquillo, Ay: Aylambo y E: Encañada.

### 3.1.3. Variación interdiaria

En la figura 3.5 se presentan los gráficos de caja para la variabilidad interdiaria de temperatura máxima y mínima en las 5 estaciones con mayor cantidad de datos. Con el propósito de cuantificar esta variabilidad, se procedió al cálculo de las anomalías de temperatura extrayendo su ciclo anual. Para todas las estaciones se observa la baja variabilidad de las temperaturas máximas con rangos intercuartílicos de  $\pm 1^\circ\text{C}$  y simétricos. En cambio, en la temperatura mínima se observa mayor distribución durante los meses de julio, agosto y setiembre en las estaciones A. Weberbauer, Porcón, La Victoria y Jesús. Durante noviembre las



estaciones Porcón y A. Weberbauer presentan mayor asimetría en su distribución. Por lo general, se observa baja variabilidad de las temperaturas, suponiendo que existe poca influencia de las condiciones sinópticas en la zona de estudio.

A la vez, se realizó una comparación de la variación interdiaria de las temperaturas mínimas de las 5 estaciones, realizando una correlación de anomalías de temperaturas mínimas (Cuadro 3.2). En todas las estaciones se puede observar una alta y similar correlación sobre todo entre las estaciones A. Weberbauer y La Victoria ( $r=0.93$ ). Esta alta correlación podría deberse a su proximidad geográfica, al encontrarse ambas en la parte de menor altitud del valle. En cambio, Porcón al encontrarse más distante y a mayor altitud con respecto a las otras estaciones, es la que menor correlación presenta (0.79 y 0.82) con relación a A. Weberbauer y La Victoria. En la estación Porcón es el lugar donde se presentan las temperaturas más bajas y con mayor frecuencia la ocurrencia de heladas, como se podrá ver más adelante.

Cuadro 3.2. Matriz de correlaciones lineales para las series de anomalías de temperatura mínima.

	Jesús	La Victoria	A. Weberbauer	Namora	Porcón
Jesús	1,0				
La Victoria	0,91	1,0			
A. Weberbauer	0,93	0,93	1,0		
Namora	0,91	0,88	0,89	1,0	
Porcón	0,78	0,79	0,82	0,74	1,0

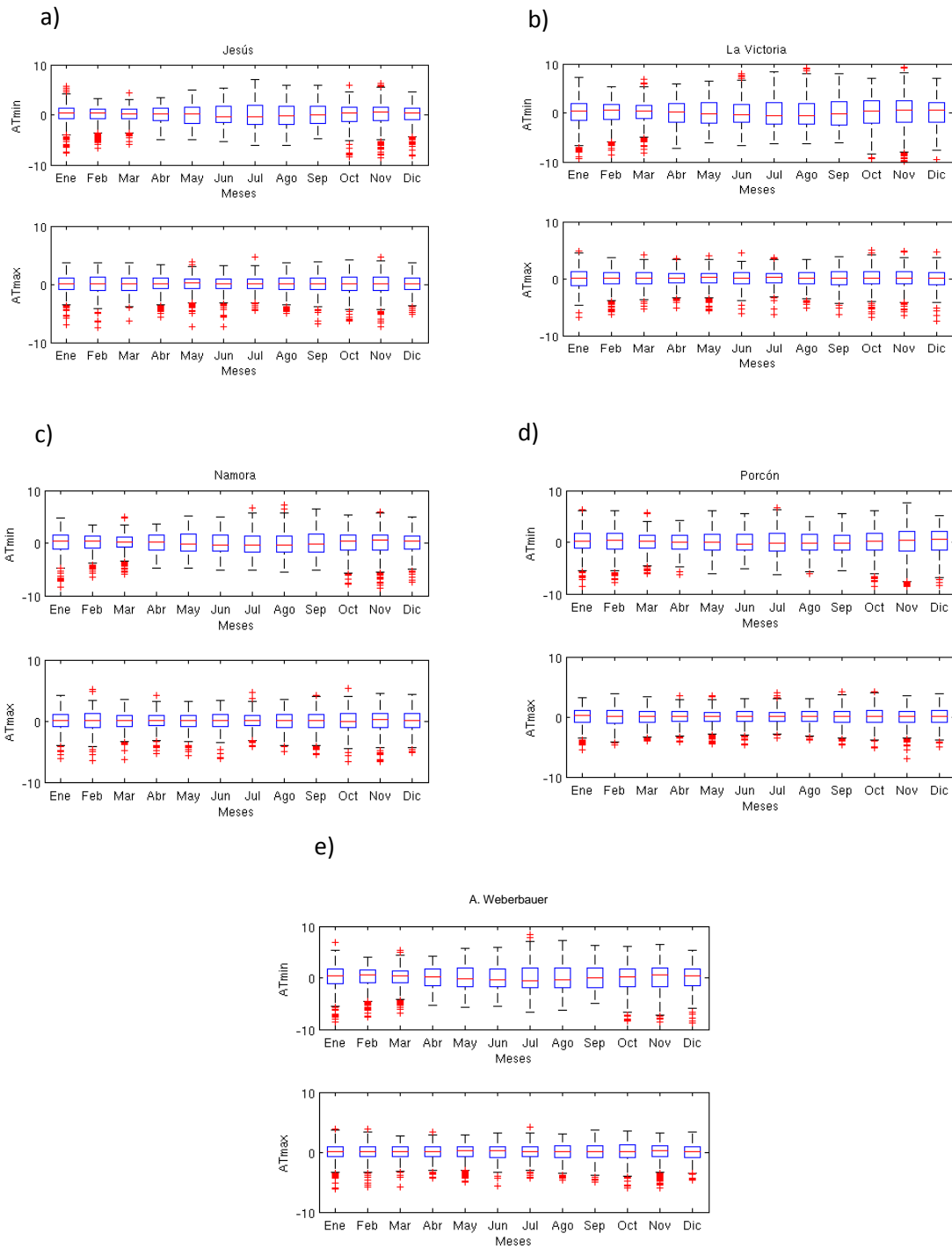


Figura 3.5: Anomalías de temperatura mínima diaria (ATmin) y Anomalías de temperatura máxima diaria (ATmax) en °C. Para cinco estaciones: a) Jesús, b) La Victoria, c) Namora, d) Porcón, e) A. Weberbauer para el periodo comprendido entre 1997 - 2014.

### 3.1.4. Variación interanual y relación con El Niño

Los promedios anuales de temperatura en cada una de las estaciones fueron calculados para el periodo de 1997-2014, observándose poca variabilidad con respecto a la temperatura máxima y mínima en las diferentes estaciones (Figura 3.6). Sin embargo, con el propósito de establecer la relación entre las temperaturas máximas y mínimas con eventos El Niño y/o La Niña, se procedió al cálculo de anomalías de temperatura máxima y mínima con respecto a la climatología mensual. Estas anomalías fueron correlacionadas con El Índice Niño costero.

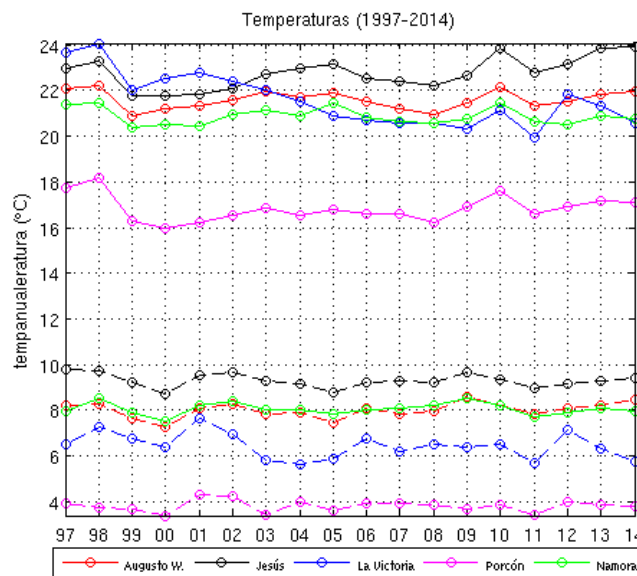


Figura 3.6: Promedios anuales de temperaturas máximas (línea sólida) y mínimas (línea entrecortada). Información disponible de los años 1997-2014 para las estaciones de: Augusto Weberbauer, Jesús, La Victoria, Porcón y Namora.

El Índice Niño Costero (ICEN) se obtiene con la anomalía de temperatura del mar en la región Niño 1+2 (90°W-80°W, 10°S-0°), calculado por el Instituto Geofísico del Perú (Takahashi et al., 2014). Se adoptan los siguientes criterios para la identificación de los eventos en la región costera del Perú, en cuyo periodo el ICEN indique: condiciones cálidas/frías durante al menos 3 meses consecutivos el evento

será considerado Niño/Niña. Los detalles del cálculo están descritos por el comité de Estudio Nacional del Fenómeno del Niño-ENFEN (2012).

Los datos de temperatura máxima y mínima y el ICEN, corresponden al periodo de 1997-2014. En este periodo se ha presentado diversos eventos El Niño (cuadro 3.4) y La Niña (cuadro 3.5), clasificándolo de acuerdo a la intensidad de los eventos presentados. Se realizó el análisis primero considerando todos los años y luego considerando los años identificados como EL Niño extraordinario y La Niña Fuerte de acuerdo a las definiciones de ENFEN (2012). Los resultados se muestran en el cuadro 3.3 donde se observa que existe una relación más significativa entre las temperaturas mínimas y la ocurrencia del Niño extraordinario produciéndose un aumento en ellas. Una relación inversa se observa con la ocurrencia de eventos La Niña, cuya ligera correlación negativa indicarían una disminución de las temperaturas mínimas y una correlación positiva significativa asociada a una disminución de las temperaturas máximas.

Cuadro 3.3: Correlaciones entre El ICEN y las anomalías de temperatura máxima y mínima en las diferentes estaciones.

Estaciones	1997-2014		El Niño		La Niña	
	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax
A. Weberbauer	0.34	0.30	0.74	-0.03	-0.26	0.61
Porcón	0.23	0.42	0.70	-0.07	-0.51	0.56
Jesús	0.39	0.19	0.75	0.13	-0.23	0.58
Namora	0.25	0.06	0.52	-0.51	-0.16	0.80
La Victoria	0.26	0.40	0.65	0.03	-0.18	0.83

Para poder identificar esta relación entre el ICEN y los valores de temperatura se construyeron también gráficos de dispersión. En la figura 3.7, se puede observar que para algunos ICEN positivos hay un aumento de las temperaturas máximas, como lo indica los valores dentro del círculo rojo. Con relación a las temperaturas mínimas y los ICEN negativos, se observa el desplazamiento hacia la izquierda de

algunos valores de la temperatura mínima, lo que indica la disminución de temperaturas mínimas.

Cuadro 3.4. Eventos Niño en la costa Peruana

Año inicial	Mes inicial	Año final	Mes final	Duración (meses)	Magnitud
1997	3	1998	9	19	Extraordinario
2002	3	2002	5	3	Débil
2002	9	2003	1	5	Débil
2003	11	2004	1	3	Débil
2004	10	2004	12	3	Débil
2006	8	2007	2	7	Moderado
2008	7	2008	9	3	Débil
2009	5	2009	10	6	Débil

Fuente: ENFEN, 2012

Cuadro 3.5. Eventos Niña en la costa Peruana

Año inicial	Mes inicial	Año final	Mes final	Duración (meses)	Magnitud
2001	9	2001	12	4	Débil
2007	5	2007	12	8	Fuerte
2010	8	2010	11	4	Moderado

Fuente: ENFEN, 2012

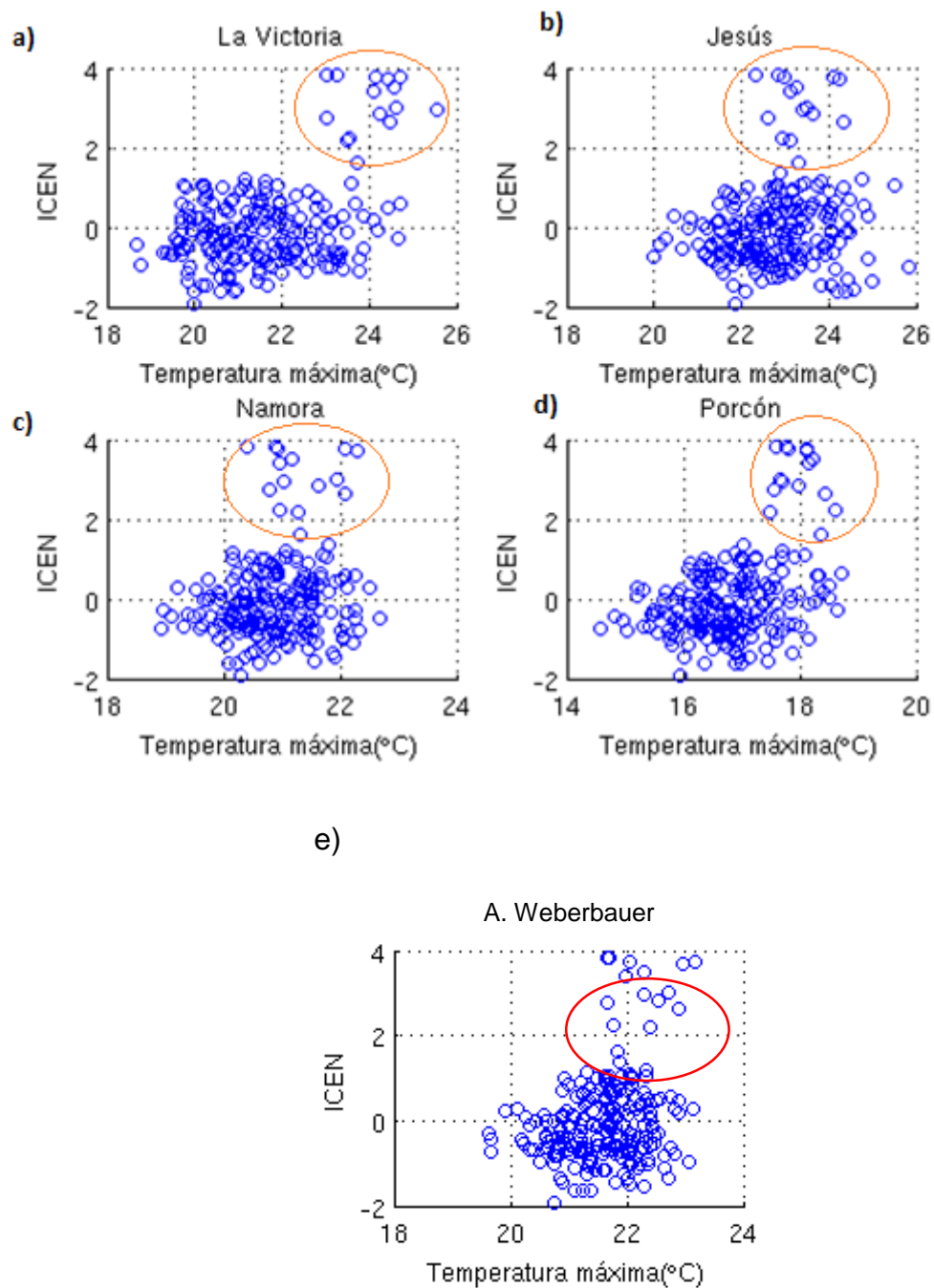


Figura 3.7: Gráficos de dispersión de ICEN y temperaturas máximas por estación, para los años comprendidos entre 1997 y 2014. a) La Victoria, b) Jesús, c) Namora, d) Porcón, e) A. Weberbauer.

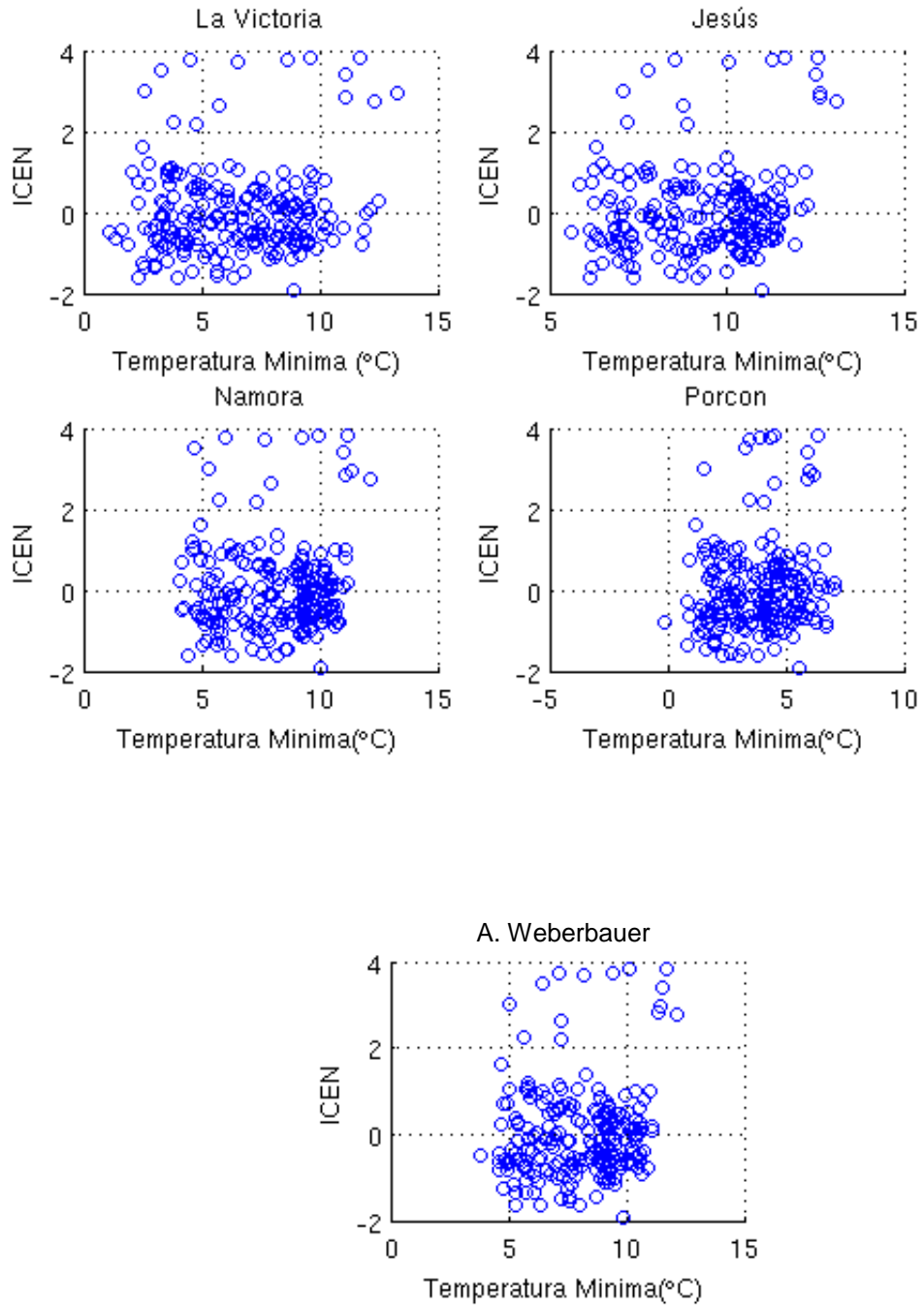


Figura 3.8: Gráficos de dispersión de ICEN y temperaturas mínimas por estación, para los años comprendidos entre 1997 y 2014. a) La Victoria, b) Jesús, c) Namora, d) Porcón, e) A. Weberbauer.

### 3.1.5. Variación con la altura

La topografía perturba prácticamente todos los procesos y variables relevantes para las interacciones tierra-atmósfera, incluyendo la radiación, temperatura del aire, el viento, la nubosidad y precipitaciones, las propiedades del suelo y la vegetación (Raupach y Finnigan, 1998). En los valles de montaña o en las altas mesetas, en el rango de latitudes bajas y medias, la temperatura es considerablemente mayor que en las cumbres montañosas debido a la menor mezcla del aire con la atmósfera libre (Barry, 2008). La temperatura en un sitio dado, dentro de un macizo de la montaña, no sólo depende de la altitud del sitio, sino también de su exposición a la radiación solar entrante. Las diferencias de temperatura dentro de un macizo montañoso son importantes, ya que impulsan los vientos locales (Whiteman, 2000).

La figura 3.9 muestra los promedios de temperatura mínima y máxima de las 9 estaciones. En relación a la temperatura máxima se observa en general una disminución con respecto a la altura, con un tasa de  $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}/1000\text{m}$  el cual es menor al gradiente promedio de la troposfera libre. La temperatura máxima presenta una buena correlación con la altura de  $r=-0.72$ . En cambio la temperatura mínima no alcanza una buena correlación ( $-0.2$ ), esto debido a que estaciones como Ronquillo que se encuentra a 3313 msnm y Aylambo (3154 msnm) presentan valores mayores de temperatura mínima en comparación a las estaciones ubicadas en el fondo del valle como UNC (2678msnm) y La Victoria (2618msnm).



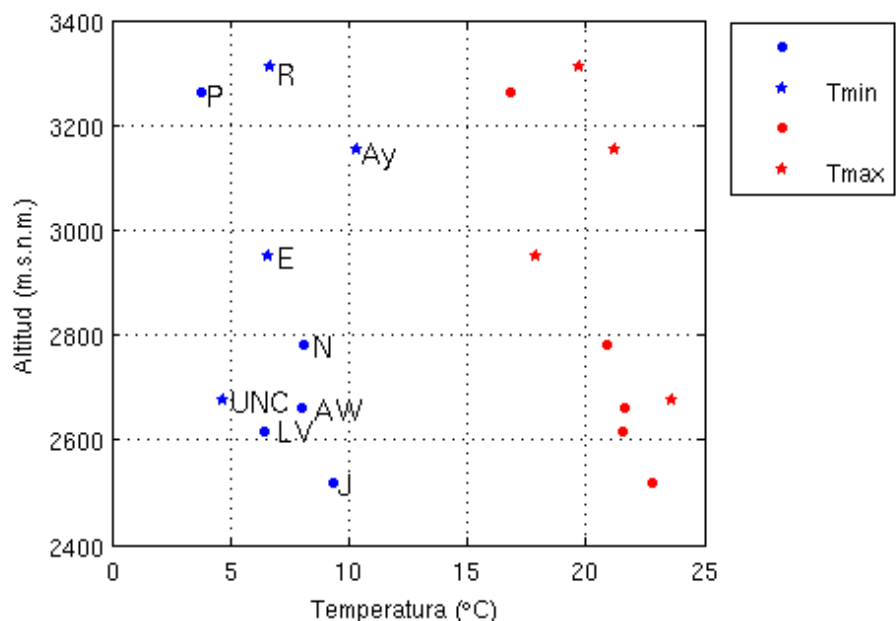


Figura 3.9: Promedios de temperatura máxima (rojo) y temperatura mínima (azul) en función a la altura de cada estación. Círculos: información correspondiente a los años 1997 - 2014 para las estaciones de Aw: A. Weberbauer, J: Jesús, LV: La Victoria, P: Porcón y N: Namora. Asteriscos: estaciones con información del año 2010 para las estaciones UNC: UNC, R: Ronquillo, Ay: Aylambo y E: Encañada.

### 3.2. Caracterización de heladas

La Organización Mundial de Meteorología (OMM) define la helada meteorológica como la cubierta de hielo producida por la sublimación del vapor de agua sobre objetos con temperaturas inferiores a 0 °C (OMM, 2012). Desde el punto de vista agronómico, se define a la helada agronómica como un descenso de temperatura ambiente a niveles que puede ocasionar daños totales o parciales en los cultivos sensibles sin llegar necesariamente a 0°C (Burgos, 1963). Las temperaturas por debajo de 0 °C son más frecuentes en localidades altas de las provincias de Cajamarca (Sánchez y Vásquez, 2010).

SENAMHI (2010) considera como umbral para las heladas agronómicas 6 °C, ya que indica que la temperatura base del cultivo de papa comercial es 6°C y 4 °C para la papa nativa y 7 °C para el maíz amiláceo. Teniendo en cuenta que los principales cultivos sembrados en la región son papa y maíz, se consideró en el presente trabajo un umbral de 6 °C, determinando la ocurrencia de temperaturas mínimas por debajo de este.

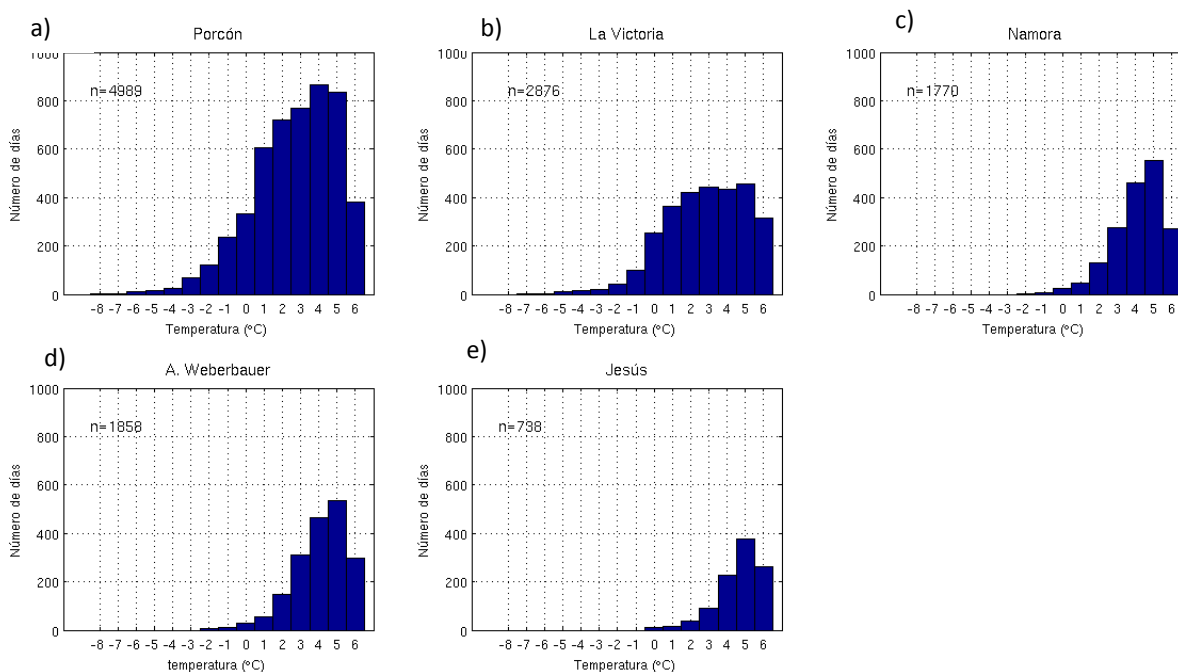


Figura 3.10: Frecuencia de ocurrencia de temperaturas mínimas, en el periodo 1997-2014, con un umbral de 6 °C, para las estaciones a) Porcón b) La Victoria c) Namora d) Augusto Weberbauer e) Jesús. Donde n: indica el número de días con temperaturas menores al umbral de 6°C.

Teniendo como referencia este umbral, la figura 3.10 muestra la frecuencia de ocurrencia de heladas agronómicas, donde la estación Porcón hace un total de

4889 días (271 días/año) con ocurrencia de éstas, tal como era de esperar por ser una de las estaciones que se ubican a mayor altitud. Similar comportamiento se muestra en la figura 3.11, donde la estación Encañada dentro del grupo de estaciones con un año de datos, es la que mayor ocurrencia de temperaturas mínimas presenta. Esta información también ha permitido determinar la variación anual de las temperaturas mínimas e identificar los meses de ocurrencias de heladas meteorológicas (Figura 3.12). Las heladas se presentan en dos períodos de frecuencia máxima: invierno y primavera. Según Sánchez y Vásquez (2010), durante los meses de junio a octubre y excepcionalmente en noviembre, en el valle de Cajamarca las noches son muy claras y durante el día el sol brilla desde la mañana hasta el atardecer. En estos meses es donde se presenta la mayor frecuencia de heladas meteorológicas (Figura 3.12). La estación Porcón, ubicada en la parte alta del valle y la estación La Victoria ubicada en el fondo del valle, son las que presentan la mayor ocurrencia de heladas meteorológicas invernales y primaverales. Por la noche, cuando el cielo está despejado, las inversiones de temperatura se forman en los valles, haciendo que la relación entre la temperatura de la superficie, la humedad, y la altitud se reviertan, el aire frío y denso fluye pendiente abajo y se acumula en el fondo del valle, dejando a la temperatura más alta y la más baja humedad sobre las paredes laterales y partes superiores del valle (Whiteman, 2000).

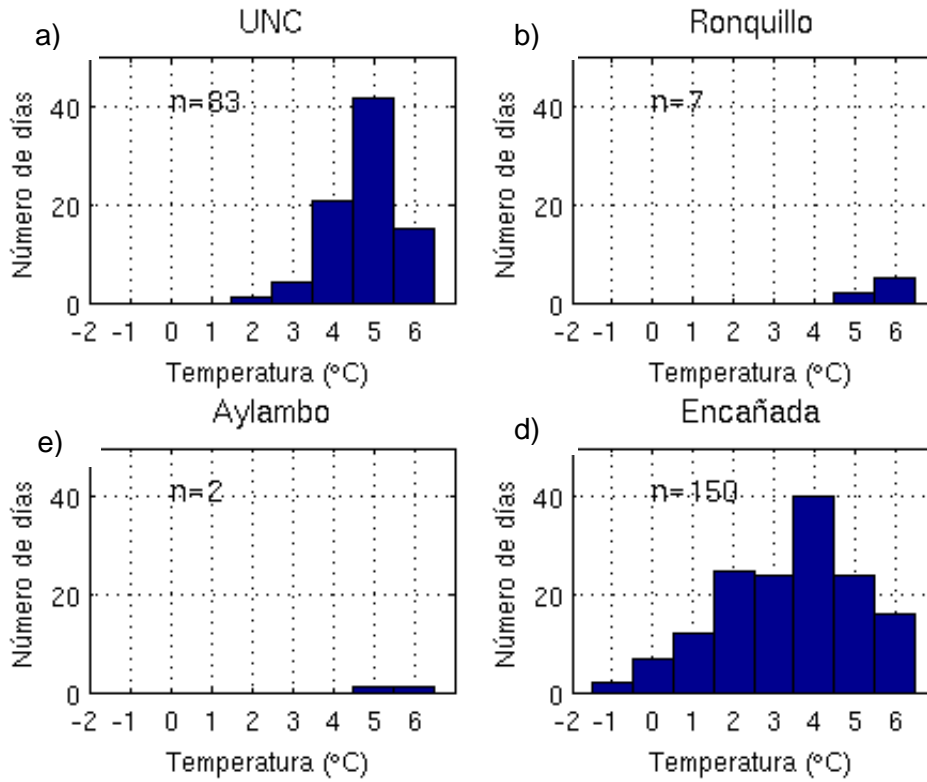


Figura 3.11: Frecuencia de ocurrencia de temperaturas mínimas bajo el umbral de 6°C, para el año 2010, para las estaciones: a) UNC, b) Ronquillo, c) Aylambo d) Encañada. . Donde “n” indica el número de días con temperaturas menores al umbral de 6°C.

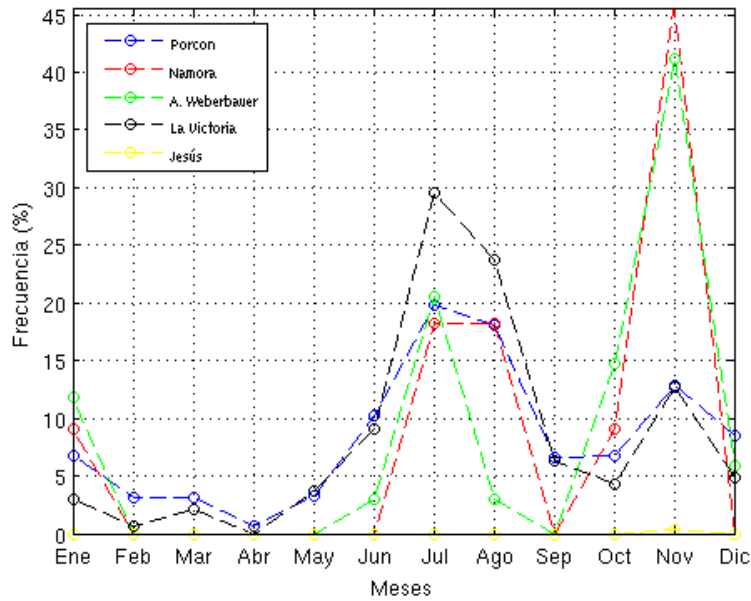


Figura 3.12: Frecuencia de ocurrencia de heladas meteorológicas durante los años 1997-2014, para las estaciones de Porcón, Namora, Augusto Weberbauer y La Victoria.

### 3.3 Precipitación

El ciclo anual de precipitación en los Andes peruanos está asociado con el desplazamiento estacional de los anticiclones del Pacífico Sur y del Atlántico Sur, el desplazamiento norte-sur estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), el transporte de humedad desde el Amazonas, y con la formación de un centro anticiclónico de alta presión en niveles altos de la atmósfera, conocida como la alta boliviana (Lagos et. al 2008).

Los datos de precipitación disponibles para los años 1997 al 2014 en 5 estaciones del Valle de Cajamarca, permitieron determinar la serie multianual de precipitación, presentando ésta una ligera variabilidad interanual (Figura 3.13). Esta variabilidad interanual puede estar asociada con eventos extremos, de déficit o exceso de precipitaciones, así como con eventos como el Niño. Según Lagos et al. (2008), las variaciones de precipitación en el extremo norte de la sierra peruana

(donde se encuentra ubicado Cajamarca), están relacionadas con las variaciones de la TSM ya que los coeficientes de correlación entre los índices de precipitación en la región andina y los índices de anomalías de TSM para El Niño Región 1 + 2 son moderadamente positivos, lo que indica que la precipitación tiende a ser mayor que su promedio durante El Niño entre noviembre y marzo. Además, menciona que para Cajamarca alcanza su mejor correlación durante el mes diciembre ( $r=0.42$ ).

La variación estacional presenta un régimen que inicia en los principios de la primavera (setiembre) y finaliza en otoño (abril). Las precipitaciones se incrementan desde el mes de setiembre alcanzando sus máximos valores entre enero y marzo, siendo el mes de marzo, no sólo el mes de mayor precipitación acumulada (Figura 3.14), sino también el mes de mayor frecuencia de días de precipitación (Figura 3.15). Las precipitaciones empiezan a disminuir a partir de abril hasta el mes de agosto, época denominada como estiaje.

En el periodo multianual (1997-2014) se puede determinar que la precipitación promedio se incrementa con la altitud (Figura 3.16). La altura del terreno es un factor clave que afecta a las cantidades de precipitación anual. Su distribución es afectada no sólo por la altura del terreno, sino también por su relieve y otros aspectos como la dirección de la pendiente (Whiteman, 2000). La estación Porcón (3261 msnm) registra la mayor precipitación anual del orden de 1500 mm, caso contrario con las estaciones de menor altitud como La Victoria o Jesús (Figura 3.16) que registran valores del orden de 500 y 600 mm de precipitación anual.

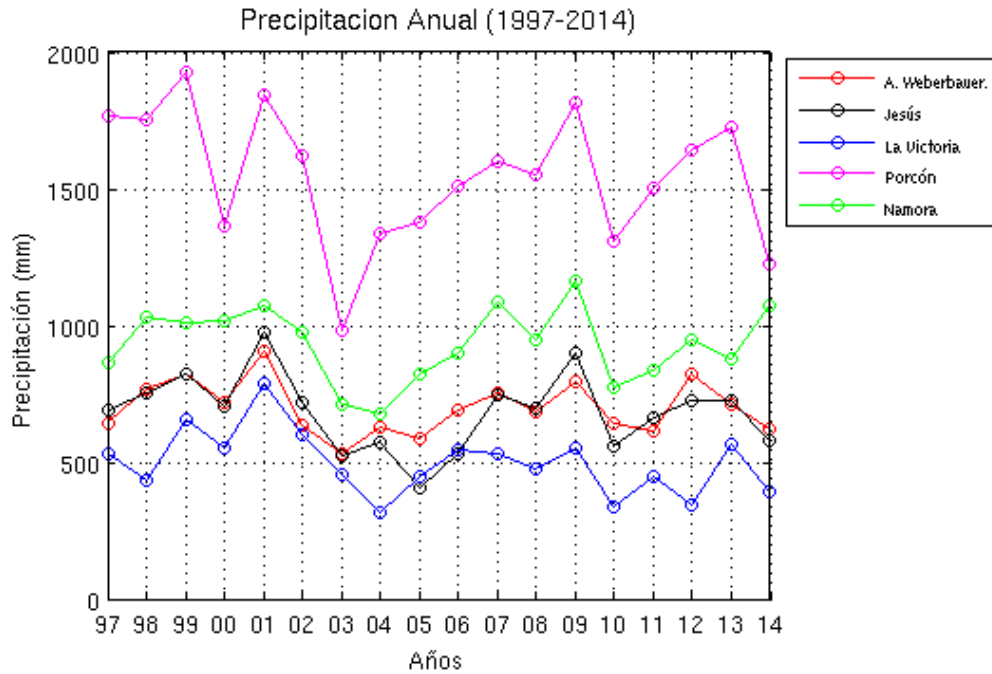


Figura 3.13: Serie de precipitación anual para 5 estaciones durante los años 1997-2014.

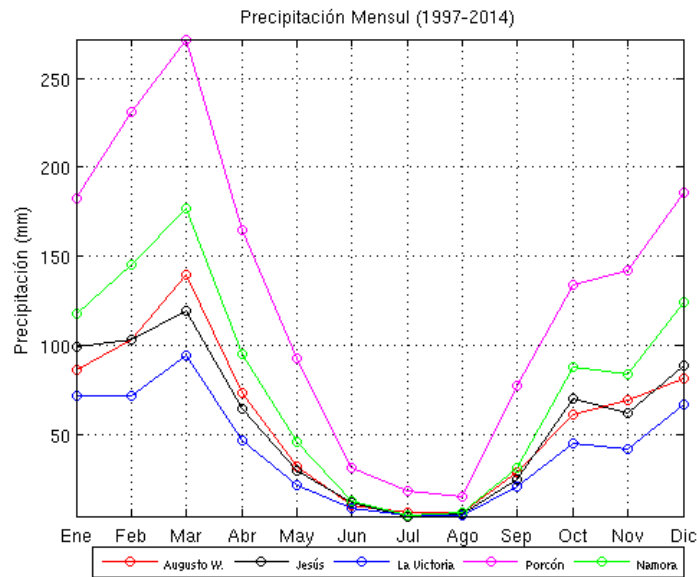


Figura 3.14: Ciclo anual de precipitaciones promedios obtenidos con la información disponible desde el año 1997 hasta 2014.

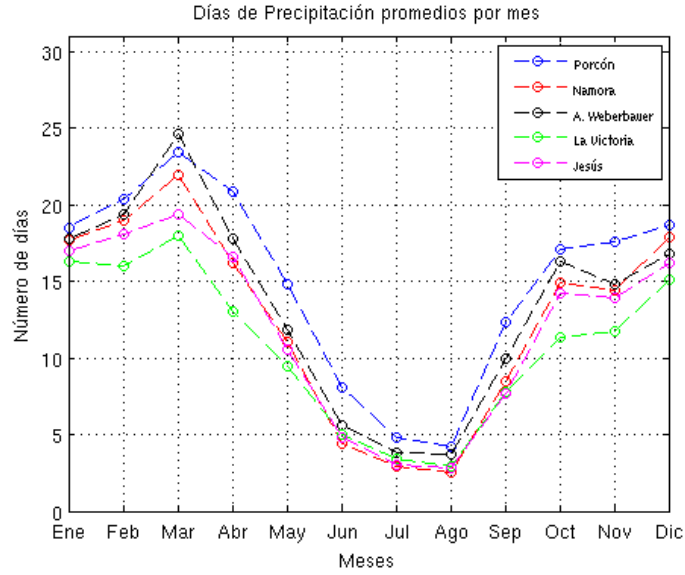


Figura 3.15: Frecuencia de días de precipitaciones por mes y estaciones durante los años 1997 al 2014.

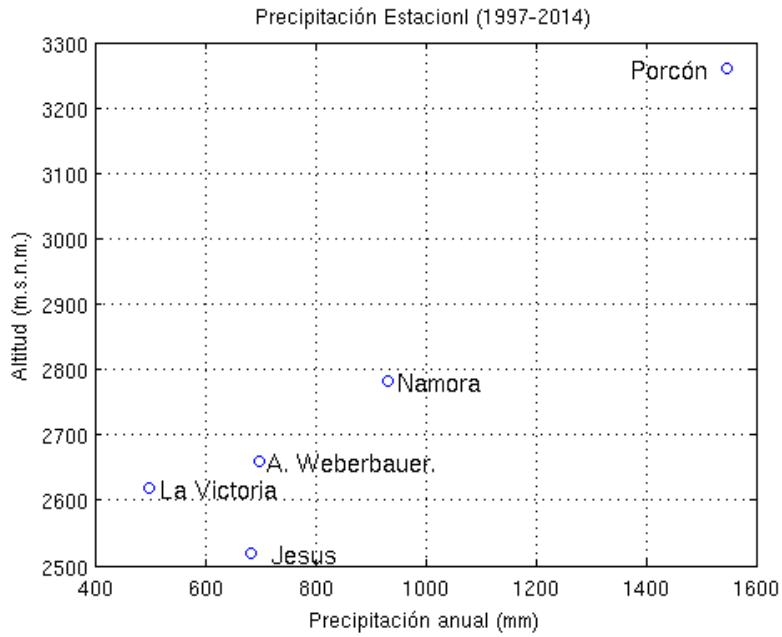


Figura 3.16: Variación altitudinal de la precipitación anual promedio. Información disponible desde 1997 hasta 2014.



### 3.4. Vientos

Los vientos diarios de montaña son impulsados por las diferencias de temperatura horizontal. La evolución regular de los vientos en un valle está estrechamente ligada a la estructura térmica de la capa límite atmosférica dentro del valle, que se caracteriza por un ciclo diurno de acumulación y destrucción de una inversión de temperatura (Whiteman, 2000).

Las circulaciones locales son impulsadas térmicamente (Whiteman, 1990). Estas incluyen el movimiento pendiente abajo de aire frío por la noche conocido como flujo catabático y el movimiento pendiente arriba durante el día conocido como flujo anabático y vientos de valle que soplan hacia arriba o hacia abajo del eje longitudinal de un valle (Raupach y Finnigan, 1997). Los vientos catabáticos en el sentido estricto son los flujos gravitacionales pendiente abajo causados por enfriamiento radiactivo nocturno cerca de la superficie en condiciones de cielo despejado y tranquilo. El flujo de pendiente arriba se asocia con el calentamiento de la pendiente durante el día. El efecto de la radiación nocturna en el drenaje de aire pendiente abajo, da como resultado la formación de un estanque de aire frío en el fondo de los valles (Barry, 2008), con temperaturas altas en la ladera.

Dada la escasa información correspondiente a vientos en la región de estudio, se utilizará para este estudio la información de la estación UNC correspondiente al año 2010. Los vientos superficiales en la estación UNC, ubicada en la parte baja del valle, presentan un marcado sistema de brisa valle-montaña (Figura 3.17). Durante el día se presentan vientos valle arriba (Sureste) y en la noche vientos valle abajo (Noroeste). Durante la noche el viento nocturno se debilita hasta las primeras horas del día presentando una mayor frecuencia de vientos del Noroeste de baja intensidad (0.2 a 0.6 m/s). Al promediar las 08 horas local hay un cambio en la dirección y magnitud de viento para alcanzar valores máximos entre las 14 a 16 horas (Figura 3.18). Desde febrero a junio hay una disminución de la velocidad de viento. A partir de julio la velocidad se incrementa hasta llegar a

octubre y noviembre alcanzando la mayor intensidad de viento promedio aproximadamente 1.6 m/s.

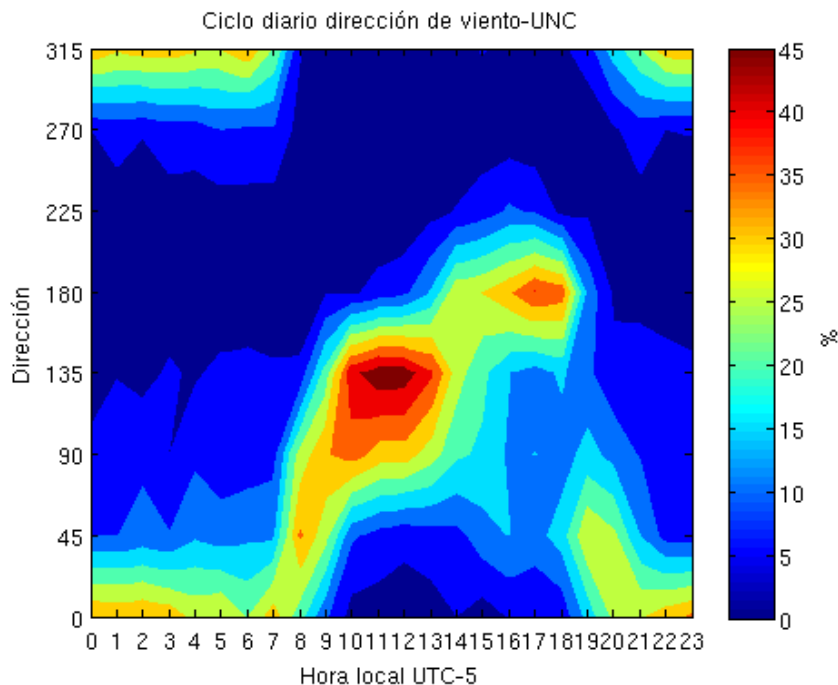


Figura 3.17: Ciclo diario de la frecuencia de dirección de viento en la estación UNC, obtenidos a partir de datos del año 2010.

La figura 3.19, muestra el ciclo anual de frecuencia de dirección de viento. Se puede observar que durante marzo y setiembre hay un aumento de frecuencia de los vientos diurnos (Sureste). Los vientos nocturnos (Noroeste) se intensifican en los meses de junio a agosto.

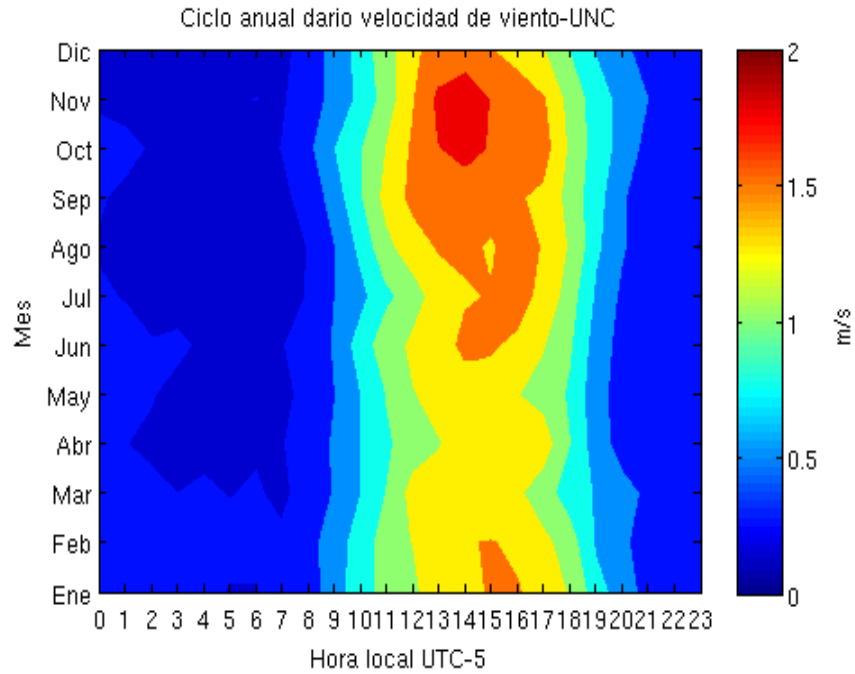


Figura 3.18: Ciclo anual diario de la velocidad de viento en la estación UNC obtenido a partir de datos del año 2010.

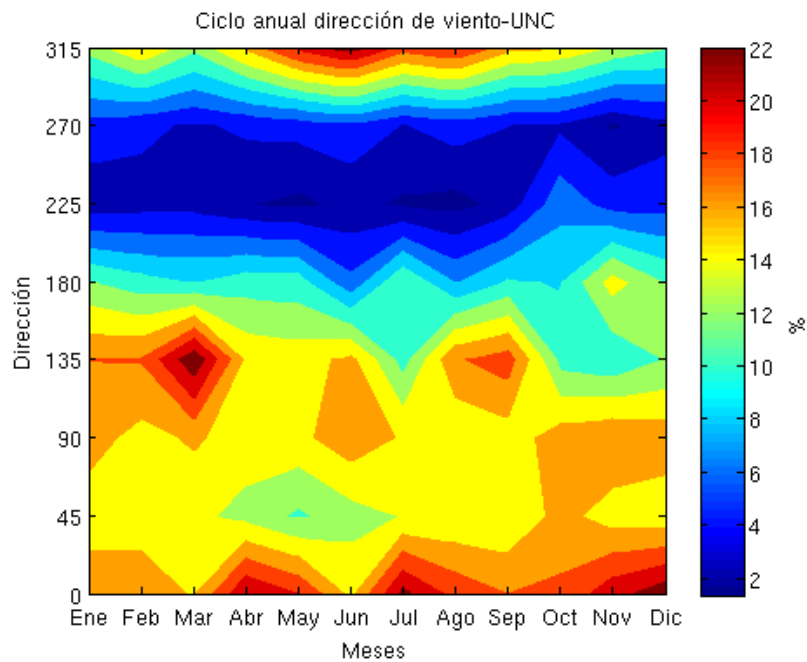


Figura 3.19: Ciclo anual de la dirección de viento en la estación UNC obtenido a partir de datos del año 2010.

#### 4. Validación del modelo

El pronóstico numérico preciso del tiempo y el clima siempre ha sido un objetivo importante para los meteorólogos y los pronosticadores del tiempo. En la actualidad, los científicos están utilizando con éxito modelos de predicción numérica del tiempo (NWP) para lograr un pronóstico fiable. Para obtener una simulación precisa de las variables meteorológicas, es necesario representar correctamente los diversos procesos meteorológicos en el modelo (Mohan y Prabhat, et al., 2015).

La evaluación de desempeño de los modelos se puede hacer usando parámetros estadísticos. Hay una amplia variedad de herramientas estadísticas cuantitativas disponibles para el modelador que permiten la comparación de rendimiento del modelo y proporcionan conocimientos para establecer la credibilidad y limitaciones de un modelo (Bennett et al., 2013).

Según Ahuja et al. (2005), la evaluación de un modelo se realiza para minimizar la posibilidad de tomar una decisión "errónea" sobre un resultado potencialmente adverso, siendo necesario caracterizar, cuantificar y propagar la incertidumbre. Ésta se puede determinar por análisis estadístico, en el que se examinan las predicciones del modelo para ver lo bien que coinciden con las observaciones. Todavía no existen procedimientos normalizados de evaluación, así como normas generales de rendimiento (Borrego et al. 2008).

En el presente capítulo se presenta y analiza los resultados de la modelación con WRF, para el mes de marzo de 2010 (mes de mayor precipitación) y el mes de agosto de 2010, mes donde se evidencia la mayor ocurrencia de temperaturas mínimas. Los resultados de la modelación serán validados con 9 estaciones en superficie, pertenecientes al SENAMHI.

La validación ha sido llevada a cabo mediante la comparación cualitativa y cuantitativa de las salidas numéricas con respecto a los valores observados en cada una de las estaciones. Adicionalmente a la comparación subjetiva, para cuantificar el desempeño del modelo se calculó estadísticos como el sesgo, el cual mide la correspondencia entre el promedio modelado y el valor promedio observado (Wilks, 2006), el error cuadrático medio, RMSE, y el coeficiente de correlación. La Tabla 4.1 presenta los principales parámetros estadísticos utilizados como indicadores de calidad en la modelación. El análisis de la validación es espacial y temporal.

Tabla 4.1. Indicadores estadísticos de calidad para la evaluación del desempeño de los modelos. Emery et al. (2001); Borrego et al. (2008)

Indicador	Fórmula	Rango
Sesgo	$x_{mod}(t) - x_{obs}(t)$	$(-\infty, \infty)$
Error cuadrático medio (RMSE)	$( x_{mod}(t) - x_{obs}(t) ^2)^{0.5}$	$(0, \infty)$
Coeficiente de correlación	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_{obsi} - \bar{x}_{obs})(x_{modi} - \bar{x}_r)}{\sqrt{\sigma_{obs} \sigma_{mod}}}$	$(-1, 1)$

## 4.1. Temperatura

En relación a la temperatura, la figura 4.1 muestra la comparación de las series horarias observadas y las obtenidas por el modelo WRF, para las estaciones UNC y Ronquillo. Se observa en general un buen comportamiento y similitud en la reproducción de la serie. En la estación UNC se presenta una sobreestimación de los valores de temperatura mínima, media y máxima mientras que en la estación Ronquillo se observa una subestimación de la temperatura mínima (Cuadro 4.1).

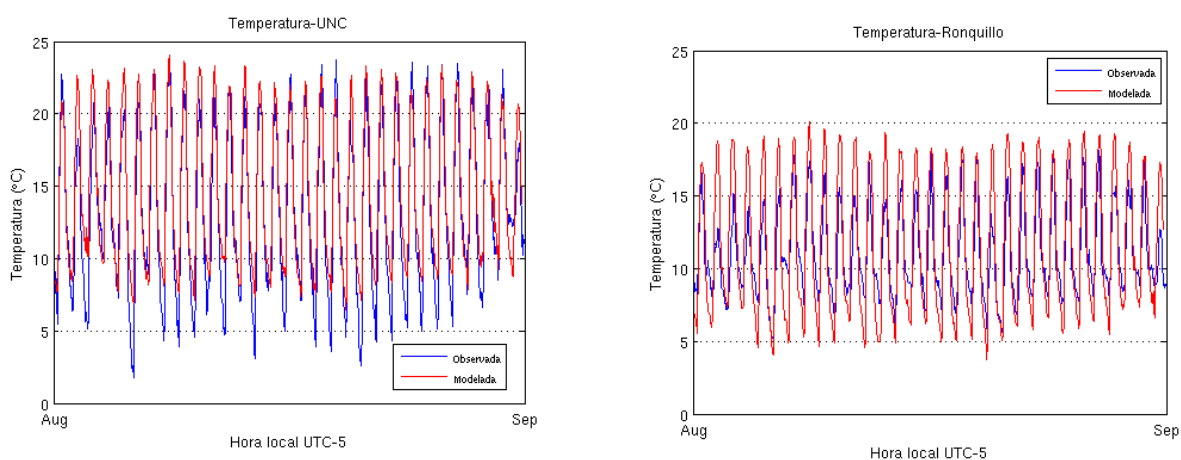


Figura 4.1: Series horarias de temperatura observada (azul) y modelada (roja) para las estaciones UNC y Ronquillo durante agosto de 2010.

Cuadro 4.1 Valores promedios de temperatura modelada y observada para las estaciones UNC y Ronquillo.

Temperatura	UNC		Ronquillo	
	Observada	Modelada	Observada	Modelada
Máxima (°C)	21.8	22.5	16.2	18.7
Media (°C)	13.3	14.6	11.2	11.6
Mínima (°C)	5.6	8.2	7.5	5.6

Los datos de estas estaciones, al poseer resolución horaria, permitieron el análisis del ciclo diario de la temperatura observada con relación al ciclo diario de la temperatura modelada con WRF (Figura 4.2). El modelo logra reproducir la variación del ciclo diario de temperatura en ambas estaciones. La temperatura máxima modelada ocurre al promediar las 14 horas con una diferencia de 1°C con respecto a UNC, después de lo cual la temperatura empieza a disminuir a una tasa similar hasta las 20 horas. A partir de este momento la tasa de enfriamiento que presenta el modelo es menor a la observada. Alcanzado su menor valor a la 6 horas tal como sucede en las observaciones. En cambio en Ronquillo, la temperatura máxima modelada difiere con la observada en 2°C, esta sobrestimación se da hasta las 20 horas. A partir de esta hora la tasa de enfriamiento es mayor a la observada subestimando la temperatura hasta las 7 horas y alcanzando su mínimo valor a misma hora que lo observado. Ambas curvas muestran un aumento en un momento similar del día, con una tasa de calentamiento superior a las observaciones, lo cual genera una diferencia mayor en las temperaturas máximas. En cambio, en la estación UNC al presentar una tasa de calentamiento levemente superior al de las observaciones hace que la diferencia en las temperaturas máximas sea menor. En general a partir de los valores modelados se logra ver la sobrestimación de estos con respecto a los valores observados presentando un sesgo de 1.2°C para UNC y 0.5 °C para Ronquillo y RMSE de 1.4 °C y 2.1°C respectivamente.

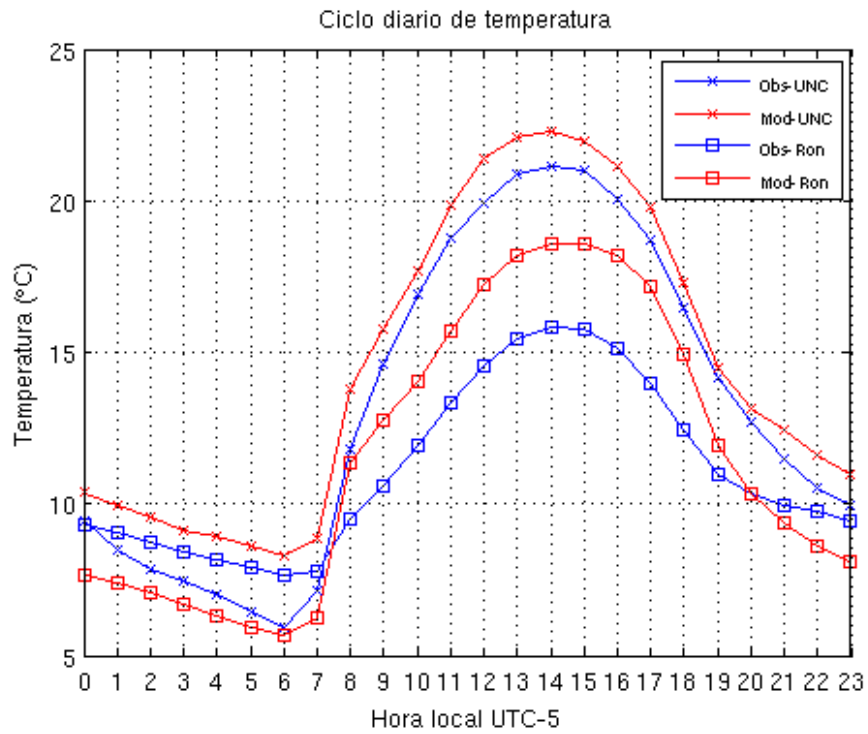


Figura 4.2: Ciclo diario de temperatura modelada y observada para las estaciones UNC y Ronquillo durante el mes de agosto de 2010.

A continuación se evalúa el desempeño del modelo en cuanto a la temperatura mínima y máxima diaria. Las figuras 4.3 y 4.4 muestran los gráficos de cajas de temperatura mínima y temperatura máxima observadas y modeladas para las 9 estaciones que disponen de estos datos.



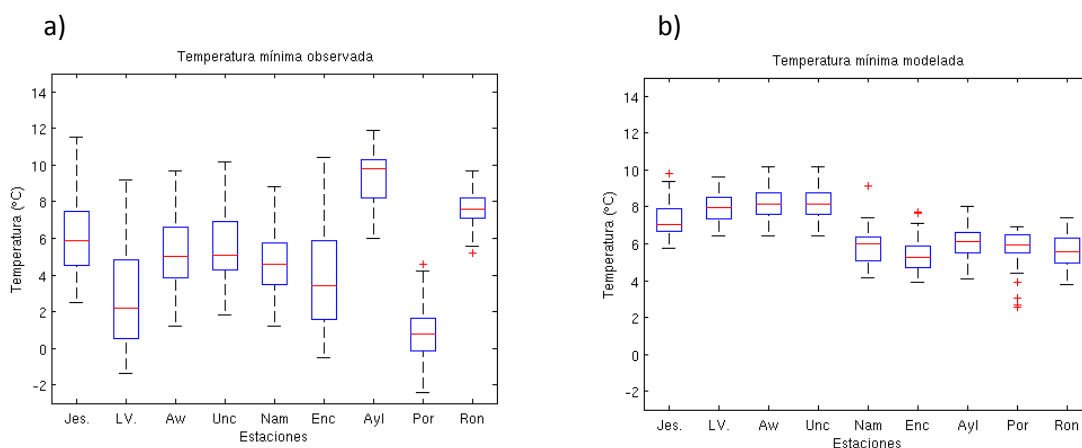


Figura 4.3: Gráficos de caja de las temperaturas. a) Temperaturas mínimas observadas, b) Temperaturas mínimas modeladas. Las estaciones consideradas son: Jes: Jesús, LV: La Victoria AW: A. Weberbauer, UNC: UNC, Nam: Namora, Enc: Encañada, Ayl: Aylambo, Por: Porcón y Ron: Ronquillo.

En la figura 4.3.a se presenta el gráfico de cajas, que muestra la variabilidad de la temperatura mínima observada con rangos intercuartílicos de hasta  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , con rangos simétricos a excepción de la estación Aylambo. En la serie modelada de la figura 4.3.b se observa una sobreestimación que ocurre para todos los cuartiles de las estaciones La Victoria, A. Weberbauer, Jesús y Porcón, siendo mayor en esta última. En cambio, se puede observar la subestimación para las estaciones de Ronquillo y Aylambo. Se presentan también rangos intercuartílicos simétricos para todas las estaciones, las mismas que varían hasta  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  respecto al valor medio de cada estación.

En el Valle de Cajamarca, agosto es el mes en que se presentan las temperaturas mínimas más bajas, por tanto, la mayor ocurrencia de heladas meteorológicas. Durante este mes del año 2010 en la estación Porcón se presentaron 8 días de heladas alcanzando  $-2.4^{\circ}\text{C}$  como temperatura más baja. En la estación Encañada se presentaron 2 días con  $-0.5^{\circ}\text{C}$  y en la estación La Victoria se presentaron 2 días alcanzando  $-1.0^{\circ}\text{C}$  como temperatura más baja. Estos valores no logran ser reproducidos por el modelo, ya que los valores mínimos de

temperatura que se observan en la figura 4.4.b son sobreestimados en su mayoría, por lo tanto, el modelo no logra reproducir estas temperaturas mínimas que indican la ocurrencia de heladas.

Las temperaturas máximas observadas muestran rangos intercuartílicos simétricos de hasta  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  en todas las estaciones a excepción de Aylambo, cuyos valores son más dispersos (Figura 4.4.a). En cambio, en los valores modelados de temperatura máxima (Figura 4.4.b) se observa una distribución más simétrica con rangos intercuartílicos de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Se presenta la subestimación para todos los cuartiles a excepción de la estación Aylambo donde los valores son sobrestimados.

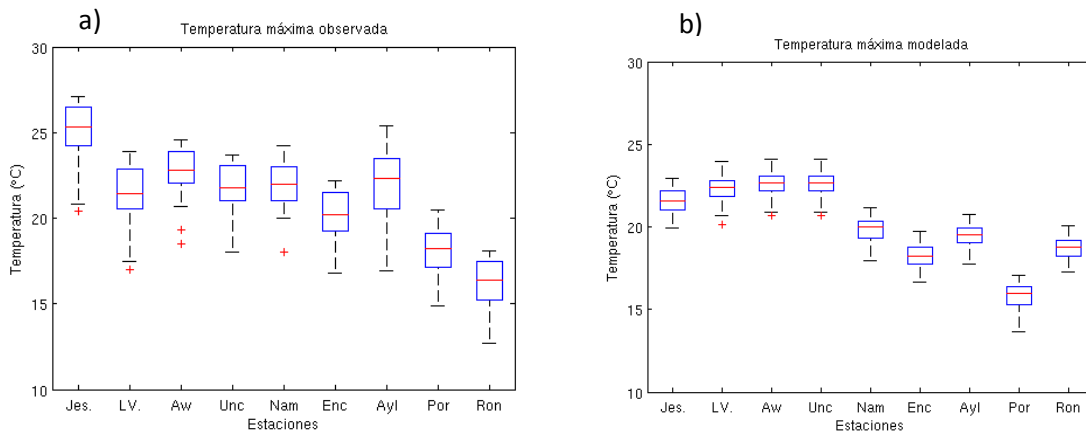


Figura 4.4: Gráficos de caja de las temperaturas a) Temperatura máxima observada, b) Temperatura máxima modelada. Estaciones consideradas: Jes: Jesús, LV: La Victoria AW: A. Weberbauer, UNC: UNC, Nam: Namora, Enc: Encañada, Ayl: Aylambo, Por: Porcón, Ron: Ronquillo.

Dada la cercanía geográfica entre las estaciones: UNC, La Victoria, Jesús y A. Weberbauer y al estar ubicadas en la parte baja del valle, su promedio será considerado como una sola estación, a la cual se denominará “Valle”. Al reproducir las series diarias de temperaturas máximas y mínimas podemos observar que por lo general el modelo sobreestima las temperaturas mínimas, pero en las estaciones de Aylambo y Ronquillo presenta una ligera subestimación (Figura 4.5). Si bien las temperaturas máximas observadas son menores con respecto a las modeladas, el modelo reproduce la homogeneidad de las mismas (Figura 4.6).

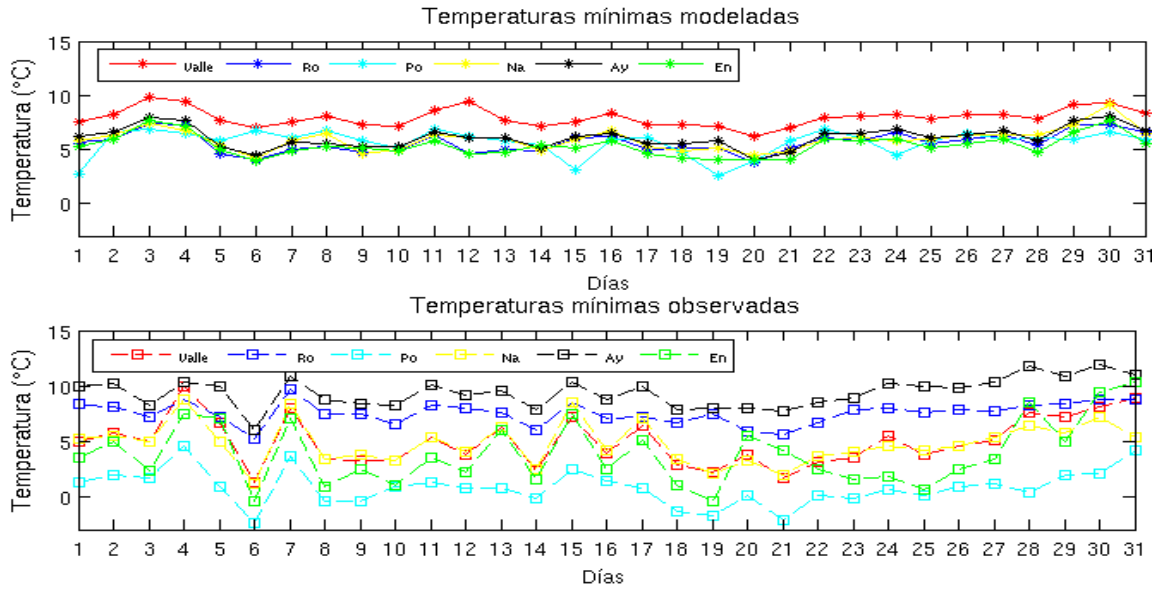


Figura 4.5: Series diarias de temperatura mínima modeladas (panel superior) y temperatura mínima observadas (panel inferior). Estaciones consideradas Valle, Ro: Ronquillo, Po: Porcón, Na: Namora, Ay: Aylambo y En: Encañada.

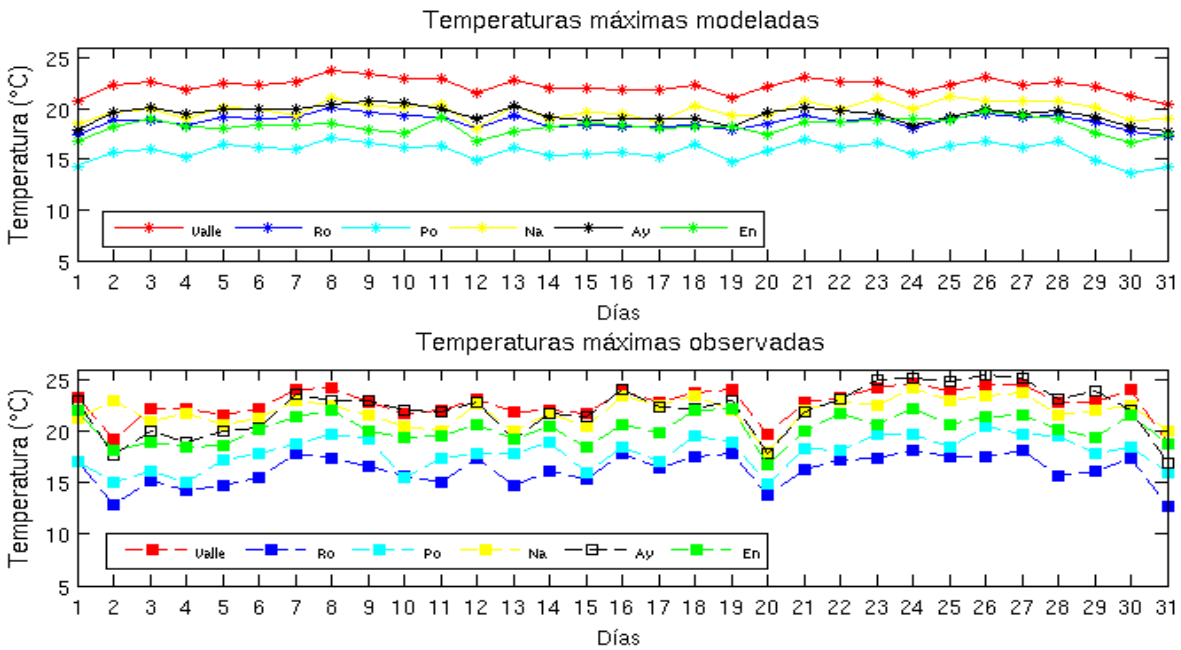


Figura 4.6: Series diarias de temperatura máximas modeladas (panel superior) y temperatura mínima observadas (panel inferior). Estaciones consideradas Valle, Ro: Ronquillo, Po: Porcón, Na: Namora, Ay: Aylambo y En: Encañada.

Para un mejor análisis se realizó gráficos de dispersión de valores diarios de temperatura máxima (Figura 4.7) y así visualizar gráficamente su correlación, Calculando los coeficientes de determinación podemos observar que no se da un buen ajuste lineal, evidenciándose coeficientes de correlación no significativos para todas las estaciones. Por el contrario en las temperaturas mínimas (Figura 4.8) existe una correlación significativa para las estaciones: Valle, Ronquillo, Aylambo y Namora, en todas ellas presenta un coeficiente de determinación menor a 30% por lo que se evidencia una baja bondad en el ajuste.

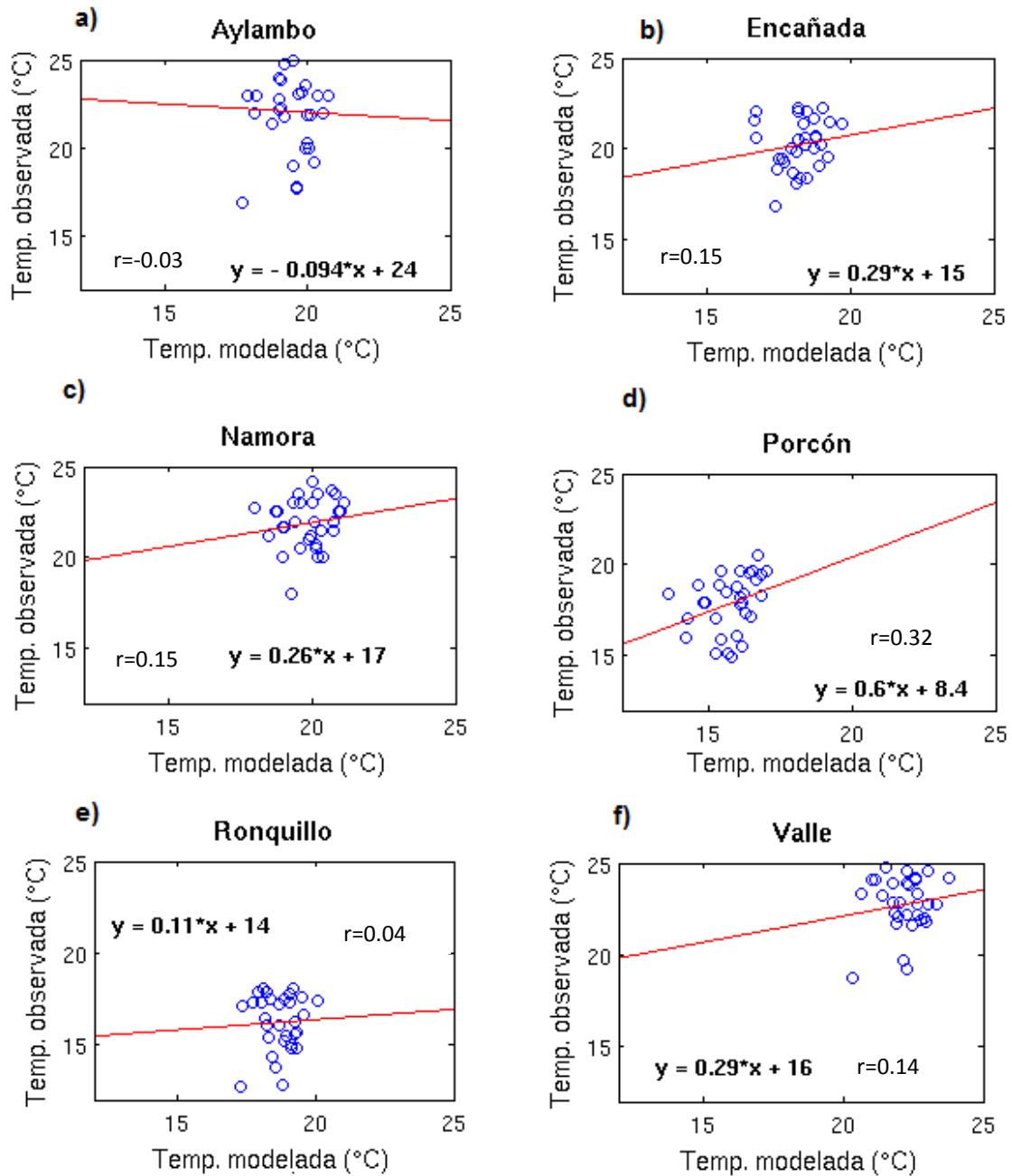


Figura 4.7: Dispersión de valores de temperatura máxima modelada y observada para las estaciones. a) Aylambo, b) Encañada, c) Namora, d) Porcón, e) Ronquillo y f) Valle.

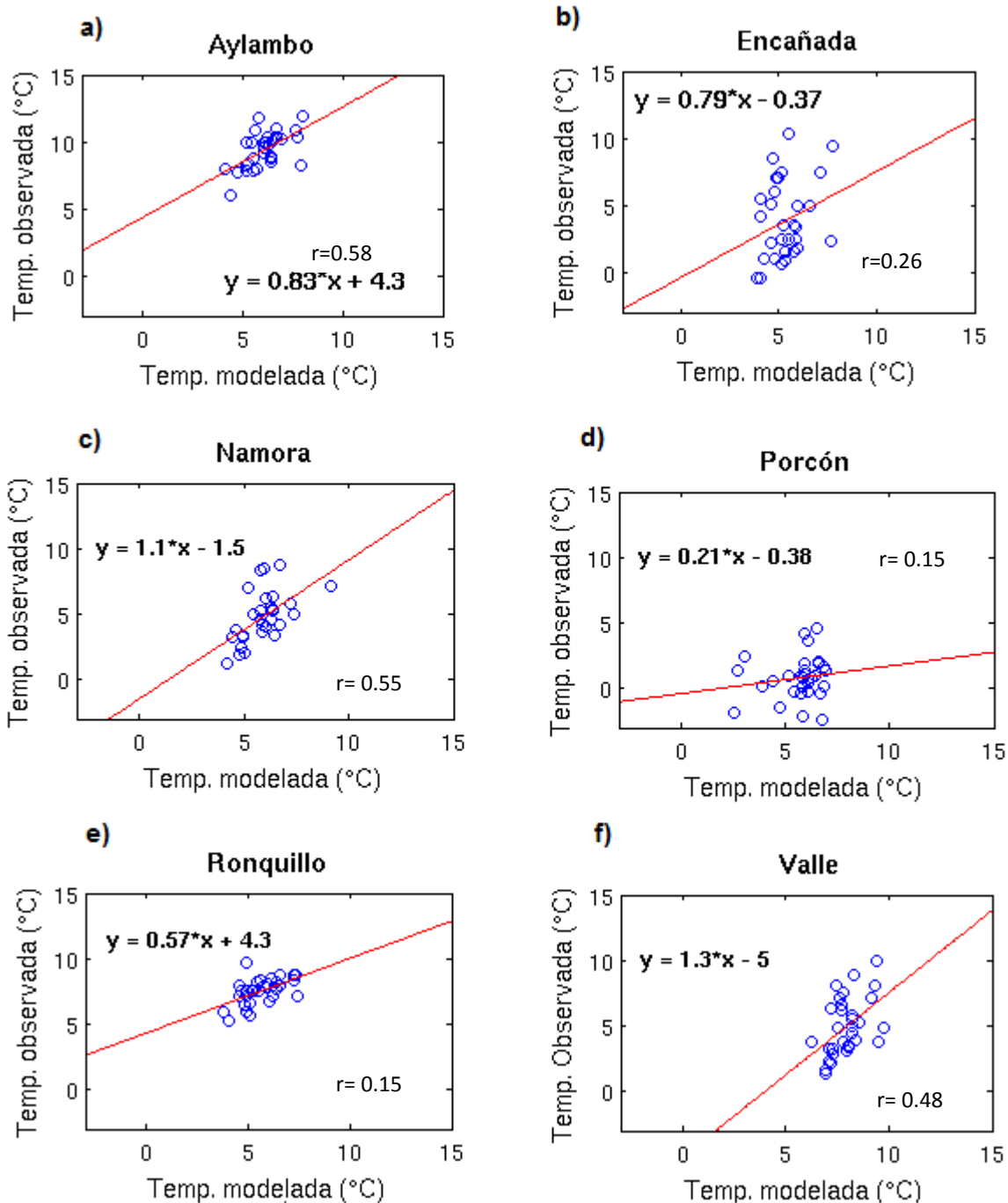


Figura 4.8: Dispersión de valores de temperatura mínima modelada y observada para las estaciones. a) Aylambo, b) Encañada, c) Namora, d) Porcón, e) Ronquillo y f) Valle.

Se consideró también importante ver la variación de la temperatura con la altura (Figura 4.9). En general la variación de temperatura máxima observada con la altura obedece a un gradiente de  $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . Los valores modelados registran por su parte un gradiente de temperatura máxima de  $-1.1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . En cambio la temperatura mínima observada no tiene una clara correlación con la altura, sobre todo durante noches despejadas, ya que la topografía alrededor de las estaciones es más importante en comparación con la altitud (Lindkvist et al. 2000). Los valores promedios de temperatura mínima observada de las estaciones que se encuentran en el fondo del valle (Jesús, La Victoria, A. Weberbauer y UNC) son menores que los valores de las estaciones que se ubican en ladera (Ronquillo y Aylambo). El modelo no reproduce estas diferencias ya que sobrestima en las estaciones del fondo del valle y subestima a las que están ubicadas en las laderas occidentales del valle de Cajamarca.

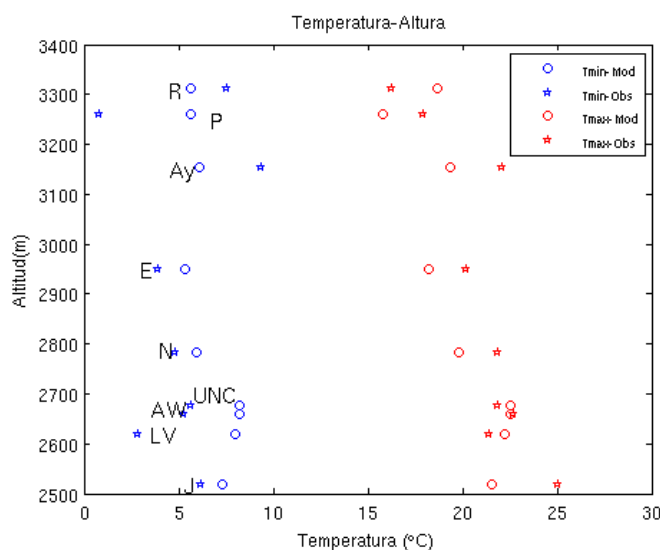


Figura 4.9: Promedios de temperaturas máximas y mínimas para el mes de agosto de 2010 en función de la altitud de cada estación. Temperatura mínima modelada (\*azul), temperatura mínima observada (° azul), temperatura máxima modelada (\* rojo) y temperatura máxima modelada (° rojo). Estaciones consideradas: J: Jesús, LV: La Victoria, UNC: UNC, AW: A. Weberbauer, N: Namora, E: Encañada, Ay: Aylambo, P: Porcón y R: Ronquillo.

Como ya se mencionó, se utilizó indicadores estadísticos para la evaluación del desempeño del modelo, determinando la tendencia de sobreestimar o subestimar los valores obtenidos al reproducir la temperatura mínima y máxima. El cuadro 4.2 muestra los valores de sesgo y el RMSE obtenidos en el análisis. Valores de sesgo positivo indica la sobreestimación del modelo y los valores negativos indican la subestimación de los valores modelados con respecto a los observados.

Cuadro 4.2. Valores de sesgo y RMSE para todas las estaciones, de temperatura máxima y mínima.

ESTACIÓN	SESGO		RMSE	
	Tmin (°C)	Tmax (C)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
UNC	2.5	0.7	3.1	1.7
Ronquillo	-1.9	2.5	2.1	2.9
A. Weberbauer	2.9	-0.20	3.4	1.6
Porcón	4.8	-2.10	5.1	2.5
Victoria	5.7	0.8	5.8	2.0
Encañada	1.5	-2.0	3.1	2.4
Namora	1.1	-2.6	3.5	2.5
Aylambo	-3.2	-2.6	3.4	3.5
Jesús	1.1	-3.4	2.3	3.7

La sobreestimación y subestimación de las temperaturas obtenidas con el modelo puede responder a la diferencia en la topografía que el modelo no logra reproducir. Es probable que los fenómenos de acumulación de aire frío en la parte baja del valle no puedan ser captados por el modelo al igual que otras características como la diferencia de altitud entre los puntos, exposición de los terrenos y la pendiente, que son importantes en terrenos complejos como el valle de Cajamarca ya que influyen en el balance de energía superficial. Otro factor que



influye y puede generar diferencias entre las series observadas y modeladas son aquellos relacionados al uso de suelo. La base de datos de uso de suelo del modelo considera diferentes clases de uso con propiedades físicas distintas, en cambio las estaciones utilizadas se encuentran en su mayoría bajo el mismo uso del suelo (pastos y cultivos de pan llevar). Como indica Hong et al. (2009) los parámetros como topografía, uso y tipo de suelo, cobertura vegetal, influyen en gran medida en el rendimiento del modelo ya que determinan directamente los parámetros de superficie tales como albedo, emisividad, rugosidad, índice de área foliar, la porosidad y conductividad térmica del suelo.

#### **4.2. Precipitación**

Como se mostró anteriormente, la precipitación en Cajamarca tiene una estacionalidad marcada, ocurriendo la estación lluviosa de octubre a abril y la estación seca que se presenta de mayo a setiembre. En la estación lluviosa, marzo es el mes de mayor frecuencia y cantidad de lluvia y agosto el mes más seco dentro de la estación seca. Teniendo en cuenta estas consideraciones y con el propósito de evaluar el rendimiento del modelo respecto a la precipitación, el análisis se realizó para estos dos meses del año 2010. La figura 4.10 muestra la serie horaria de precipitación para los meses de marzo y agosto en la estación UNC, por ser ésta la única estación que brinda información horaria de precipitación. Para las otras 5 estaciones la evaluación se realizó con valores diarios. Como puede observarse el modelo logra reproducir lluvia durante marzo, sobreestimando los valores horarios, mientras que en agosto la lluvia modelada es mínima, al igual que en los valores observados.

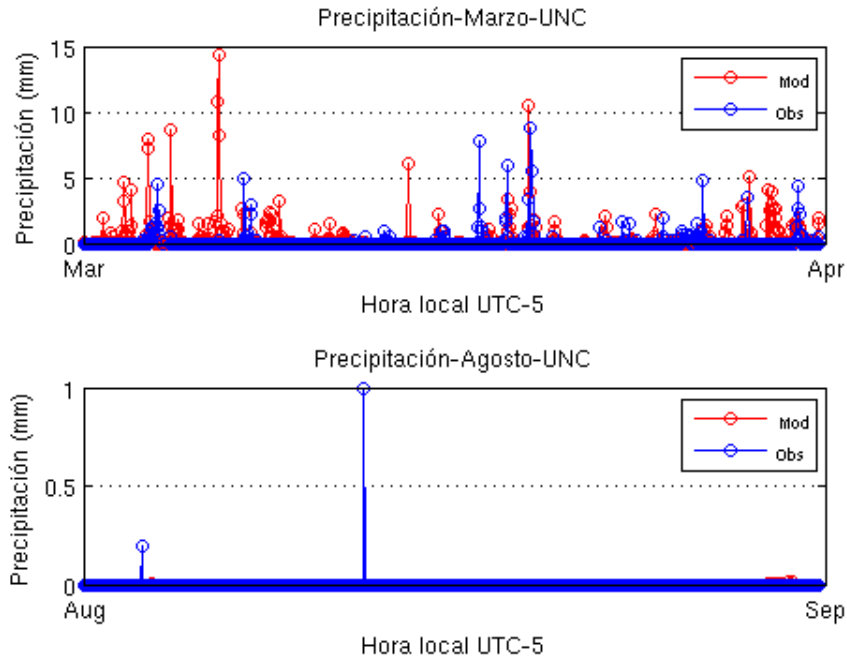


Figura 4.10: Serie de precipitación horaria observada y modelada en la estación UNC para los meses de marzo (superior) y agosto (inferior) del 2010.

Tal como indica Junquas et al. (2013), el modelo regional WRF es capaz de representar los patrones principales de precipitación en la región de los Andes tropicales, ya que reproduce las condiciones lluviosas de marzo (Figura 4.11) y las secas de agosto (Figura 4.12) para todas las estaciones. En las series horarias de precipitación durante el mes de marzo se puede observar que el modelo sobrestima los valores observados y no hay una buena reproducción de la serie mensual ya que registra días de lluvias en los días donde no se presenta

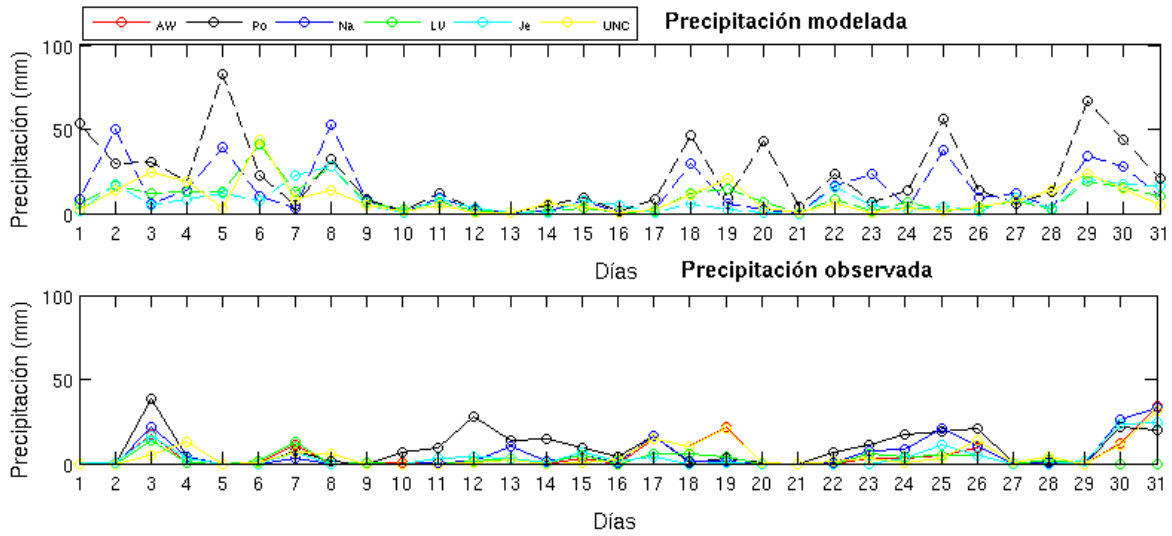


Figura 4.11: Serie diaria de precipitación durante el mes de marzo del 2010, precipitación modelada (superior), precipitación observada (inferior) para las estaciones: Aw: A. Weberbauer, Po: Porcón, Na: Namora, LV: La Victoria, Je: Jesús y UNC.

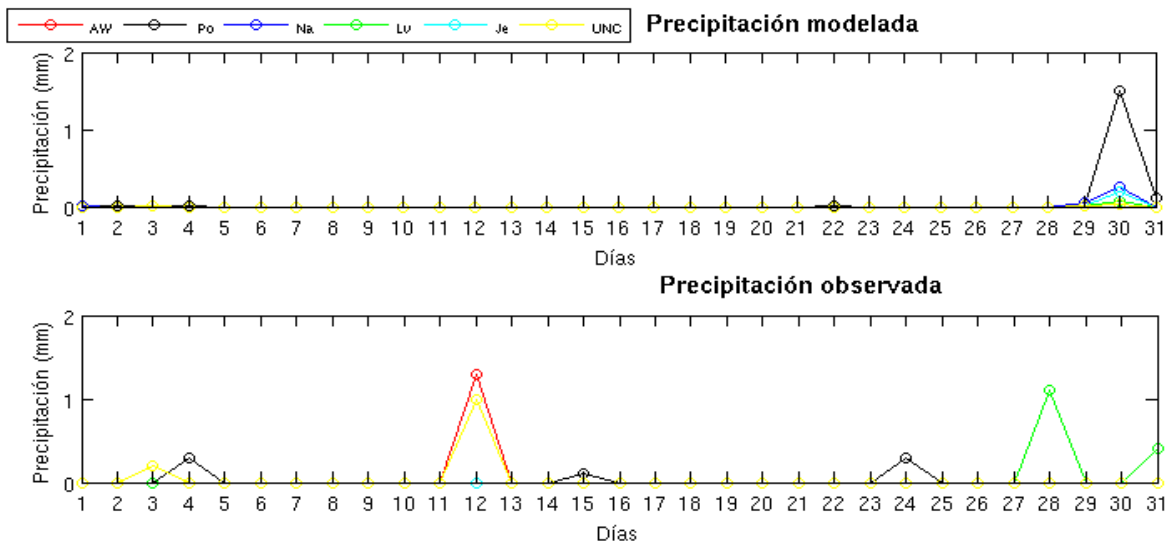


Figura 4.12: Serie diaria de precipitación durante el mes de agosto de 2010, precipitación modelada (superior), precipitación observada (inferior) para las estaciones: Aw: A. Weberbauer, Po: Porcón, Na: Namora, LV: La Victoria, Je: Jesús y UNC.

Sin embargo, en todas las estaciones se puede observar una sobreestimación. Durante el mes de marzo los valores mensuales de precipitación modelada pueden ser triplicados con relación a los valores observados (Figura 4.13)

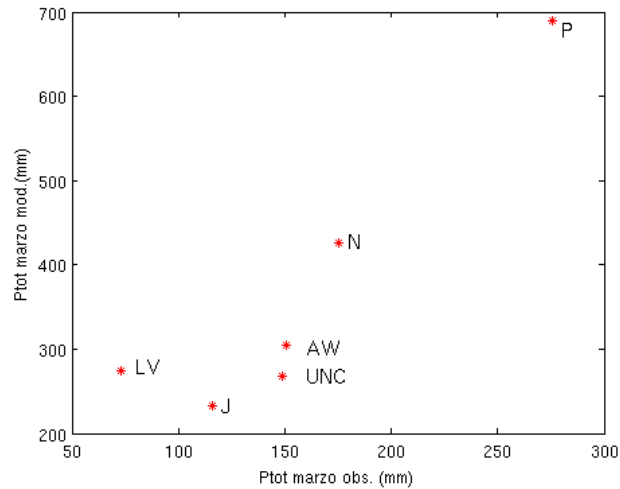


Figura 4.13: Dispersión de la precipitación total modelada y observada durante el mes de marzo de 2010 para las estaciones: J: Jesús, LV: La Victoria, UNC: UNC, AW: A. Weberbauer, N: Namora y P: Porcón.

En cuanto la variación de la precipitación con la altura, la figura 4.14 muestra los promedios de la precipitación para el mes de marzo de 2010. Los promedios observados se incrementan a una tasa de +21 mm/100m. La precipitación observada tiene una buena correlación con la altura  $r= 0.92$ . Esta alta correlación logra ser representada por el modelo, ya que alcanza una tasa de 62 mm/100m y un  $r=0.98$ .

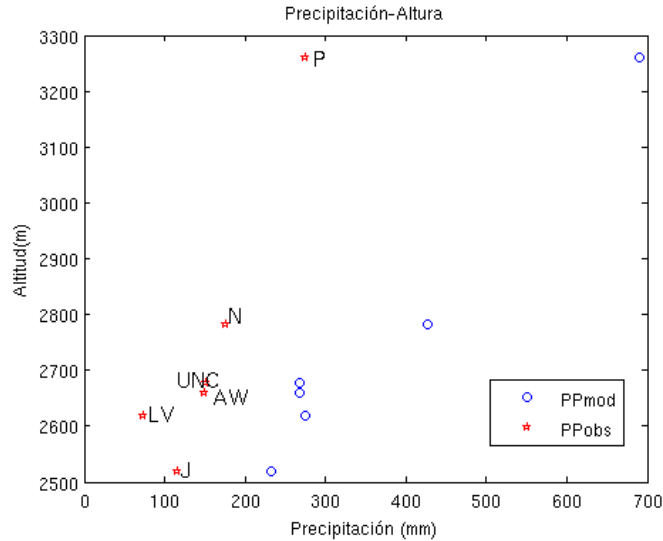


Figura 4.14: Precipitación acumulada durante el mes de marzo de 2010 en función de la altura de cada estación. Precipitación modelada (azul) y precipitación observada (rojo) para las estaciones: J: Jesús, LV: La Victoria, UNC: UNC, AW: A. Weberbauer, N: Namora y P: Porcón.

Para evaluar la variación espacial de la precipitación, se realizó una correlación entre las estaciones, con los datos observados (Cuadro 4.3) y modelados (Cuadro 4.4). Las estaciones Victoria y A. Weberbauer, por su cercanía, son las que mejor correlación presentan (0.95), sin embargo, en lo observado sólo alcanza un  $r=0.40$ . Otras estaciones en las que el modelo logra reproducir su buena correlación es Namora y Jesús (0.65 en lo modelado y 0.92 en lo observado). En las estaciones más alejadas como Jesús y Porcón en la modelación alcanza un  $r=0.33$  cuando en lo observado es de  $r=0.68$ . Por lo general, las correlaciones de los valores modelados son ligeramente mayores a los observados lo que podría deberse a la sobrestimación que se da en todas las estaciones. Además, de que el modelo reproduce lluvia para los días en que no se presentan según las observaciones.

Cuadro 4.3. Matriz de correlaciones para la precipitación diaria modelada

Estación	Jesús	La Victoria	A.Weberbauer	Namora	Porcón
Jesús	1,0				
La Victoria	0,59	1,0			
A. Weberbauer	0,31	0,85	1,0		
Namora	0,65	0,46	0,22	1,0	
Porcón	0,33	0,36	0,22	0,66	1,0

Cuadro 4.4. Matriz de correlaciones para la precipitación diaria observada

Estación	Jesús	La Victoria	A.Weberbauer	Namora	Porcón
Jesús	1,0				
La Victoria	0,25	1,0			
A. Weberbauer	0,70	0,40	1,0		
Namora	0,92	0,31	0,73	1,0	
Porcón	0,68	0,47	0,46	0,72	1,0

El cuadro 4.5 muestra los indicadores estadísticos para la evaluación del desempeño del modelo, determinando la sobrestimación en todas las estaciones. Esto podría deberse a la sobrestimación de las lluvias estratiformes por parte del modelo (Junquas et al. 2013). Además que el modelo tiende a sobrestimar la precipitación, especialmente en regiones con topografía compleja (Jiménez, 2014), siendo el caso del valle de Cajamarca.

Cuadro 4.5. Valores de sesgo y RMSE para las todas las estaciones durante el mes de marzo de 2010.

Estación	SESGO (mm)	RMSE (mm)
A. Weberbauer	3.8	12.6
Porcón	13.3	28.0
Victoria	6.49	11.7
Namora	8.10	19.0
UNC	3.7	11.9
Jesús	3.7	14.2

### 4.3. Velocidad y dirección del viento

Dada la escasa información en cuanto a velocidad y dirección de viento, la comparación se realizará con los datos obtenidos de la estación UNC, ya que es la única que dispone de información. La figura 4.15 muestra la serie horaria de la velocidad de viento para la estación UNC. Si bien el modelo tiene una buena aproximación para la reproducción de la serie, siempre sobreestima los valores, presentando un sesgo de 1.67 m/s un RMSE 2.20 m/s.

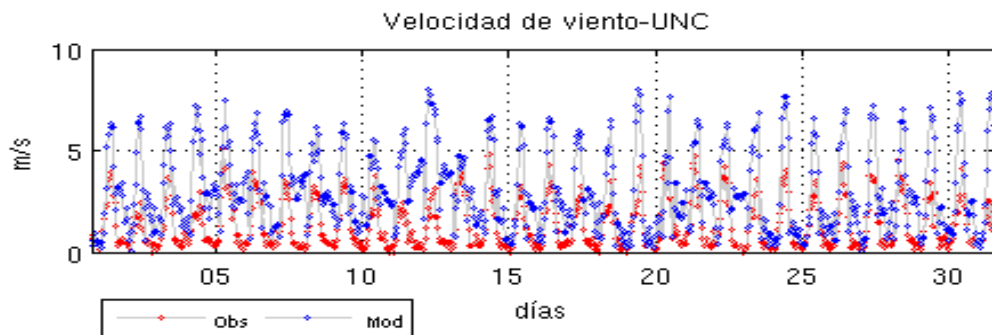


Figura 4.15: serie de velocidad de viento modelada y observada en la estación UNC durante agosto de 2010.

Como se indicó antes, el valle de Cajamarca está bajo la influencia de la circulación local de Valle - Montaña como se puede observar en la figura 4.16.a. Durante el día la dirección predominante son vientos del Sureste y en la noche los vientos son del Noroeste. Durante el día, el modelo logra ligeramente reproducir los vientos valle arriba con dirección Sureste, en cambio, en la noche predominan vientos del norte y en menor frecuencia del Noroeste (Figura 4.16.b).

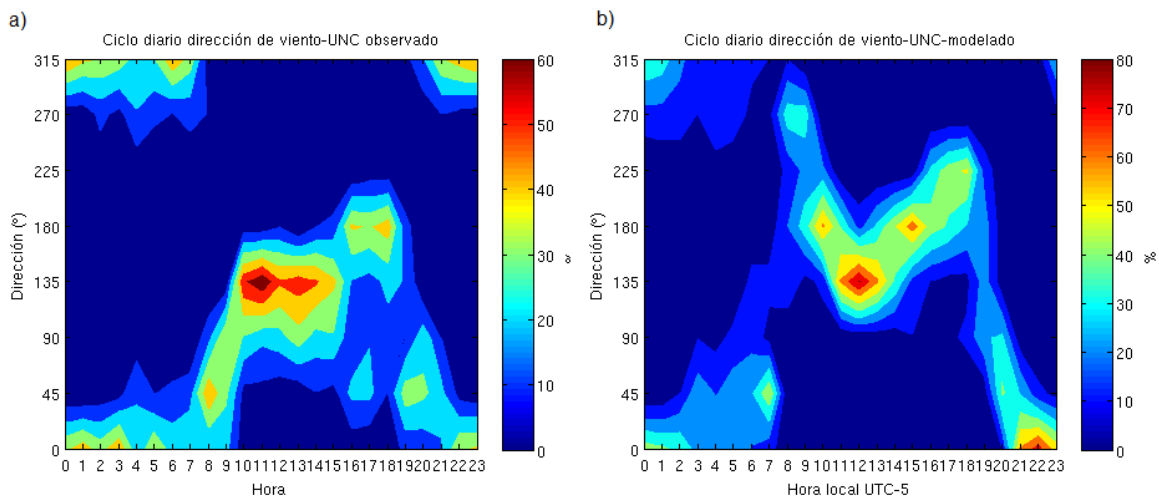


Figura 4.16: Ciclo diario de la dirección de viento a) observado y b) modelado en la estación UNC para el mes de agosto de 2010.

El modelo tiene ligera dificultad para reproducir la circulación local, lo que evidencia que la velocidad del viento tiene una fuerte dependencia a las características específicas del terreno y que la capacidad del WRF para reproducir las velocidades del viento presenta un error de representatividad ya que el modelo suaviza las propiedades físicas de la superficie tales como características orográficas o de uso del suelo (Jiménez et al., 2008; Jiménez et al 2012).



## 5. Conclusiones

En el valle de Cajamarca la temperatura máxima ocurre a las 13 horas local (UTC-5) y la mínima se presenta a las 6 horas local aproximadamente, ambas con escasa variabilidad interdiaria, dando cuenta de una débil variabilidad sinóptica. La modesta variación anual de las temperaturas máximas contrasta a las mínimas que son más variables, ya que estas últimas son más dependientes del lugar. La mayor amplitud térmica se da en los meses de julio y agosto. En estos meses las temperaturas mínimas más bajas se presentan en la parte baja y alta del valle mientras que en las estaciones ubicadas en la ladera occidental las temperaturas son mayores. Esto significa que existe una acumulación de aire frío en la parte baja del valle. Existe una variación altitudinal de la temperatura máxima ( $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ). La variabilidad interanual de la temperatura podría estar relacionada con eventos como El Niño ya que en el evento de 1997-1998 existe una relación positiva de el ICEN con la temperatura mínima (mínimas más altas). En cambio, para la temperatura máxima no se muestra una clara relación. Para La Niña que ocurrió durante 2010 se observa una relación negativa, dado que La Niña se asocia a anomalías negativas de TSM, por lo tanto al existir la correlación negativa con la temperatura mínima, la temperatura mínima con La Niña es mayor.

Las heladas se presentan en dos períodos de frecuencia máxima invernal y primaveral, siendo julio, agosto y noviembre los meses de mayor ocurrencia. Las estaciones de mayor altitud como Porcón y La Encañada son las que registran mayor número de heladas al año, al igual que la estación La Victoria que se encuentra ubicada en el fondo del valle. Esto podría deberse a que durante las noches despejadas la relación de temperatura altitud se revierte produciéndose la acumulación de aire frío en el fondo del valle.

La precipitación en el valle presenta una estacionalidad marcada, iniciándose en los principios de la primavera y finalizando en otoño del siguiente año. La precipitación de origen convectivo se incrementa desde el mes de setiembre, alcanzando su máximo valor y mayor cantidad de días con ocurrencia de lluvias durante el mes de marzo. La acumulación aumenta con la altura a razón de  $+21$

mm/100m. La estación de Porcón es la que registra la mayor cantidad de precipitación anual.

La circulación local es impulsada por las diferencias horizontales de presión generadas por gradientes horizontales de temperatura, presentando un marcado sistema de brisa valle-montaña. Durante el día se presentan vientos del Sureste de mayor magnitud con dirección valle arriba. En la noche se producen vientos descendientes con dirección Noroeste (valle abajo).

La configuración utilizada en el modelo WRF es capaz de reproducir el ciclo diario de temperatura. Subestima la tasa de enfriamiento en la estación ubicada en el fondo del valle, generando una mayor temperatura modelada. En cambio en la estación Ronquillo que se encuentra ubicada en la ladera, la tasa de enfriamiento que presenta es mayor durante la noche, subestimando la temperatura mínima. Luego genera una tasa de calentamiento mayor, lo que conlleva a una sobrestimación de la temperatura máxima. El modelo reproduce la modesta variabilidad interdiaria de las temperaturas máximas y mayor variabilidad de las temperaturas mínimas. El modelo logra captar sólo la circulación valle arriba de los vientos durante el día, pero en la noche tiene dificultad en reproducir la dirección del viento, presentando siempre una sobrestimación en su magnitud. En cuanto a la precipitación, el modelo logra reproducir las condiciones secas de invierno y las lluviosas de verano, sin capturar la variabilidad interdiaria. Además el modelo sobreestima la precipitación, particularmente en las partes altas del valle.

Existe la posibilidad de que las diferencias encontradas en torno a la temperatura superficial y demás variables se deba a parámetros que guardan relación con el balance de energía superficial. Dada alta la variabilidad espacial observada queda propuesta la realización de simulaciones con mayor resolución espacial, además de un análisis de sensibilidad de diferentes parametrizaciones físicas, las que permitan tener una mejor representación de las variables antes indicadas y así lograr una mejoría en la capacidad de pronóstico principalmente para temperaturas mínimas y precipitación en el valle de Cajamarca.

## Bibliografía

Aceituno, P, 1989: On the functioning of the southern oscillation in the South American, sector. Part II. Upper-air circulation, *J. Climate*, 2:4, 341-355.

Ahuja, L. R., J. C. Ascough, and O. David, 2005: Developing natural resource models using the object modeling system: feasibility and challenges. *Adv. Geosci.*, **4**, 29–36.

Baraer, M., Mark, B., McKenzie, J., Condom, T., Bury, J., Huh, K. I., Portocarrero, C., Gomez, J. and Rathay, S., 2012: Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca, *Journal of Glaciology*, **58**, 134–150.

Barry, R, 2008: Mountain Weather and climate. 3rd ed. C.U. Press, Ed United Staes of America, 506 pp.

Bennett, N. D., and coauthors, 2013: Characterising performance of environmental models. *Environ. Model. Softw.* **40**, 1–20.

Borrego, C., A. Monteiro, J. Ferreira, A. Miranda, A. Costa, A. Carvalho, and M. Lopes, 2008: Procedures for estimation of modelling uncertainty in air assessment. *Environ. Int.*, **34**, 613–620

Burgos, J.1963: Las heladas en la Argentina. Colección científica del INTA. Vol III.388p. Buenos Aires.

Chamorro,A., 2012: simulación de la intensificación del viento frente a la costa del Perú durante un evento El Niño aplicando el modelo atmosférico WRF (Westher Research and Forecasting). Tesis de Licenciatura en Física, Universidad Mayor de San Marcos.

De la Cruz, J., P. Zorogastúa y J. Hijmans, 1999: Atlas Digital de los Recursos Naturales de Cajamarca. Departamento de Sistemas de Producción y Manejo de

Recursos Naturales.Documento de Trabajo No. 2. Centro Internacional de la Papa, Lima, Perú.

Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077–3107.

ENFEN, 2012: Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú, Nota Técnica.

Emery, C., E. Tai and G. Yarwood, 2001: Enhanced Meteorological Modeling And Performance Evaluation For Two Texas Ozone Episodes, Prepared for The Texas Natural Resource Conservation Commission.

Gálvez, J., M. Douglas., 2006: Modulation of rainfall by lake Titicaca using the WRF model. Proceedings of 8th ICSHMO. Foz do Iguacu, Brazil, April 24-28. P 745- 752.

Garreaud, R., 2009. The Andes climate and weather. *Adv. Geosci*, 7, 1-9.

Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129–151.

Hong, S.-Y., and Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318–2341.

Hong, S., V. Lakshmi, E. E. Small, F. Chen, M. Tewari, and K. W. Manning, 2009: Effects of vegetation and soil moisture on the simulated land surface processes from the coupled WRF/Noah model. *J. Geophys. Res.*, **114**, D18118.

Horel, J., A. Hahmann, and J. Geisler, 1989: An investigation of the Annual Cycle of Convective Activity over the Tropical Americas. *Journal of Climate*. 2:11, 1388-1403.

Hughes, M., A. Hall and R. Fovell. 2007. Dynamical controls on the diurnal cycle of temperature in complex topography. *Clim. Dynam*, 29, 277-292.

Jiménez, P., E. García, J. F. González, F. Valero, J. P. Montávez, and J. Navarro, 2008: Surface Wind Regionalization in Complex Terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 47:1, 308-325

Jimenez, P. and J. Dudhia., 2012: Improving the Representation of Resolved and Unresolved Topographic Effects on Surface Wind in the WRF Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51:2, 300-316

Jiménez, M., 2014: Validación de la capacidad del modelo WRF para pronosticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetos y tablas de contingencia. Tesis de Magíster en Ciencias Meteorológicas. Universidad Nacional de Colombia.

Junquas, C., K. Takahashi, T. Condom, J. Sicart, J. Espinoza. 2013: Influencia de la orografía sobre las precipitaciones en los andes tropicales. Foro internacional de glaciares. Huaraz, Perú.

Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170–181.

Lagos, P., Y. Silva, E. Nick and K. Mosquera, 2008: El Niño-related precipitation variability in Perú. *Advances in Geosciences*, **14**, 231-237.

.Lavado, C. S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J. C., and Guyot, J. L. 2012: Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages, *Hydrol. Sci. J.*, **57**, 625–642.

Lindkvist, L., T. Gustavsson, and J. Bogren, 2000: A frost assessment method for mountainous areas. *Agric. For. Meteorol.* **102**, 51–67

Ministerio de Agricultura, 2013: Plan de gestión de riesgos y adaptación al cambio climático en el sector agrario. Periodo 2012-2021. Cajamarca, Perú

Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663–16682.

Mohan, M., A. Prabhat, 2015: WRF model performance analysis for a suite of simulation design, *Atmos. Res.*, **169**, 280–291.

Montes, C., 2010: Temperaturas mínimas en el valle de Casablanca: descripción de su variabilidad y comparación con resultados del modelo WRF. Tesis de Magíster en Meteorología y Climatología, Universidad de Chile.

Mourre, L., T. Condom, C. Junquas, T. Lebel, J. E. Sicart, R. Figueroa, and A. Cochachin, 2016: Spatio-temporal assessment of WRF, TRMM and in situ precipitation data in a tropical mountain environment (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **20**, 125–141.

OMM, 2012: Glosario Internacional de Hidrología. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza.

Pasapera, J., M. Saavedra, 2013: Simulación numérica del temporal de baja temperatura y episodio níxico, ocurrido en la Región de Puno final del mes agosto del 2013. XXII Simposio Peruano de Física – UNMSM.

Prabha, T., G. Hoogemboom. 2008: Evaluation of the weather research and forecasting model for two frost events. *Comp. Elec. Agric.* **64**, 234-247.

Raupach, M. R., and J. J. Finnigan, 1997: The influence of topography on meteorological variables and surface-atmosphere interactions. *J. Hydrol.* **190**, 182–213,

Sánchez, A., Vásquez, C., 2010: Mapa climático del departamento de Cajamarca. Perú.

Segura, B., I. Montes; K. Mosquera., 2014: Evolución de sistema computacional de alto rendimiento en el IGP para un mejor pronóstico y estudio de fenómeno climáticos. Boletín Técnico - Vol. 1 N° 11. Perú.

SENAMHI, 2010: Atlas de heladas en el Perú, FAO, Lima Perú. 99pp.

Sistema Nacional de Defensa Civil, 2006: Plan regional de prevención y atención de desastres. Región Cajamarca.

Skamarock, W., J. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, D. Barker, W. Wang, J. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale and Microscale Meteorology Division, Boulder, Colorado, USA.

Takahashi, K., K. Mosquera, J. Reupo, 2014: El Índice Costero El Niño (ICEN): historia y actualización. IGP Boletín Técnico - Vol. 1 N° 2 Febrero del 2014

Uribe, A. 2012: Estimación de la capacidad del modelo WRF para pronosticar eventos extremos asociados con altas precipitaciones en la región Andina Colombiana. Tesis de Magíster en Meteorología. Universidad Nacional de Colombia.

Vuille, M., G. Kaser, and I. Juen, 2008: Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation *Glob. Planet. Change*, **62**, 14–28

Whiteman, C. 2000: Mountain meteorology: principles and applications. Oxford University Press. 355p.

Wilks, D. 2006. Statistical methods in the atmospheric sciences, International Geophysics Series, Vol. 59. Academic Press. 627p.

Zhang, D.-L., and R.A. Anthes, 1982: A high-resolution model of the planetary boundary layer sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1594–1609.

## Anexos

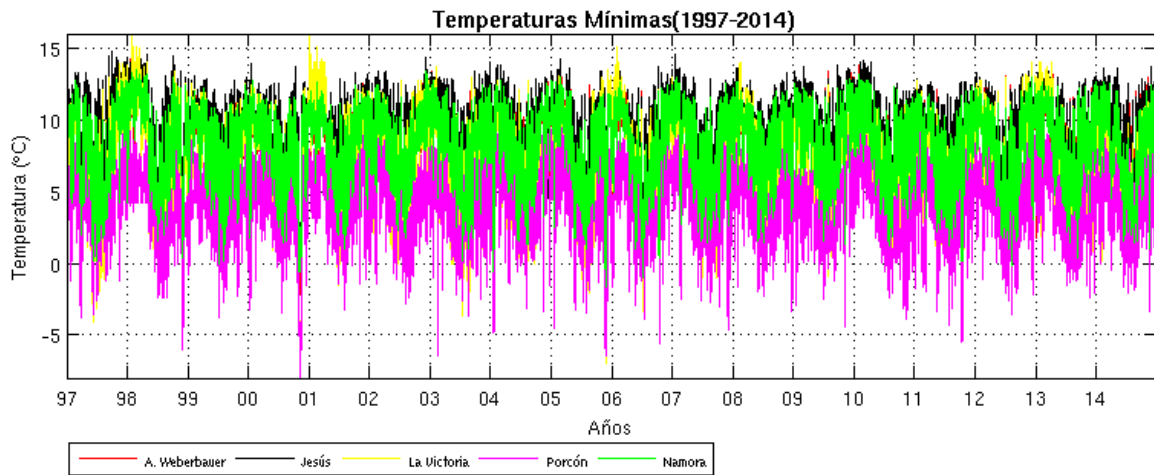


Figura 7.1: Serie diaria de temperatura mínima para las 5 estaciones convencionales durante los años 1997 al 2014.

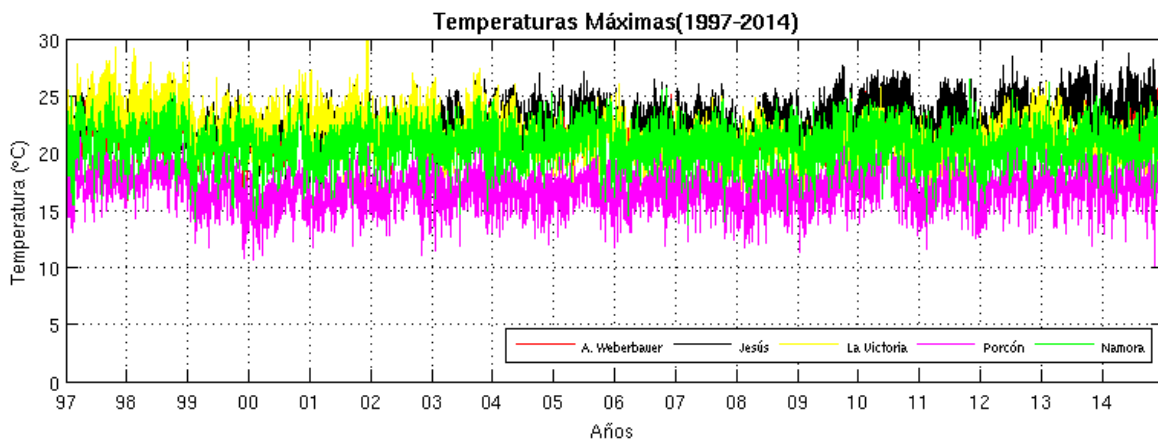


Figura 7.2: Serie diaria de temperatura máxima para las 5 estaciones convencionales durante los años 1997 al 2014.



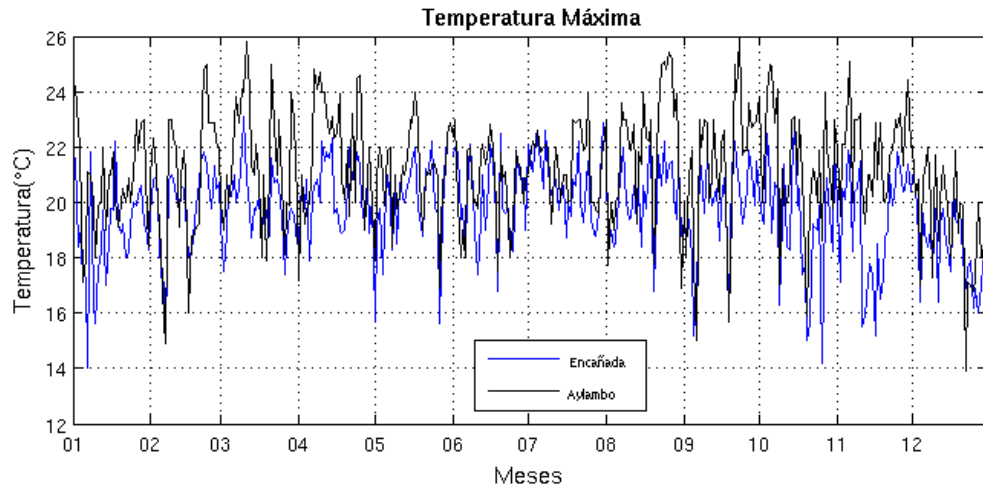


Figura 7.3: Serie diaria de temperatura máxima para 2 estaciones convencionales durante el año 2010.

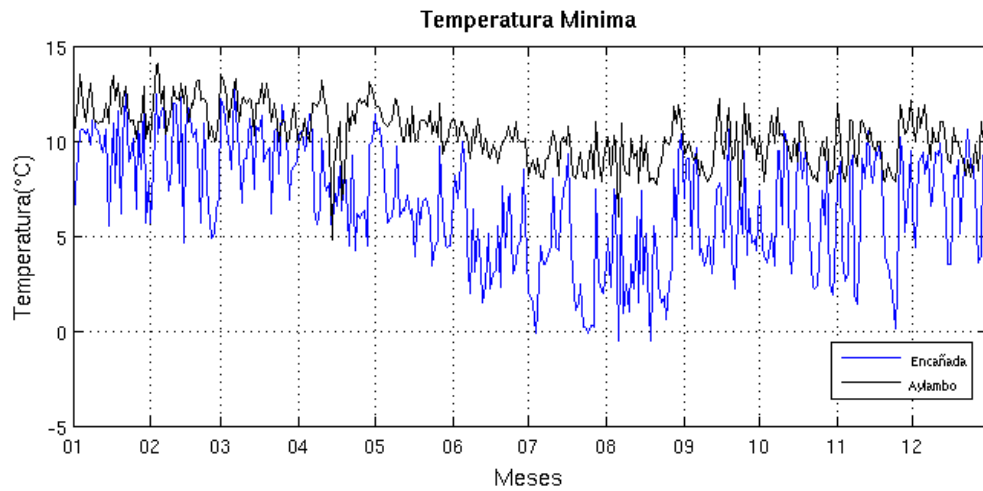


Figura 7.4: Serie diaria de temperatura mínima en las 2 estaciones convencionales durante el año 2010.

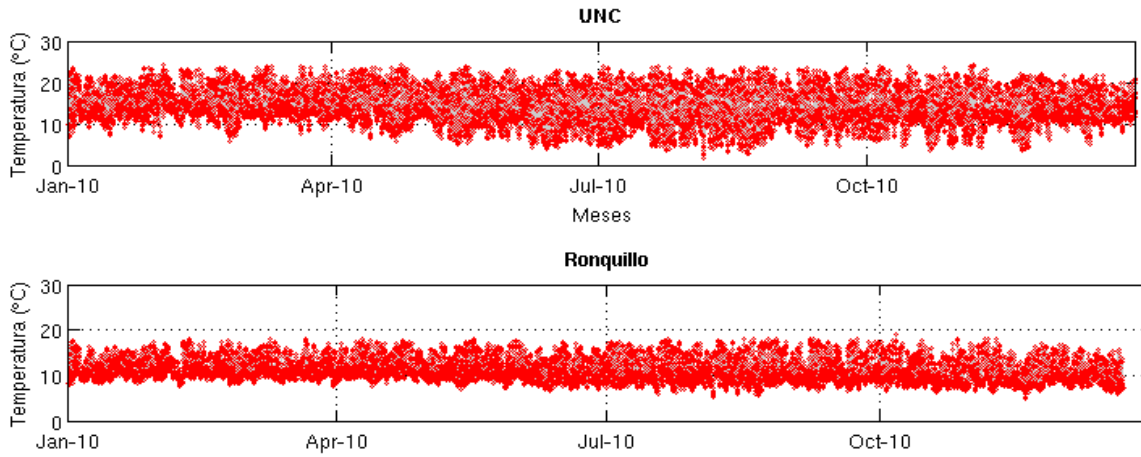


Figura 7.5: Serie horaria de temperatura para las estaciones automáticas UNC (superior) y Ronquillo (inferior) durante el año 2010.

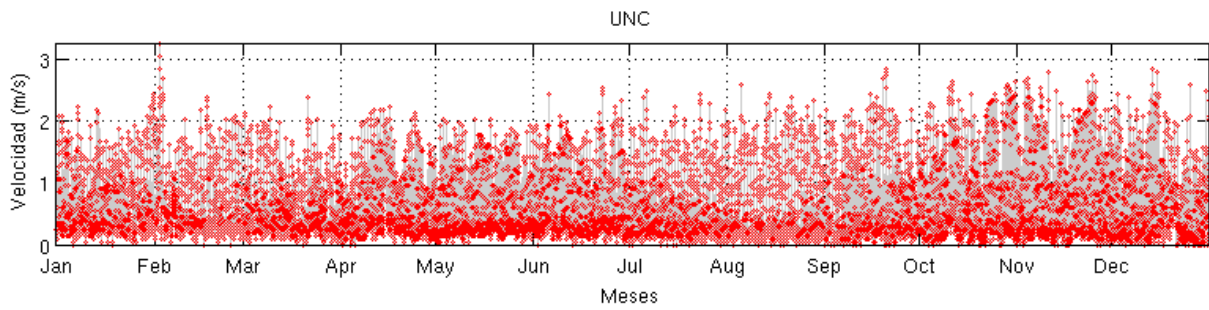


Figura 7.6: Serie horaria de velocidad de viento en las en la estación automática UNC para el año 2010.