

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“DETERMINACIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE  
TEMPERATURAS MÍNIMAS CON FINES DE PRONÓSTICO  
DE HELADAS EN LA REGIÓN ANCASH”**

Presentada por:

**ANABEL YOVANA CASTRO NARCISO**

Tesis para Optar el Título de:

**INGENIERO METEORÓLOGO**

**Lima – Perú**

**2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“DETERMINACIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE  
TEMPERATURAS MÍNIMAS CON FINES DE PRONÓSTICO  
DE HELADAS EN LA REGIÓN ANCASH”**

Presentada por:

**ANABEL YOVANA CASTRO NARCISO**

Tesis para Optar el Título de:

**INGENIERO METEORÓLOGO**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

---

Mg. Sc. Victoria Calle Montes  
PRESIDENTE

---

Ing. Franklin Unsihuay Tovar  
MIEMBRO

---

Mg. Sc. Amelia Huaranga Joaquín  
MIEMBRO

---

Mestre. Jerónimo García Villanueva  
ASESOR

## **DEDICATORIA**

*Al señor sobre todas las cosas por darme la salud y paciencia,  
A mi familia, mi pareja Eber y a mis pequeños Jose Alonso  
y Eber Adriano que son la luz de mi vida y con sus pequeños actos de amor  
y confianza permitieron que siga adelante con mis objetivos. Muchas gracias.*

## **AGRADECIMIENTO**

El presente trabajo de investigación se desarrolló bajo el asesoramiento del profesor Mg. Sc. Jerónimo García Villanueva, a quien expreso un especial agradecimiento por la paciencia y tiempo brindado. Asimismo agradezco al SENAMHI por haberme brindado los datos de temperaturas mínimas de las estaciones meteorológicas de Ancash.

Quiero agradecer infinitamente a mis padres por sus consejos, ejemplo de vida y los gratos momentos que hemos compartido y sobre todo por el sacrificio y la confianza que han depositado en mi persona.

A mis amigos de la universidad y de la oficina que con sus consejos me han permitido y ayudado llegar a esta meta.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	viii
ABSTRACT .....	x
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DEL PERÚ .....	3
2.2. TEMPERATURA MÍNIMA .....	4
2.2.1. Comportamiento de la temperatura mínima en la Región de Ancash .....	5
2.3. DEFINICIÓN DE HELADAS .....	8
2.3.1. Clasificación de heladas .....	8
2.3.2. Efecto de las heladas en la agricultura.....	11
2.4. PREDICCIÓN NUMÉRICA EN EL TIEMPO.....	16
2.4.2. Tipos de modelos según escala espacial .....	18
2.5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO REGIONAL BRAMS .....	18
2.5.1. Estructura del modelo BRAMS .....	19
2.6. VALORIZACIÓN ECONÓMICA DEL PRONÓSTICO DEL TIEMPO .....	22
2.6.1 Método del Cost – Loss .....	24
2.6.2 Medidas recomendadas de protección ante las heladas .....	27
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1. MATERIALES.....	31
3.1.1 Descripción de la zona de estudio .....	31
3.1.2. Datos observados .....	36
3.2. MÉTODOS.....	37
3.2.1. Determinación de los modelos empíricos de pronóstico .....	37
3.2.2. Valorización económica del pronóstico de temperaturas mínimas .....	48
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>56</b>
4.1. DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS EMPÍRICOS DE PRONÓSTICO .....	56
4.1.1. Control de calidad de la temperatura mínima observada.....	56
4.1.2. Relación lineal entre la temperatura mínima pronosticada por BRAMS y la temperatura mínima registrada en cada punto de estación .....	59
4.1.3. Modelos empíricos de pronóstico para cada estación y para los tiempos de pronóstico 2 (T2), 3 (T3), 4 (T4) y 5 (T5) .....	65

4.1.4. Validación de los modelos empíricos de pronóstico .....	69
4.2. VALORIZACIÓN ECONÓMICA PARA EL PRONÓSTICO DE HELADAS AGRONÓMICAS EN LOS CULTIVOS DE PAPA Y MAÍZ AMILÁCEO .....	72
4.2.1. Efectos de las heladas agronómicas en la producción agrícola del cultivo de papa y de maíz amiláceo .....	73
4.2.2. Información del pronóstico de temperaturas mínimas con énfasis en las heladas agronómicas en el cultivo de papa.....	75
4.2.3. Determinación del modelo de decisión.....	76
4.2.4. Valor económico del pronóstico de temperaturas en la campaña agrícola 2016/2017 para el cultivo de papa.....	76
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>85</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Temperatura crítica de cultivos andinos en diferentes estadios fenológicos ...	12
<b>Tabla 2:</b> Matriz de Payoff: costos y pérdidas para diferentes resultados en el modelo de cost/Loss. ....	24
<b>Tabla 3:</b> Tabla de contingencia considerando solo un evento .....	26
<b>Tabla 4:</b> Categorías y subcategorías para los métodos de protección contra heladas ....	28
<b>Tabla 5:</b> Calendario de siembra en porcentaje para el departamento de Ancash .....	29
<b>Tabla 6:</b> Calendario de cosechas en porcentaje para el departamento de Ancash.....	30
<b>Tabla 7:</b> Superficie cosechada de los cultivos más importantes de Ancash.....	35
<b>Tabla 8:</b> Estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).....	36
<b>Tabla 9:</b> Configuración de los dominios del modelo BRAMS.....	39
<b>Tabla 10:</b> Estructura de la toma de decisiones .....	49
<b>Tabla 11:</b> Variables que intervienen en la función de producción de la papa o maíz amiláceo.....	50
<b>Tabla 12:</b> Descripción de las variables incluidas en el modelo de decisión.....	54
<b>Tabla 13:</b> Correlación de Pearson entre las temperaturas mínimas pronosticadas y observadas para el tiempo de pronóstico dos (T2) y para los tres dominios. Niveles de significancia al 95 por ciento (cuadro rojo) y 90 por ciento (cuadro verde) .....	62
<b>Tabla 14:</b> Correlación de Pearson entre las temperaturas mínimas pronosticadas y observadas para el tiempo de pronóstico tres (T3) y para los tres dominios. Niveles de significancia al 95 por ciento (cuadro rojo) y 90 por ciento (cuadro verde) .....	62
<b>Tabla 15:</b> Correlación de Pearson entre las temperaturas mínimas pronosticadas y observadas para el tiempo de pronóstico cuatro (T4) y para los tres dominios. Niveles de significancia al 95 por ciento (cuadro rojo) y 90 por ciento (cuadro verde) .....	63
<b>Tabla 16:</b> Correlación de Pearson entre las temperaturas mínimas pronosticadas y observadas para el tiempo de pronóstico cinco (T5) y para los tres dominios. Niveles de significancia al 95 por ciento (cuadro rojo) y 90 por ciento (cuadro verde) .....	64
<b>Tabla 17:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día dos de pronóstico (T2). Dominio 1 .....	65
<b>Tabla 18:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día dos de pronóstico (T2). Dominio 2.....	65

<b>Tabla 19:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día dos de pronóstico (T2). Dominio 3.....	66
<b>Tabla 20:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día tres de pronóstico (T3). Dominio 1 .....	66
<b>Tabla 21:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día tres de pronóstico (T3). Dominio 2 .....	66
<b>Tabla 22:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día tres de pronóstico (T3). Dominio 3 .....	67
<b>Tabla 23:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cuatro de pronóstico (T4). Dominio 1 .....	67
<b>Tabla 24:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cuatro de pronóstico (T4). Dominio 2 .....	67
<b>Tabla 25:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cuatro de pronóstico (T4). Dominio 3 .....	67
<b>Tabla 26:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cinco de pronóstico (T5). Dominio 1.....	68
<b>Tabla 27:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cinco de pronóstico (T5). Dominio 2.....	68
<b>Tabla 28:</b> Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cinco de pronóstico (T5). Dominio 3.....	68
<b>Tabla 29:</b> Resultados de validación de los modelos empíricos para el tiempo de pronóstico dos (T2) y para los tres dominios (D1, D2, D3) .....	70
<b>Tabla 30:</b> Resultados de validación de los modelos empíricos para el tiempo de pronóstico tres (T3) y para los tres dominios (D1, D2, D3). .....	71
<b>Tabla 31:</b> Resultados de validación de los modelos empíricos para el tiempo de pronóstico cuatro (T4) y para los tres dominios (D1 y D2).....	72
<b>Tabla 32.</b> Resultados de validación de los modelos empíricos para el tiempo de pronóstico cinco (T5) y para los tres dominios (D1 y D2) .....	72
<b>Tabla 33:</b> Resultados de la regresión del modelo de producción de la papa .....	74
<b>Tabla 34:</b> Rendimiento promedio del cultivo de papa en años normales y con presencia de heladas agronómicas .....	75
<b>Tabla 35:</b> Matriz de Payoff para la producción del cultivo de papa, bajo la ocurrencia de más de 50 heladas agronómicas durante las campañas agrícolas .....	76

**Tabla 36:** Tabla de contingencia de las ecuaciones empíricas en el pronóstico de temperaturas mínimas por debajo de 5.8 °C (heladas agronómicas para el cultivo de papa) .....77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Termómetro de máxima y mínima; El termómetro inferior es el de mínima y siempre se instala en forma horizontal. ....	5
<b>Figura 2:</b> Temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones en la costa de Ancash. ....	6
<b>Figura 3:</b> Temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones en la región Yunga de Ancash. ....	6
<b>Figura 4:</b> Temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones en la región Quechua de Ancash. ....	7
<b>Figura 5:</b> Temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones en la región Suni del Ancash. ....	7
<b>Figura 6:</b> Temperaturas extremas y precipitaciones en la región Puna de Ancash. ....	8
<b>Figura 7:</b> Tipos de heladas. ....	9
<b>Figura 8:</b> Distribución altitudinal de los cultivos en relación a las regiones naturales. .	13
<b>Figura 9:</b> Fases fenológicas de la Papa.....	13
<b>Figura 10:</b> Fases fenológicas del maíz amiláceo. ....	14
<b>Figura 11:</b> Requerimientos climáticos de la Papa. ....	15
<b>Figura 12:</b> Requerimientos climáticos del maíz amiláceo. ....	15
<b>Figura 13:</b> Diferencia entre la componente Inestable asociada al tiempo meteorológico y componente estables que hace referencia al clima. ....	16
<b>Figura 14:</b> Representación gráfica del Modelo BRAMS. ....	20
<b>Figura 15:</b> Zona de estudio y estaciones meteorológicas. ....	33
<b>Figura 16:</b> Mapa de Clasificación Climática de Ancash. ....	34
<b>Figura 17:</b> Dominios utilizados en el modelo regional BRAMS. Dominio1 (D1), Dominio 2 (D2) y dominio 3 (D3).....	39
<b>Figura 18:</b> Esquema de tratamiento de datos en el modelo BRAMS. ....	40
<b>Figura 19:</b> Correlación positiva, negativa y nula de Pearson. ....	42
<b>Figura 20:</b> Serie de tiempo de temperatura mínima diaria. Estación meteorológica Huarmey (a), Buena Vista (b), Malvas (c), Pomabamba (d), Recuay (e) y Santiago Atunes de Mayolo (f).....	58
<b>Figura 21:</b> Coeficiente de correlación de Pearson entre la temperatura mínima pronosticada y registrada, en cada estación y en los cuatro tiempos de pronóstico (T2, T3, T4 y T5). (a) dominio 1, (b) dominio 2 y (c) dominio 3. ....	60

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO 1:</b> Scrip desarrollado en Grads para extraer las temperaturas del aire en cada punto de estación y por cada dominio del modelo BRAMS .....	85
<b>ANEXO 2:</b> Ejemplo de extracción del cuarto día de pronóstico para los tres dominios. Script en lenguaje de programación R para la estación meteorológica de Pomabamba .....	87
<b>ANEXO 3:</b> Tabla de valores críticos de coeficiente de correlación de Pearson.....	89
<b>ANEXO 4:</b> Resultados de la regresión lineal múltiple en la ecuación de producción del cultivo de papa, a nivel de confianza del 95 por ciento.....	90
<b>ANEXO 5:</b> Resultados de la regresión lineal múltiple en la ecuación de producción del cultivo de maíz amiláceo, aun nivel de confianza del 95 por ciento .....	91

## RESUMEN

En esta investigación se determinó modelos empíricos de pronóstico de temperaturas mínimas de 6 estaciones de la Región Ancash, las cuales son: Chiquian, Malvas, Cabana, Santiago Atunes de Mayolo, Buena Vista y Huarney; se llegó a este resultado haciendo un comparativo de las temperaturas mínimas registradas y pronosticadas (modelo BRAMS) en cada punto de estación durante las campañas agrícolas 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016, posteriormente se aplicó técnicas estadísticas, como la correlación lineal de Pearson con un grado de significancia del 90 y 95 por ciento, regresión lineal simple para obtener las ecuaciones empíricas de pronóstico y para aceptar las constantes  $A \neq B \neq 0$  se realizó la prueba de Fisher a un nivel de confianza del 95 por ciento. La validación de las ecuaciones empíricas de pronóstico se realizó analizándose los datos observados de temperatura mínima y las temperaturas mínimas pronosticados por las ecuaciones empíricas durante la campaña agrícola 2016/2017 usándose el error medio (ME o BIAS) y el error cuadrático medio (RMSE), llegándose a aceptar las ecuaciones de los diferentes tiempos de pronósticos (T2, T3, T4 y T5) de las siguientes estaciones: Malvas resulto significativo en el los 4 tiempos de pronóstico (T2, T3, T4 y T5); asimismo las estaciones de Chamana y Chiquian resultaron significativos en el tiempo 2 (T2), mientras que Santiago Atunes de Mayolo en tiempo 2 y 3 (T2, T3), Huarney en Tiempo 2 y 5 y Buena Vista en el tiempo 4 y 5. Estos modelos empíricos, fueron usados en la predicción de temperaturas mínimas y así poder evaluar las temperaturas críticas de los cultivos de papa y maíz amiláceo. Adicionalmente a esto, se hizo la valorización económica del pronóstico de temperaturas mínimas por debajo de 5.8 °C (en al caso de la papa) y por debajo de 7.6 °C (para el maíz amiláceo) utilizando el modelo “Cost-Loss”; para ello se relacionó mediante una regresión lineal múltiple, el rendimiento (Kg/ha) del cultivo con las variable de temperatura, precipitación y heladas agronómicas; esta relación solo fue significativa al 97 por ciento para el cultivo de papa (bajo la ocurrencia de más de 50 heladas agronómicas) más no para el de maíz amiláceo; es por eso que solo se continuó con la evaluación para el cultivo de papa, encontrándose un cuadro de Playoff (toma de decisiones) que nos indica lo siguiente: si un agricultor no toma ninguna acción preventiva ante la ocurrencia de más de 50 heladas agronómicas se perderá 1550 kg por cada hectárea que siembre; en caso se tomase las acciones preventivas perderá en

promedio 1033.6 kilogramos por hectárea. Una vez que se obtuvo la información del cuadro de decisión se procedió a evaluar la campaña agrícola 2016/2017 encontrándose que la ecuación empírica de pronóstico de la estación Malvas (estación representativa para la región Ancash), pronóstico 9 episodios de temperaturas mínimas por debajo de los 5.3 °C, los cuales fueron insuficientes para valorar económicamente el pronóstico durante esa campaña. Cabe mencionar que año 2017 estuvimos bajo un escenario del Niño Costero, por lo que las temperatura nocturnas fueron altas.

**Palabras clave.** Modelo empírico, temperaturas mínimas, heladas agronómicas, modelo Brams, valorización económica, Cost – Loss, rendimiento del cultivo.

## ABSTRACT

In this research has determined empirical models of minimum temperatures forecasts of six station meteorology in Ancash region, which are: Chiquian, Malvas, Cabana, Santiago de Atunes de Mayolo, Buena Vista y Huarney; This result was obtained by comparing the minimum temperatures recorded and forecasted (BRAMS model) at each station point during the 2013/2014, 2014/2015 and 2015/2016 agricultural campaign. Subsequently implemented statistical techniques, such as Pearson's linear correlation with a degree of significance of 90 and 95 percent, simple linear regression to obtain the empirical prediction equations and to accept the constants  $A \neq B \neq 0$  Fisher's test was performed at a confidence level of 95 percent. Validation of the empirical forecasting equations was performed by analyzing the observed minimum temperature data and the minimum temperatures forecasted by the empirical equations during the 2016/2017 agricultural campaign, using the mean error (ME or BIAS) and the mean square error (RMSE), coming to accept the equations of the different forecast times (T2, T3, T4 and T5) of the following stations: Malvas was significant in the 4 forecast times (T2, T3, T4 and T5); also the Chamana and Chiquian stations were significant at time 2 (T2), while Santiago Atunes de Mayolo at time 2 and 3 (T2, T3), Huarney at Time 2 and 5 and Buena Vista at time 4 and 5. These empirical models, were used in the prediction of minimum temperatures and thus to be able to evaluate the critical temperatures of the potato and corn crops. In addition to this, economic valuation was made of the forecast of minimum temperatures below  $5.8^{\circ}\text{C}$  (in the case of potatoes) and below  $7.6^{\circ}\text{C}$  (for starchy corn) using the " Cost-Loss " model; for this, the yield (Kg / ha) of the crop was related by means of a multiple linear regression with the variables of temperature, precipitation and agronomic frosts; this relationship was only significant at 97 percent for the potato crop (under the occurrence of more than 50 agronomic frosts) but not for the starchy corn; that is why we only continued with the evaluation for the potato crop, finding a Playoff table (decision making) that tells us the following: if a farmer does not take any preventive action before the occurrence of more than 50 agronomic frosts, you will lose 1550 kg for each hectare you sow; in case preventive actions are taken, it will lose on average 1033.6 kilograms per hectare. Once the information in the decision table was obtained, the 2016/2017 agricultural campaign was evaluated, finding that the empirical forecast equation of the Malvas station (representative station for the Ancash

region), forecast 9 episodes of minimum temperatures below 5.3 °C, which were insufficient to economically assess the forecast during that campaign. It is worth mentioning that year 2017 we were under a scenario of the Coastal Child, so the night temperatures were high.

**Keywords:** Empirical model, minimum temperatures, agronomic frosts, Brams model , economic valorization, Cost – Loss, crop yield.

## I. INTRODUCCIÓN

El Perú, climáticamente es uno de los 10 países mega-diversos del mundo. Según SENAMHI (1988) tiene 27 climas, asimismo, los eventos extremos como las heladas, friajes, sequias y olas de calor son más frecuentes e intensos (IPCC, 2013), afectando así a las actividades económicas; entre ellas tenemos a la agricultura, el cual involucra 31 por ciento de la PEA (población económicamente activa) nacional y 65 por ciento de la PEA rural, generando divisas por un valor de U.S. \$1,800 millones (8 por ciento de PBI); por otro lado estudios como el de Argüello (2009), menciona que en cada campaña agrícola se pierde más de 15,000 hectáreas por efectos climáticos. En consecuencia, instituciones como el MINAM, SENAMHI, INRENA, IRD, IGP y COSUDE, indican que el cambio climático producirá una mayor inseguridad alimentaria en el Perú.

La presente investigación se desarrolló en Ancash, región que abarca tanto la costa y la sierra; en ambas regiones naturales se destaca la actividad agrícola. La costa se especializa principalmente por cultivar productos para la exportación (caña de azúcar, espárragos, arándanos, etc.), mientras que, la población andina destina su producción al autoconsumo y a los mercados locales. Entre los cultivos principales que se tiene en la sierra de Ancash son la papa y el maíz amiláceo y estos son mayormente afectados por los eventos de heladas, causándose pérdidas de producción de hasta 53,8 por ciento si la helada sucede en la fase fenológica de la floración de la papa (Fairlie y Ortega, 1995). Las bajas temperaturas son el factor más limitante en la distribución natural de las plantas, de modo que las heladas tempranas u otoñales pueden ser especialmente significativas, si el desarrollo de los cultivos es retardado por condiciones climáticas (Hernández, 1992). El daño causado a las plantas es debido a que entre las células de los vegetales existe agua.

Torres (1995) señala que hay indicios que temperaturas por encima de los 0 °C y menores a 7 °C, pueden causar pérdidas en la producción de los cultivos, pero este depende del tipo de planta y la cantidad de agua que contengan en el protoplasma. Por lo mencionado, no solo es importante conocer el comportamiento o variabilidad de las heladas sobre ciertas regiones; sino también poder predecirlas, con el propósito de poder minimizar los daños en el rendimiento del cultivo.

Con el propósito de poder predecir los eventos meteorológicos se han desarrollado una gran cantidad de modelos de pronóstico del tiempo, tales como WRF (Weather Research and Forecasting, por sus siglas en inglés) del National Centers for Environmental Prediction (NCEP/NACAR), ETA del Ncep y BRAMS (Brazilian Regional Atmospheric Modeling System, por sus siglas en inglés). Estos modelos de pronóstico son los más utilizados en América Latina; debido a que tienen una gran versatilidad al momento de ingresar la base de datos (etapa de pre-procesamiento) y requieren una menor capacidad computacional que otros modelos. Hoy en día las facilidades computacionales y la gama de modelos nos permiten conocer las condiciones meteorológicas a tiempo real; permitiéndonos saber la ocurrencia de eventos meteorológicos con días e incluso meses de anticipación.

La creación de los modelos de pronósticos, se ha llevado a cabo en países del hemisferio norte como Estados Unidos, Inglaterra, Francia y España, etc. Por lo que, los modelos más usados están creados bajo el supuesto de otras realidades climáticas y/o meteorológicas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones el presente trabajo tiene como objetivo “determinar modelos empíricos que utilicen datos de temperatura mínima provenientes del modelo BRAMS. Con el propósito de pronosticar las temperaturas mínimas en la región Ancash y evaluar económicamente el pronóstico de heladas agronómicas en la campaña agrícola 2016/2017 para los cultivos de la papa y maíz amiláceo”, planteándose los siguientes objetivos específicos (i) determinar modelos empíricos de pronóstico de las temperaturas mínimas y (ii) valorización económica del pronóstico de heladas en la producción de papa y maíz amiláceo de la campaña agrícola 2016/2017.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DEL PERÚ

El Perú está ubicado en la zona tropical de América de Sur, entre la línea ecuatorial y el trópico de capricornio, colindando con Colombia y Ecuador por el norte, por el este con Brasil y Bolivia y por el sur con Chile. El país debería de tener un clima netamente tropical (abundantes lluvias en verano y deficientes en invierno), empero los factores geográficos y/o climáticos hacen que posea una diversidad de climas, desde áridos hasta lluviosos.

- a. **La cordillera de los Andes**, que se encuentra atravesando el país longitudinalmente (paralela a la costa peruana) de sur a norte, con altitudes que sobrepasan los 5500 m, es una barrera climática que dificulta el paso de flujos húmedos del Atlántico hacia el Pacífico, generando grandes precipitaciones en la vertiente oriental.
- b. **Corriente Peruana**, Es una corriente de aguas frías que se desplaza de sur a norte, tiene aproximadamente 200 km de ancho, su principal aporte al clima radica en la estabilidad atmosférica que se genera al mantener temperaturas bajas en los estratos superficiales en plena zona tropical, debido al afloramiento de aguas profundas que a su vez influye en la persistencia de inversión térmica a lo largo del año y escasas de lluvias en la costa, a excepción de la costa norte que suele llover en verano.
- c. **Anticiclón del Pacífico Sur (APS)**, Es un centro de alta presión, que crea una circulación de masas de aire contrarias a las agujas del reloj y ejerce mayor influencia en los meses de abril a septiembre, debido que se encuentra

aproximadamente a 27 °S de latitud y 100 °W de longitud, posición que favorece al transporte de masas de aire con alto contenido de humedad hacia las costas peruanas, que al ser enfriadas por la corriente peruana originan neblinas que se acumulan en la costa centro y sur.

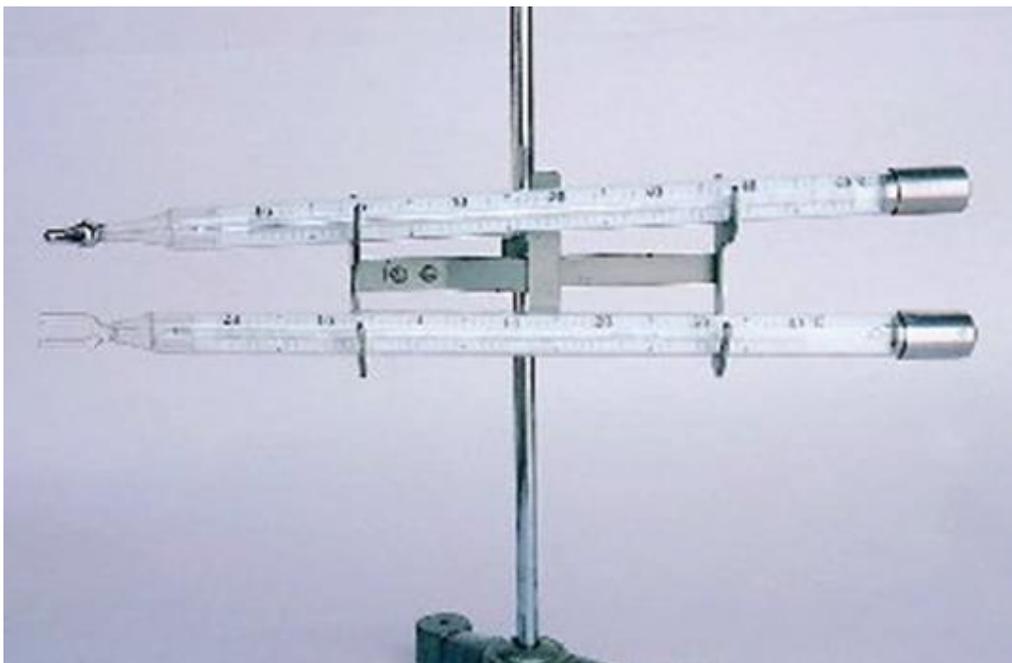
- d. **Baja del Chaco (BCH)**, Centro de baja presión que se ubica entre el noroeste de Argentina y Paraguay (alrededor de 62 °W y 24 °S), y favorece la inestabilidad atmosférica y el desarrollo de convección y lluvias en la región, particularmente, en la zona de ceja de selva. También, genera perturbaciones y lluvias en los Andes centrales y sur, incluyendo el Altiplano Peruano-Boliviano (IGP, 2005). Cabe recalcar, que está presente en los meses de verano, y en invierno se encuentra ausente.
  
- e. **Alta de Bolivia (AB)**, Es un sistema de alta presión que se localiza aproximadamente a 12 km de altura, con coordenadas de 66 °W y 17 °S. Su principal contribución se manifiesta al hacer converger sobre Perú y otros países de la región, la inestabilidad y humedad necesaria para la generación de precipitación, Asimismo alimenta a la baja del chaco y solo se presenta en los meses de verano.
  
- f. **Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)**, Es una banda nubosa donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte y sur. Su principal contribución se debe al desarrollo de lluvias en la estación de verano sobre la región norte del país.

## 2.2. TEMPERATURA MÍNIMA

La temperatura mínima absoluta, es la temperatura más baja registrada en un intervalo de tiempo (OMM, 1992).

Desde el punto de vista agronómico y climático es importante obtener los datos de temperatura mínima y esta se obtiene haciendo uso del termómetro de mínima. Este

Termómetro de mínima (Figura 1) usa como elemento sensible el alcohol y un índice de dos centímetros de longitud (el cual está inmerso en el alcohol). Los bulbos de los termómetros de mínima son en forma de “U” con el fin de almacenar mayor cantidad de líquido térmico debido a su densidad. Cuando la temperatura baja, el alcohol arrastra el índice, porque no puede atravesar el menisco y se ve forzado a seguir su recorrido de retroceso (SENAMHI, 2010). Cuando la temperatura sube, el líquido pasa fácilmente entre la pared del tubo y el índice marca la temperatura más baja por el extremo más alejado del bulbo.

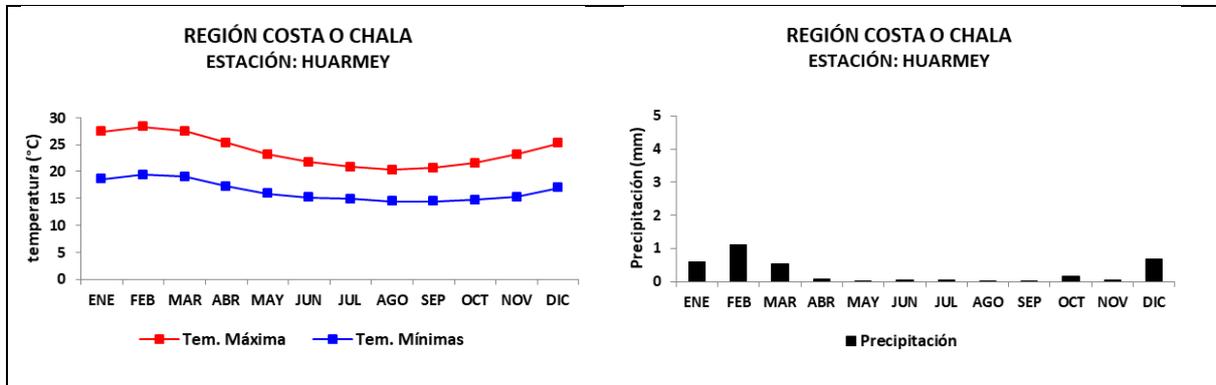


**Figura 1: Termómetro de máxima y mínima; El termómetro inferior es el de mínima y siempre se instala en forma horizontal.**

### **2.2.1. Comportamiento de la temperatura mínima en la Región de Ancash**

Ancash es una región de contrastes geográficos, va desde el desierto costero, pasando por los valles interandinos (callejón de Huaylas y de Conchucos), llegando a las cumbres nevadas de la cordillera Blanca. Presentándose temperaturas altas en la parte más baja y las temperaturas más bajas en las cumbres nevadas.

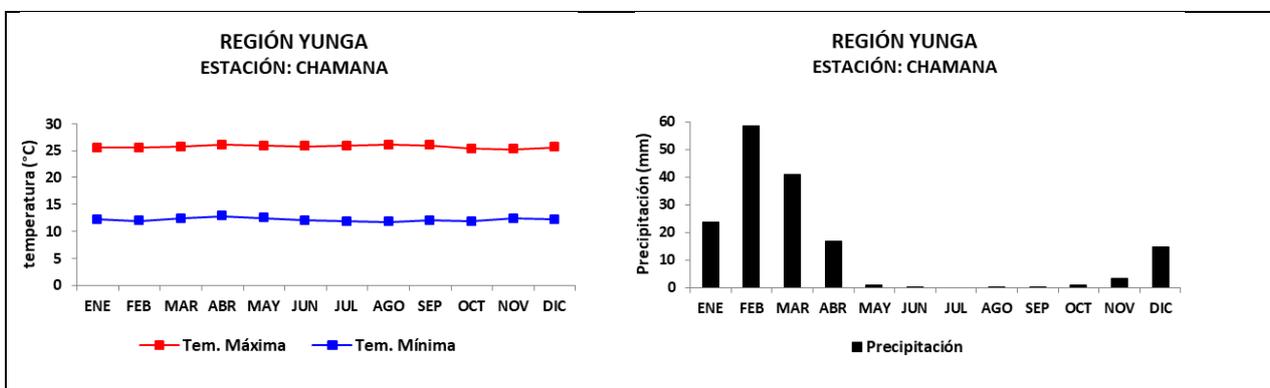
**La costa o región Chala;** que se ubica entre los 0 y 500 msnm, presenta un relieve llano, la cual se caracteriza por tener escasas lluvias, llegándose a registrar acumulados anuales de 15 mm y las temperaturas máximas oscilan de 28 °C en verano a 20 °C en invierno (Ver Figura 2).



**Figura 2: Temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones en la costa de Ancash.**

FUENTE: SENAMHI.

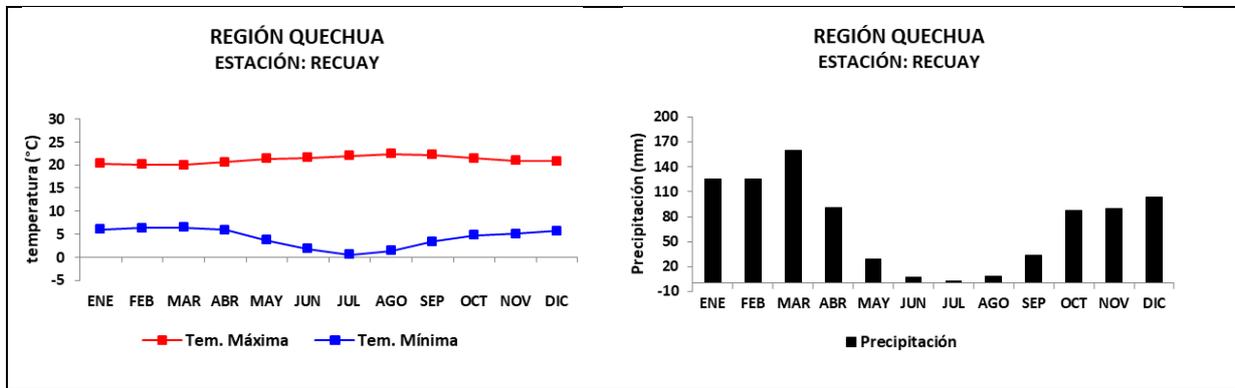
**La región Yunga;** se ubica entre los 500 y 2300 msnm, presenta un relieve accidentado con quebradas profundas y valles estrechos, su clima es seco, templado y cálido con temperaturas diurnas en promedio de 25 °C y temperaturas nocturnas 12 °C y con precipitaciones anuales de 200 mm. (Ver Figura 3).



**Figura 3: Temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones en la región Yunga de Ancash.**

FUENTE: SENAMHI.

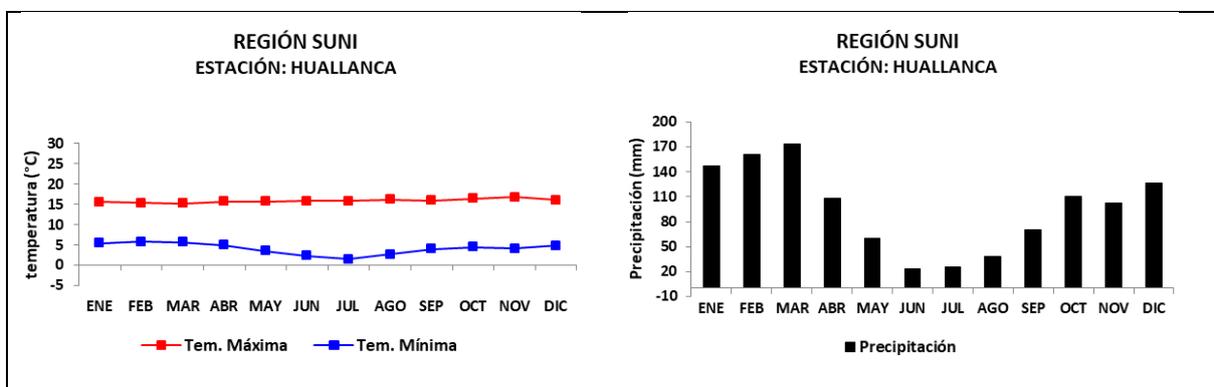
**Región quechua;** esta zona se ubica por encima de los 2300 msnm y por debajo de los 3500 msnm, presenta un clima templado y semicalido. Las temperaturas oscilan entre 20 °C a 23 °C durante el día y presenta una cumulado anual de 800 mm de lluvia. (Ver Figura 4).



**Figura 4: Temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones en la región Quechua de Ancash.**

FUENTE: SENAMHI.

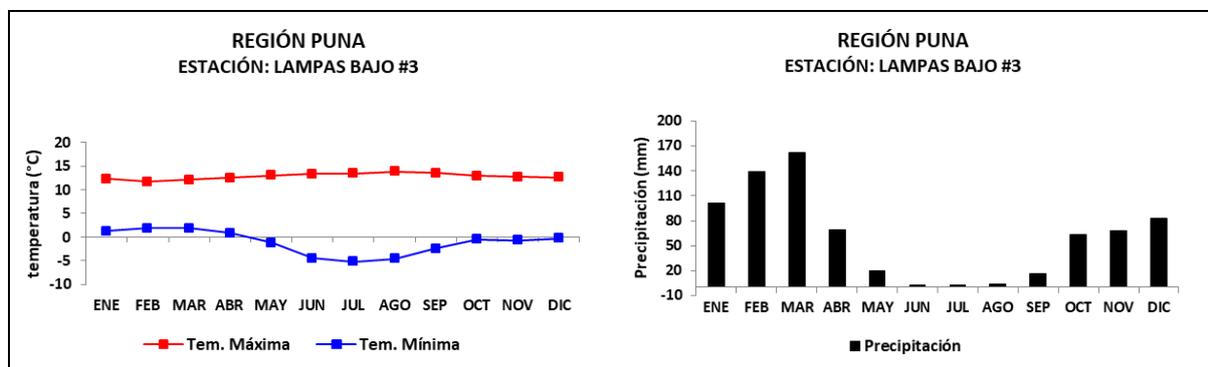
**Región suni;** esta zona se ubica entre las cotas de 3500 a 4000 msnm, presenta un relieve accidentado y rocoso y un clima templado y frío. Las temperaturas son en promedio de 15.5 °C durante el día y durante la noche desciende a 4 °C, presenta una cumulado anual de 1200 mm de lluvia. (Ver Figura 5).



**Figura 5: Temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones en la región Suni del Ancash.**

FUENTE: SENAMHI.

**Región puna o jalca;** esta zona se ubica entre las cotas de 4000 a 4800 msnm, su topografía está conformada por las mesetas y presenta un clima seco y semifrío. Las temperaturas son en promedio de 12.5 °C durante el día y durante la noche desciende -1.0 °C, presenta una acumulado anual de 900 mm de lluvia. (Ver Figura 6).



**Figura 6: Temperaturas extremas y precipitaciones en la región Puna de Ancash.**

FUENTE: SENAMHI.

**Región janca o cordillera;** esta zona se ubica por encima de los 4800 msnm, su topografía es muy accidentada con presencia de nieves perpetuas en la cima de los cerros; presenta un clima glacial y muy frío.

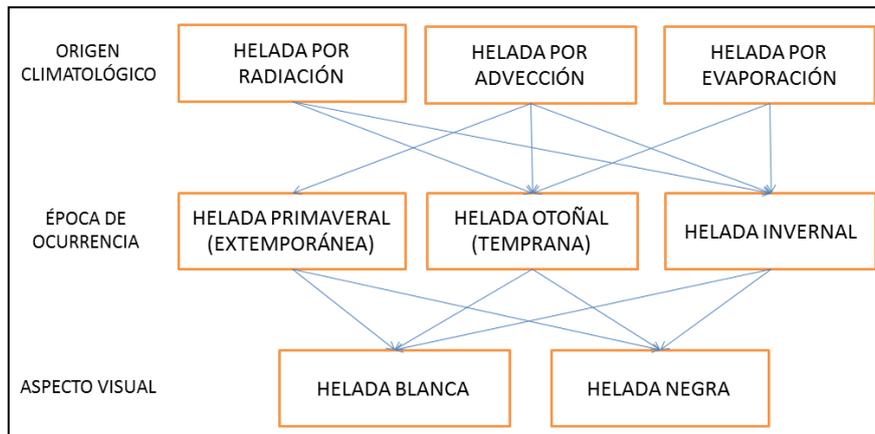
### 2.3. DEFINICIÓN DE HELADAS

Existen varias definiciones de helada, se puede decir que una helada meteorológica ocurre cuando la temperatura del aire cercano a la superficie del terreno disminuye a 0 °C o menos, durante un tiempo mayor a cuatro horas (Fuentes, 2000). En cambio un enfoque agro-meteorológico define a la helada como un descenso de la temperatura ambiente a niveles críticos de los cultivos que mata los tejidos vegetales (Campos, 2005).

#### 2.3.1. Clasificación de heladas

Según SENAMHI (2010); Pereyra *et al.* (1990); Elías y Castellvi (2001); Campos (2005) y Matías *et al.* (2007), las heladas se pueden clasificar desde los puntos de vista de origen en heladas por advección, por radiación y por evaporación. De acuerdo a la

época de ocurrencia se clasifican en primaverales, otoñales e invernales y según el aspecto visual se denominan como helada blanca y helada negra (Pereyra, 1990; Pereyra *et al.*, 2002; Matías *et al.* 2007) (Ver Figura 7).



**Figura 7: Tipos de heladas.**

FUENTE: Matías *et al.* (2007)

**a. Por su génesis:**

- **Heladas por radiación**

Este tipo de heladas se presenta asociada al dominio de un anticiclón estacionario con baja concentración de vapor de agua, el cual estabiliza la masa de aire cercana a la superficie terrestre, permitiendo la pérdida de calor durante la noche en forma de ondas largas (energía que no puede ser absorbida por los animales ni las plantas) (Hernandes, 1994) situación que genera una inversión térmica en superficie, es decir la temperatura aumenta con la altura. Este fenómeno suele ocurrir en valles y zonas áridas (por su bajo porcentaje de humedad).

- **Heladas por advección**

Se produce como consecuencia de la invasión de grandes masas de aire frío polar hacia continente. La entrada de estas masas provoca Olas de Frío (friaje en la amazonia del Perú) y generalmente suelen llegar acompañados de vientos fuertes (velocidades mayores a 15 km/h), que a su vez generan nubosidad y

posteriormente precipitaciones. Cabe resaltar que puede ocurrir en cualquier momento del día, es decir es independiente al estado del cielo.

Este evento puede producir heladas agronómicas y daños cuantiosos en los cultivos de la zona afectada. Asimismo mencionar que este fenómeno según Marengo *et al.*; citado por Huamani (2007), es más común entre los meses de mayo a septiembre.

- **Heladas por evaporación**

“Se produce cuando un frente frío o un descenso marcado de las temperaturas origina una condensación importante del vapor de agua atmosférico en forma de rocío provocando una reducción notable de la humedad relativa. Pasado este frío, al restablecerse las temperaturas normales, se producirá un gradiente de tensión de vapor muy fuerte entre las superficies vegetales cubiertas de agua y la atmósfera que se ha desecado. El calor necesario para vaporizar es sustraído de la superficie los vegetales provocando su enfriamiento” (Hernandes, 1994). La intensidad de estas heladas depende de la cantidad de agua que se evapora, de la temperatura del aire y de la humedad relativa

**b. Por la época de ocurrencia:**

- **Heladas primaverales**

Estas heladas suelen perjudicar a los cultivos de ciclo anual. Se presentan cuando en el ambiente se genera un descenso de temperatura.

- **Heladas otoñales**

Son llamadas heladas tempranas, porque están relacionas a la llegada de las primeras masas de aire frío de origen polar a nuestro país. Asimismo, este tipo de heladas afecta grandemente a los cultivos ya que muchos de estos se encuentran en el estado fenológico de floración.

- **Heladas invernales**

Durante la estación de invierno, el contraste térmico suele ser mayor presentándose caídas bruscas de la temperatura del aire durante las noches y por consiguiente la frecuencia e intensidad de heladas meteorológicas y agronómicas son mayores.

- c. **Por su aspecto visual:**

El contenido de humedad de la atmósfera y del cultivo determina el tipo de helada.

- **Helada blanca**

Después de ciertas noches calmas y despejadas, el césped y plantas bajas presentan una cubierta blanca, constituida por partículas de hielo de apariencia cristalina. Se produce cuando un intenso enfriamiento nocturno produce condensación de vapor de agua y su congelamiento sobre las plantas (Elías y Castellvi, 2001).

- **Helada negra**

Ocurre cuando el aire está excesivamente seco (casi nada de contenido de humedad) y la temperatura del aire no iguala a la de rocío que está por debajo de 0 °C (no hay condensación) (SENAMHI, 2010), esto genera el enfriamiento acentuado de la vegetación hasta alcanzar la temperatura letal. Cabe mencionar que la baja humedad en el aire no permite la condensación ni la formación de hielo en la superficie de la planta.

### **2.3.2. Efecto de las heladas en la agricultura**

La susceptibilidad de los cultivos agrícolas a las bajas temperaturas varía mucho respecto al especie o estadio fenológico en la que se encuentre. En la Tabla 1 se muestra algunos ejemplos de temperatura crítica de diversos cultivos de la región Andina.

**Tabla 1: Temperatura crítica de cultivos andinos en diferentes estadios fenológicos**

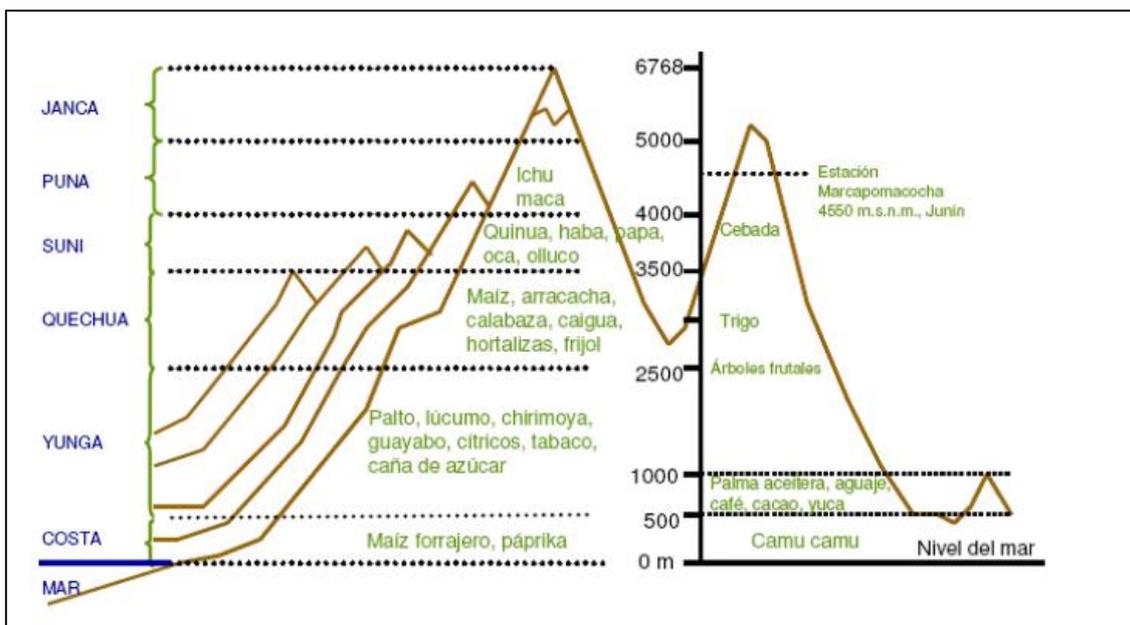
Cultivo	Germinación	Floración/espigamiento	Maduración
Frejol	< 8°C	< 8°C	< 12°C
Trigo	< 5°C	< 12°C	< 12°C
Quinoa	< 3°C	< 3°C	< 3°C
Papa	< 5°C	< 6°C	< 5°C
Maíz amiláceo	< 10°C	< 7°C	< 7°C

FUENTE: SENAMHI *et. al.* (2012)

### 2.3.3. Cultivo de papa

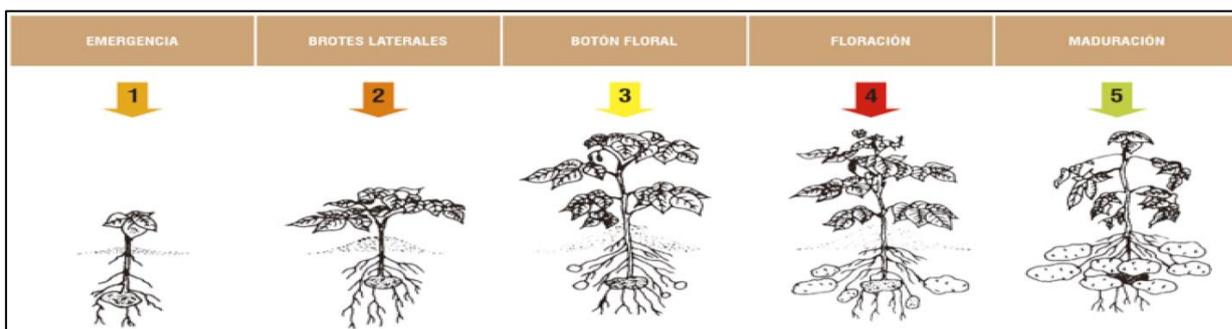
Papa, cuyo nombre científico es *Solanum tuberosum L.* se produce entre los 3500-4200 msnm (Vidal, 1996). Es un cultivo de días cortos, por ende, el brillo solar requerido se encuentra alrededor de 10-12 horas por día; y según en la fase fenológica que se encuentre presenta temperaturas críticas y óptimas. El período vegetativo es de 100 a 200 días.

Cabe mencionar, que todas las etapas fenológicas (Ver figura 9 y 10) son afectadas por las bajas temperaturas, sin embargo, si la helada meteorológica (descenso de temperatura menores o iguales a 0 °C) o agronómica (descenso de temperatura igual o por debajo de la temperatura crítica) ocurre en la etapa de floración, la cosecha se verá afectada severamente en un 53,8 por ciento (Fairlie y Ortega, 1995). Esto se debe a que en paralelo a la etapa de floración, se desarrolla la tuberización, fase importante en la producción de la planta y dependerá de la velocidad de llenado del tubérculo. “si en ese momento ocurre un daño por helada la interrupción del flujo de carbohidratos hacia los tubérculos será total”.



**Figura 8: Distribución altitudinal de los cultivos en relación a las regiones naturales.**

FUENTE: Pulgar Vidal (1996); Huamani (2005), citado por SENAMHI (2010).



**Figura 9: Fases fenológicas de la Papa.**

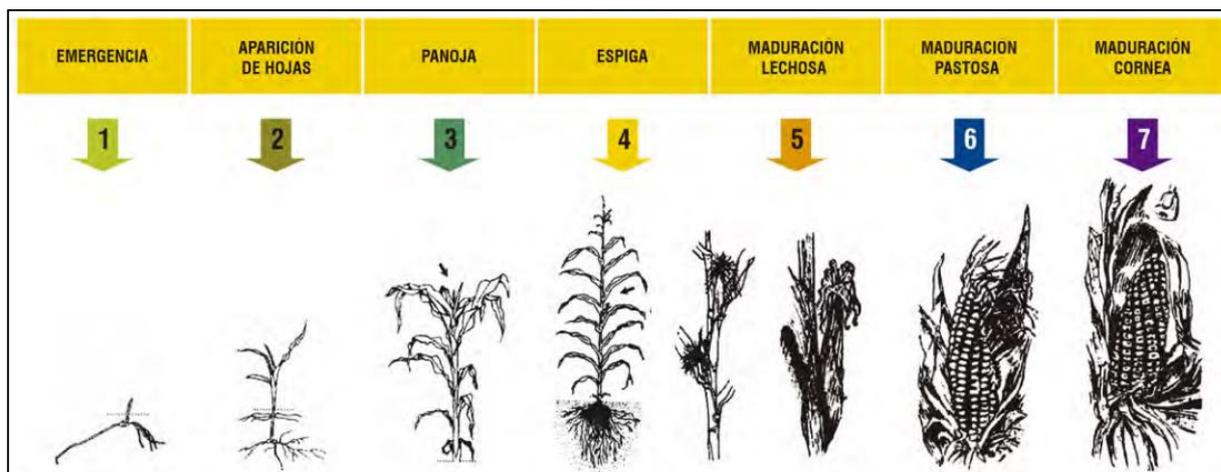
FUENTE: SENAMHI (2012).

### 2.3.4. Cultivo de maíz amiláceo

El nombre científico del maíz es *Zea mays L.*, se cultiva en las regiones naturales de Yunga, Quechua y Suni (entre los 1500 a 3800 m.s.n.m) y su periodo vegetativo es de 190 a 225 días, esto depende de la variedad.

Los requerimientos agroclimáticos que presenta son diferentes en cada fase fenológica (Ver Figura 11 y 12); presentando temperaturas críticas menores a 10 °C para la fase de

germinación y emergencia; menores a 6 °C en el desarrollo de hojas y menores a 7 °C en pajonamiento, espigamiento y maduración.



**Figura 10: Fases fenológicas del maíz amiláceo.**

FUENTE: SENAMHI (2012).

Periodo Fenológico	Crecimiento vegetativo							crecimiento reproductivo		Maduración	
	Parte aérea	Brotamiento	Emergencia (1)	Brotos laterales (2)	Botón floral (3)	Floración (4)	Maduración de bayas (5)	senescencia			
parte radicular	Formación de raíces y tallos	desarrollo y crecimiento de raíces		Emisión y crecimiento de estolones		crecimiento y llenado de estolones		Maduración del tubérculo			
Ocurrencia de la fase (dds)		15-20	25-35	60-70		80-95		100-120			
*Variedad precoz		20-25	35-45	75-		100-120		130-150			
* variedad semitardia		25-30	45-55	90		135-150		180-200			
* Variedad tardía				95-105							
Temperatura Óptima	17°C a 25°C	17°C a 25°C	15°C a 25°C	15°C a 25°C		15°C a 25°C		14°C a 20°C			
Temperatura Crítica	< 5°C a 30°C >	< 5°C a 30°C >	< 6°C a 30°C >	< 6°C a 30°C >		< 6°C a 30°C >		< 5°C a 28°C >			
Humedad Óptima	60% - 80%	60% - 80%	60% - 80%	60% - 80%		60% - 80%		60% - 80%			
Déficit Hídrico	sensible	sensible	sensible	60% - 80%		sensible		Tolerante			

dds: días después de la siembra

**Figura 11: Requerimientos climáticos de la Papa.**

FUENTE: SENAMHI (2012).

Periodo Fenológico	Crecimiento vegetativo					crecimiento reproductivo		Maduración		
	Parte aérea	Germinación	Emergencia (1)	Brotos laterales (2)	Pajonamiento (3)	Espigamiento (4)	maduración lechoso (5)	Maduración pastoso (6)	Maduración Cornea (7)	Senescencia
parte radicular		brotación de raíces	Desarrollo y crecimiento de raíces							
Ocurrencia de la fase (dds)		10 - 15	90 -100	100 - 115	115 - 135	135 - 160	160 - 190	190 - 225		
Temperatura Óptima	15°C a 25°C	15°C a 25°C	15°C a 25°C	15°C a 21°C	15°C a 25°C	15°C a 20°C	15°C a 20°C	15°C a 20°C		
Temperatura Crítica	< 10°C a 30°C >	< 10°C a 30°C >	< 6°C a 30°C >	< 7°C a 30°C >	< 7°C a 30°C >	< 7°C a 30°C >	< 7°C a 30°C >	< 7°C a 30°C >		
Humedad Óptima	60% - 80%	60% - 80%	60% - 80%	60% - 80%	60% - 80%	60% - 80%	60% - 80%	60% - 80%		
Déficit Hídrico	sensible	sensible	sensible	sensible	sensible	Tolerante	Tolerante	Tolerante		

dds: días después de la siembra

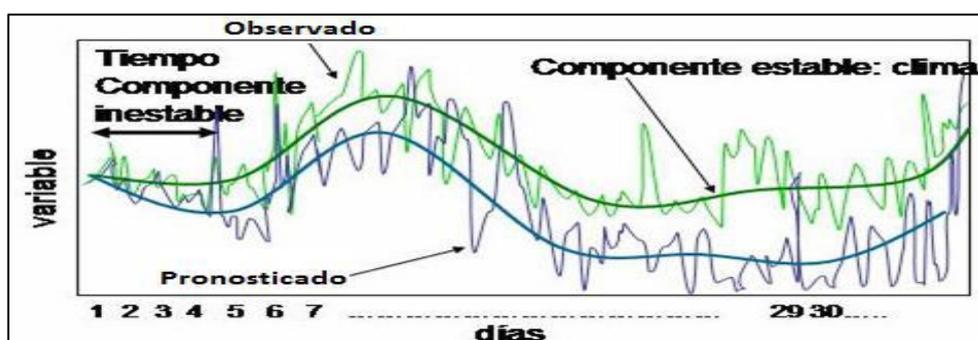
**Figura 12: Requerimientos climáticos del maíz amiláceo.**

FUENTE: SENAMHI (2012).

## 2.4. PREDICCIÓN NUMÉRICA EN EL TIEMPO

Las actividades económicas y nuestra vida en sí, están relacionadas a los acontecimientos atmosféricos, debido a esto se ha hecho un gran esfuerzo desde el siglo pasado para poder comprender y explicar la ocurrencia de los fenómenos meteorológicos. Durante el siglo XX, se ha impulsado la predicción numérica del tiempo, desarrollándose los modelos numéricos de predicción, que al día de hoy son una gran herramienta para estudiar los fenómenos meteorológicos y su relación de estos con la dinámica de la atmósfera.

Al hablar de pronosticar el tiempo meteorológico, se piensa en el “estado momentáneo de la atmósfera. Sin embargo, para que este pronóstico sea de utilidad es necesario ampliar este concepto tal como lo planteo Edward Lorenz quien dijo “tiempo es lo que usted tiene, mientras que clima es lo que usted espera”. “Una forma de explicar la diferencia entre clima y tiempo meteorológico, es considerar una ecuación de pronóstico e integrarla en el tiempo para mostrar las variaciones al momento de ser integrada” (López, 2012); los cambios que sufra en el tiempo y espacio se pueden expresar en dos componentes una que será estable y otra inestable, la componente estable de la ecuación corresponderá al clima mientras que la componente inestable podemos referirla al tiempo de pronóstico. Debido, a que el error de la componente inestable se incrementa en el tiempo y durante el periodo de cinco a siete días, este error es mínimo, no se puede pronosticar más allá de ese periodo; aun teniéndose modelos bien elaborados y datos de entrada perfectos la habilidad es muy baja para pronósticos de una semana a más.



**Figura 13: Diferencia entre la componente Inestable asociada al tiempo meteorológico y componente estables que hace referencia al clima.**

FUENTE: Landa *et al.*; citado por López (2012).

Conocer el estado verdadero de la atmósfera es imposible, aunque contáramos con instrumentos sofisticados, debido a que la cobertura espacial no permite obtener información, más en nuestro territorio que es tan empinado por presentar como barrera a la cordillera de los Andes; viendo estos mismos inconvenientes de cobertura espacial, los centros meteorológicos del hemisferio norte han desarrollado nuevas tecnologías y algoritmos para conocer el estado del tiempo y su comportamiento en los próximos días, y esto sumado al avance tecnológico que se viene desarrollando desde la segunda guerra mundial respecto a la información satelital, radiosondeos, información de estaciones de superficie, etc., han llevado a tener una buena aproximación de las condiciones iniciales de la atmósfera; sin embargo, tener las mejores condiciones iniciales no es un indicador que nuestro pronóstico sea el mejor, debido a que, este proceso depende de otros elementos como las parametrizaciones de los procesos que no pueden ser resueltos por el modelo numérico, otros factores son los métodos numéricos que se elige para resolver las ecuaciones del pronóstico y resolución espacial. Finalmente lo mencionado, dependerá de las decisiones que se tome respecto al conocimiento que se tenga de la física y dinámica atmosférica de la zona que se desea pronosticar.

#### **2.4.1. Modelos de predicción numérica**

Los modelos de predicción numérica de tiempo, se definen como un “conjunto de instrucciones ejecutadas en un equipo de cómputo (programa), el cual resuelve las ecuaciones de pronóstico mediante técnicas numéricas para generar una aproximación de estado de la atmósfera” (López, 2012).

Los modelos de predicción numérica, con la cual se obtiene un pronóstico objetivo del estado futuro de la atmósfera, consta de una serie de ecuaciones que describen la evolución de las variables como la temperatura, humedad, presión, velocidad y dirección de viento; y estos a su vez describen el estado de la atmósfera; debido a lo mencionado, todos los modelos numéricos de predicción del tiempo se basan en el mismo grupo de ecuaciones (advección, conservación de masa, hidrostática, termodinámica, de estado y de vapor de agua) que gobiernan la atmósfera (López, 2004).

## **2.4.2. Tipos de modelos según escala espacial**

Los modelos numéricos atmosféricos, se han clasificado en base a la escala temporal y espacial que poseen y entre ellos tenemos a:

### **a. Modelos globales**

Permiten tener aproximaciones de procesos importantes que ocurren en la atmósfera a nivel global y a escalas de tiempos diversos, su resolución espacial es de cientos de kilómetros y en sus corridas del modelo se consideran los procesos de mayor influencia en la circulación del planeta, basándose en tres componentes principales; (1) dinámico, ecuaciones de movimiento (transporte de masas a gran escala y vapor de agua); (2) físico, flujo de energía (transferencia de radiación, balance de agua en la atmósfera y balance de energía termodinámica); y (3) otros procesos de superficie (topografía, albedo, humedad de suelo, cobertura vegetal, etc.). El objetivo principal de ejecutar estos modelos es obtener pronósticos a mediano plazo, estacionales y climáticos.

### **b. Modelos regionales**

Son modelos a escalas locales, surgieron por la necesidad de contar con información meteorológica más detallada en las regiones. Se caracteriza por presentar condiciones de frontera bien definidas tanto en dirección vertical como horizontal. Los modelos regionales tienen que considerar parametrizaciones que incluyan los procesos de formación de nubes o la dinámica de la capa límite planetario; por ello cada vez que se desee generar pronósticos más locales, se tiene que incluir la mayor cantidad de procesos físicos, que expliquen la dinámica de la zona de interés.

## **2.5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO REGIONAL BRAMS**

El Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS, por sus siglas en inglés), es un proyecto meteorológico desarrollado por investigadores brasileños, a través de un proyecto conjunto de ATMET, IME / USP, IAG / USP y CPTEC / INPE,

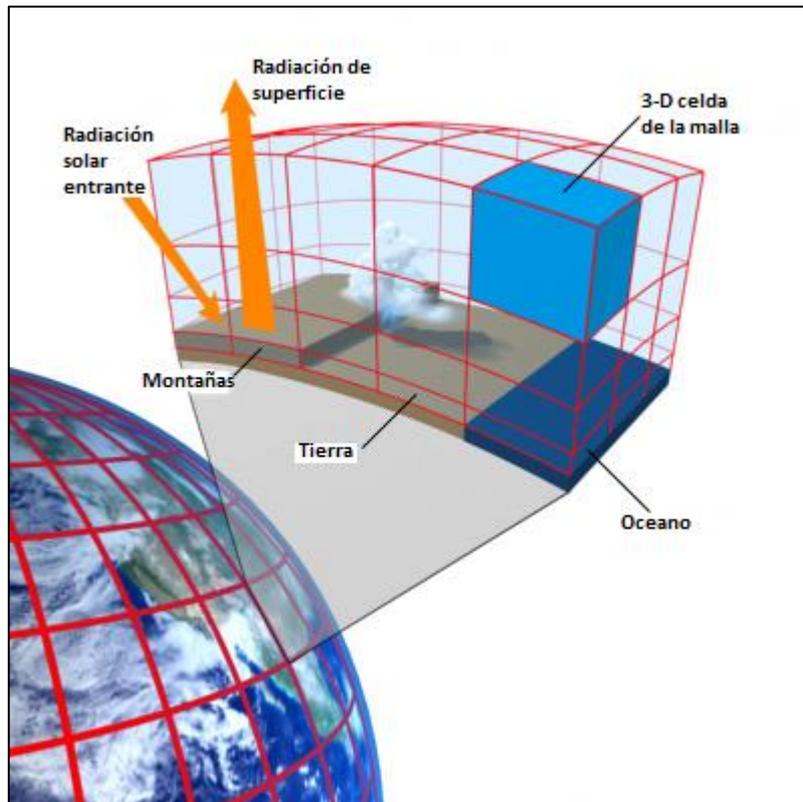
financiado por FINEP (Agencia de Financiamiento de Brasil), con el objetivo de producir una nueva versión de RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) adaptado a los trópicos. Cabe mencionar que el modelo RAMS surgió de la unión de tres modelos existentes en la universidad de Colorado: el modelo de Nuvens/mesoescala, una versión hidrostática del modelo Nuvens y modelo de Brisa Maritima descrita por Mahret y Pielke (1977) (Rubio *et al.*, 2014).

El BRAMS es un modelo de predicción numérica del tiempo, desarrollado para simular circulaciones atmosféricas y es utilizado frecuentemente en la simulación de fenómenos de mesoescala (escalas horizontales de 2 a 2000 km), es un modelo versátil, ya que se adapta a otras escalas requeridas por el investigador y utiliza como datos de entrada los datos de Reanálisis de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y modelos globales (ETTA, GFS, WRF) y datos de pronóstico. (Brazilian Regional Atmospheric Modeling System) (Delgado, 2011).

### **2.5.1. Estructura del modelo BRAMS**

La proyección utilizada es la estereográfica, este tipo de proyección disminuye las distorsiones de la proyección del área de interés y Utiliza 9 niveles de suelo y 29 niveles verticales en la atmósfera. En la vertical es usado el sistema de coordenadas  $\sigma - z$ , en el cual la topografía del modelo es exactamente plana y la base sigue las ondulaciones del terreno. Cabe mencionar que, según Rubio *et al.* (2014) esta coordenada ( $\sigma z$ ) contempla los conceptos de topografía del terreno descrito por Gal-Chen y Somerville (1975); Clark (1977); Tripoli y Cotton (1982).

El modelo usa mallas con espacios variables entre los niveles verticales, es decir el espacio entre cada nivel va aumentando con la altura, siendo el de mayor resolución el próximo a superficie. Además, este modelo utiliza mallas anidadas de tal manera que se consigue obtener resoluciones espaciales más altas (Ver Figura 14).



**Figura 14: Representación gráfica del Modelo BRAMS.**

FUENTE: COMET (2010)

**a. Ecuaciones usadas en BRAMS**

Son aquellas ecuaciones para una atmósfera no hidrostática, el cual te permite describir procesos físicos donde la velocidad vertical es intensa. Todas las variables de estado incluyen la componente zonal ( $u$ ), meridional ( $v$ ) y vertical ( $w$ ), temperatura potencial ( $\theta$ ), razón de mixtura y función de Exner ( $\pi$ ). El modelo BRAMS resuelve numéricamente las ecuaciones gobernantes de la evolución de la atmósfera utilizando el procedimiento de Reynolds, que descompone una variable atmosférica  $\alpha(x, t)$  en una parte media  $\bar{\alpha}(x, t)$  y una parte turbulenta  $\alpha'(x, t)$ .

$$\alpha(x, t) = \bar{\alpha}(x, t) + \alpha'(x, t) \dots \dots \dots (1)$$

De esta manera la evolución de la atmósfera es representada por un nuevo conjunto de ecuaciones que se expresa en términos medios y turbulentos.

Las ecuaciones del modelo BRAMS son descritas a continuación.

**b. Ecuación de estado**

Los gases a diferencia de los líquidos y sólidos no ocupan un volumen definido, ya que estos se moldean fácilmente y por tener poca interacción entre sí, no hay mucha influencia entre ellos es por eso que la ecuación de estado postula un modelo ideal (para gases ideales que cumplen la ley de Boyle y Charles) que consiste en masas rígidas con movimientos independientes.

$$p = \rho r_d T_V \dots\dots\dots (2)$$

Dónde

$p$  : Es la presión atmosférica

$r_d$ : Es la constante termodinámica del aire seco.

$T_V$ : Es la temperatura virtual del aire.

**c. Ecuación de continuidad**

Todos los cuerpos poseen masa, es por eso que la conservación de masa es un principio fundamental ya que no se destruye solo se transforma y este postulado se expresa en la ecuación de continuidad.

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right) + \nabla * (\rho \vec{v}) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

Dónde

$\nabla$ : Divergencia

$v$ : es la velocidad

**d. Ecuación navier-stokes**

Esta ecuación describe el movimiento de un fluido como las que gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y cualquier fluido que involucre fluidos Newtonianos.

Estas ecuaciones pueden ser representadas así:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \underbrace{-u_j \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)}_I - \underbrace{\delta_i g}_II - \underbrace{\epsilon_{ijk} f_j u_k}_III - \underbrace{\Theta \frac{\partial \pi'}{\partial x_i}}_IV - \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial w_j u_i}{\partial x-j}}_VI \dots\dots\dots (4)$$

Dónde:

I: representa el término de almacenamiento.

II: describe la advección.

III: describe la acción de gravedad.

IV: describe la influencia de la rotación de la tierra (efecto Coriolis).

V: describe las fuerzas de gradiente de presión.

VI: representa la divergencia del flujo turbulento.

#### e. Ecuación termodinámica

Esta ecuación plantea la conservación de la energía (primera ley de la termodinámica), ya que el cambio de energía dentro de un sistema es igual a la transferencia neta de la energía a través de las capas del sistema, es decir la energía no se crea ni se destruye.

Desde un punto vista netamente físico, esta ecuación indica “la tasa de calentamiento por unidad de masa debido a la radiación, conducción o convección es igual a la suma del cambio de energía por unidad de masa y el trabajo efectuado por unidad de tiempo por el sistema de fluido” (Avalos, 2006).

$$\frac{\partial q}{\partial t} = C_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + p \left( \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right) \dots\dots\dots (5)$$

Dónde:

$C_v$ : Calor específico del aire a volumen constante

$p$ : Presión

$\alpha$ : Volumen específico

## 2.6. VALORIZACIÓN ECONÓMICA DEL PRONÓSTICO DEL TIEMPO

Los estudios realizados por el IPCC (2007), evidencian la gran variabilidad del clima por efectos del calentamiento global, teniendo como eje principal a la agricultura por ser el sector económico más sensible a estos cambios meteorológicos debido a su importancia en la vida cotidiana. Por otro lado en su alocución, el Dr. Jung (director

ejecutivo del Centro de Clima del Foro de Cooperación Económica del Asia-Pacífico (APCC), 2016) destacó el impacto del clima en la seguridad alimentaria del planeta. Mencionó que, de acuerdo al Banco Mundial, el mundo requerirá producir un 50 por ciento más de alimentos para dar de comer a los nueve billones de personas que poblarán la Tierra en 2050. Así mismo, remarcó que el clima puede reducir la cantidad de cosechas en el mundo hasta un 25 por ciento; lo cual amenaza la seguridad alimentaria a escala global.

Por otro lado, estudios de rendimiento de cultivo realizados en Estados Unidos tal como el de Schelenker y Robertts (2006) muestran la importancia de las variables climáticas como la temperatura mínima y máxima en el desarrollo de las plantas; asimismo, este estudio encontró una alta relación entre la temperatura y el rendimiento de cultivo; por ejemplo, el cultivo de maíz por encima de 29 °C incrementa su rendimiento y por debajo de 7 °C disminuye, estos resultados obtuvieron una alta significancia estadística, lo cual nos lleva a pensar que el modelo puede ser utilizado en otros cultivos.

Otro antecedente, que se tiene es el estudio realizado por Loyola y Origuela (2010) en la región de Lambayeque, el cual muestra una ecuación no lineal que relaciona las temperaturas, precipitación, área cosechada y precio del cultivo para hallar el aumento o decremento de la producción de los cultivos, bajo escenarios climáticos estipulados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

De allí la justificación para explicar los esfuerzos que se hacen actualmente para predecir el tiempo, información que brinda el pronóstico con respecto a la incertidumbre de la atmósfera en la ocurrencia de eventos meteorológicos severos o/y atípicos como las heladas, olas de calor, ENSO, entre otros; y como esta información ayuda a los tomadores de decisiones (Gobiernos regionales, exportadores, agricultores, ganaderos, etc.) a tomar acciones para evitar las pérdidas económicas.

El modelo Cost – Loss, es ampliamente utilizado para valorar económicamente la información meteorológica. Estudios recientes como de Quiroga *et al.* (2011), aplican esta metodología; relacionando las variables climáticas con el rendimiento del cultivo,

para proporcionar una evaluación del valor económico de la información meteorológica o climática para la gestión de los riesgos bajo un escenario de cambio climático.

### 2.6.1 Método del Cost – Loss

La metodología plantea que el tomador de la decisión (Gobiernos regionales, exportadores, agricultores, ganaderos, etc.) debe elegir una de dos alternativas ante un tiempo incierto dicotómico (si/no ocurre), ya que hay dos acciones y resultados posibles, pero su acción protectora involucra un costo (C), al margen si ocurre o no ocurre el evento meteorológico adverso y su no acción protectora genera una pérdida (L) si ocurre el evento adverso. Su pérdida sería igual a cero si el evento adverso no ocurre y tampoco se tomó alguna previsión (Ver Tabla 2).

**Tabla 2: Matriz de Payoff: costos y pérdidas para diferentes resultados en el modelo de cost/Loss.**

Acción tomada	Ocurrencia del evento	
	Adverso	
	Si	No
Si	C ó (- $\gamma$ L)	C ó (- $\gamma$ L)
No	L ó (-L)	L ó (-L)

Ahora, con fines de establecer la línea de base para el valor económico, supongamos que el estado del tiempo es el único factor que influye en la toma de decisiones. Para esto se consideró que inicialmente no se cuenta con un servicio de pronóstico; así que las únicas decisiones fueron siempre o nunca proteger. Si el tomador de decisión siempre protege, el costo será C en todas las ocasiones, por lo que el gasto medio será:

$$E_{always} = C \dots\dots\dots (6)$$

Por otro lado, si no se toman medidas, habrá algunas ocasiones sin gastos y en otras ocasiones la pérdida será L, entonces el gasto medio es dada por:

$$E_{never} = sL \dots\dots\dots (7)$$

Donde s es la fracción de ocasiones en que se produjo el evento.

En general,  $E_{always}$  y  $E_{never}$  nunca son iguales y para minimizar las pérdidas el tomador de decisiones debe elegir la estrategia que genere menos gastos. La estrategia óptima es tomar siempre medidas protectoras si  $E_{always} < E_{never}$  y nunca se toman medidas de protección en caso  $E_{always} > E_{never}$ . Y finalmente para una estrategia óptima, el gasto medio es:

$$E_{climate} = \min(C, sL) \dots\dots\dots (8)$$

Esto se refiere al gasto climático, porque el usuario necesita conocer la probabilidad climatológica del evento ( $s$ ) con el fin de saber si se protegerá ( $s > \frac{C}{L}$ ) o no se protegerá ( $s < \frac{C}{L}$ ), entonces el tomador de decisiones necesitaría tomar medidas sólo cuando el evento se va a producir. El gasto medio sería entonces:

$$E_{perfect} = Cs \dots\dots\dots (9)$$

El objetivo de utilizar la información de predicción (pronósticos del tiempo) es reducir de manera óptima el gasto generada por el clima ( $E_{climate}$ ) hacia  $E_{perfect} = Cs$ . Sin embargo, el gasto medio nunca puede ser completamente reducido de cero a menos que no se tome la acción preventiva.

El valor ( $V$ ) de un sistema de pronóstico se puede definir como la reducción del gasto medio relativo a la reducción que se obtendría por tener acceso a predicciones perfectas:

$$V = \frac{E_{climate} - E_{forecast}}{E_{climate} - E_{perfect}} \dots\dots\dots (10)$$

Un valor máximo se obtendrá para los sistemas que estén perfectamente pronosticados y cuando  $V > 0$ , el tomador de decisiones ganará un beneficio económico mediante el uso de la información de los pronósticos.

**a. Valor de un pronóstico determinístico binario**

El sistema de predicción determinística binaria, informa si el evento ocurrirá o no y el valor de este tipo de previsiones sobre el conjunto de eventos anteriores puede evaluarse utilizando los recuentos de los eventos en una la tabla de

contingencia acumulada a lo largo del tiempo (Ver Tabla 3).

**Tabla 3: Tabla de contingencia considerando solo un evento**

		Eventos observados		total
		sí	no	
Eventos pronosticados	sí	<b>a</b> "aciertos"	<b>b</b> "falsas alarmas"	<b>a+b</b> "eventos pronosticados"
	no	<b>c</b> "desaciertos"	<b>d</b> "eventos no ocurridos"	<b>c+d</b> "eventos no pronosticados"
total		<b>a+c=ns</b> "eventos observados"	<b>b+d =n*(1-s)</b> "eventos no observados"	<b>a+b+c+d= n</b> "número total de eventos"

La media de la muestra de gastos utilizando las previsiones se obtiene fácilmente multiplicando los gastos de la Tabla 2 por las frecuencias relativas correspondientes en Tabla 3.

$$E_{forecast} = \frac{a}{n}C + \frac{b}{n}C + \frac{c}{n}C \dots\dots\dots (11)$$

Es conveniente expresar estos gastos en términos de probabilidades: tasa de éxito  $H=a/(a+c)$ , tasa de falsas alarmas  $F=b/(b+d)$  y tasa básica  $s=(a+c)/n$ .

$$E_{forecast} = F(1 - s)C - Hs(L - C) + sL \dots\dots\dots (12)$$

Sustituyendo en la ecuación (13), entonces la expresión para el valor relativo de los pronósticos es:

$$V = \frac{\min(\alpha,s)-F(1-s)\alpha-Hs(L-\alpha)+s}{\min(\alpha,s)-s\alpha} \dots\dots\dots (13)$$

Dónde  $\alpha=C/L$  es la relación costo / pérdida del usuario específico. La ecuación 16 muestra que el valor depende no sólo de la calidad del sistema (H y F), sino

también en el tipo de base observada del evento (s) y la relación coste / pérdida del usuario ( $\alpha$ ). Sin embargo, es sólo la relación coste / pérdida que es importante en lugar de los valores individuales de C y L. Además, tenemos que considerar que no habría ningún punto en la adopción de medidas de protección si el costo C es mayor que el potencial de pérdida de L, sólo tenemos que considerar la gama  $0 < C/L < 1$ .

Para determinar el máximo valor de la expresión de valor relativo de los pronósticos (V) en la ecuación (16) es Cuando  $\alpha < s$ , permitiendo que se convierte en.

$$V = (1 - F) - \left(\frac{s}{1-s}\right)\left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)(1 - H) \dots\dots\dots(14)$$

Y así el valor aumenta para incrementar la relación costo / pérdida. Cuando  $\alpha > s$ , se tiene.

$$V = H - \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\left(\frac{1-s}{s}\right)F \dots\dots\dots(15)$$

El valor disminuye por el aumento de la relación costo / pérdida. Por lo tanto, el máximo valor siempre ocurrirá cuando  $\alpha = s$  (es decir, cuando la relación coste / pérdida es igual a la tasa básica). En este punto, el gasto de tomar una de las opciones climatológicas (siempre o nunca proteger) es el mismo: la climatología no ayuda al tomador de decisiones y la previsión ofrece el mayor beneficio.

El valor máximo que se obtiene mediante la sustitución  $\alpha=s$  en la ecuación (16) se da por.

$$V_{max} = H - F \dots\dots\dots(16)$$

## 2.6.2 Medidas recomendadas de protección ante las heladas

Las técnicas de protección contra las heladas normalmente se dividen en métodos directos o indirectos; o en métodos pasivos y activos. Los métodos pasivos son los que actúan en términos de prevención, son normalmente para un periodo prolongado y es

beneficioso cuando se producen los eventos de heladas; mientras que los métodos activos son temporales y requieren instantáneamente energía y trabajo, incluyendo estufas, aspersores y máquinas de viento que son usadas durante las noches de helada para reemplazar las pérdidas de energía natural (Ver Tabla 4).

**Tabla 4: Categorías y subcategorías para los métodos de protección contra heladas**

CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	METODOS DE PROTECCIÓN
<b>Pasiva</b>	<b>Biológica (evitación o resistencia)</b>	Inducción de resistencia a la congelación sin modificar la genética de las plantas
		Tratamiento de las semillas con agroquímicos
		Selección de plantas y mejora genética
		Selección de especies por el momento de desarrollo fenológico
		Selección de fechas de plantación para cultivos anuales una vez la probabilidad de helada en primavera ha disminuido
		Reguladores del crecimiento y otras sustancias químicas
	<b>Ecológica</b>	Selección de emplazamiento para cultivar
		Modificación del paisaje y microclima
		Control del estado nutritivo
		Manejo del suelo
<b>Activa</b>	<b>Coberturas y Radiación</b>	Materiales orgánicos
		Coberturas con soporte
		Coberturas sin soporte
	<b>Agua</b>	Aspersores sobre las plantas
		Aspersores bajo las plantas
		Micro-aspersores
		Riego por superficie
		Niebla artificial
	<b>Estufas</b>	Combustible sólido
		Combustible líquido
		Propano
	<b>Máquinas de viento</b>	Horizontal
		Vertical
		Helicópteros
	<b>Combinaciones</b>	Ventiladores y estufas
		Ventiladores y agua

FUENTE: FAO (2010)

Los daños de las heladas son menores en terrenos que está rodeado por grandes masas de agua o si la masa de tierra está expuesta para donde sopla el viento.

Actualmente, no se cuenta con mucha información del riesgo de daño por heladas, no hay un seguimiento local del evento; sin embargo muchos lugareños de la zona de estudio tienen una idea acertada sobre la localización de las zonas frías en su localidad. Finalmente, antes de sembrar un cultivo sensible a las bajas temperaturas se recomienda indagar a los vecinos sobre las condiciones de tiempo de la zona; generalmente, deben evitarse las zonas bajas, donde el aire frío se embalsa, hay que evitar también la topografía natural o modificada que impide el drenaje del aire frío desde el emplazamiento (donde se forma rápidamente la niebla). Si se está pensando en sembrar varias hectáreas y/o toneladas se debería revisar bien la topografía de la zona. Otro punto importante es el calendario agronómico; generalmente en Ancash para los cultivos de papa y maíz se da la siembra de septiembre a noviembre y la cosecha entre febrero a mayo (MINAGRI, 2016); y como es natural en esta temporada la región alto andina presenta temperatura por encima de los cero grados (puede bajar por debajo de 0 °C si hay algún evento extremo), sin embargo, cada cultivo tiene temperaturas óptimas en cada fase fenológica (Ver Figuras del 9 al 12) las cuales indican un buen rendimiento del cultivo.

**Tabla 5: Calendario de siembra en porcentaje para el departamento de Ancash**

Producto/Mes	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Algodón	25.5	10.0	6.9	0.4		5.6	4.1	4.9	3.2	2.9	18.8	17.7
Arroz cáscara		8.3	18.7	32.5	25.1	13.4	0.6	1.4				
Cebada grano		0.1	0.4	0.4	15.4	44.6	29.6	8.3	1.0	0.1	0.1	
Frijol grano seco	4.7	6.2	6.9	8.8	6.8	8.6	12.5	15.8	13.2	7.3	4.3	4.9
Maíz amarillo duro	5.5	5.4	4.9	5.0	5.7	8.9	16.7	14.4	12.3	9.2	6.3	5.7
Maíz amiláceo	9.5	13.7	19.5	25.8	18.9	6.6	2.1	1.1	0.4	0.5	0.6	1.3
Olluco	9.4	21.0	20.2	12.8	7.3	8.8	6.4	2.6	4.4	3.3	1.3	2.5
Papa	11.1	17.4	23.3	17.2	8.2	4.4	3.4	2.2	2.8	2.9	3.1	4.0
Trigo			0.3	0.8	15.6	44.2	25.9	8.6	0.8	2.2	1.6	

mayor porcentaje de área sembrada
  menor porcentaje de área sembrada
  porcentaje muy bajo de área sembrada

FUENTE: MINAGRI (2016)

**Tabla 6: Calendario de cosechas en porcentaje para el departamento de Ancash**

Producto/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Algodón	8.9	13.5	19.2	12.7	9.1	6.9	2.7	3.6	4.6	8.1	6.7	4.0
Arroz cáscara		11.9	25.4	19.3	21.3	13.3	7.4	1.4				
Caña de Azúcar	7.1	6.8	7.0	9.3	7.9	8.7	9.9	9.2	8.3	8.5	8.5	8.8
Cebada grano			0.4	0.3	1.4	20.9	62.2	12.6	1.8	0.4		
Frijol grano seco	4.0	4.2	6.5	7.7	11.7	19.3	13.8	11.7	6.1	5.4	5.4	4.2
Maíz amarillo duro	7.0	4.9	6.4	6.4	7.6	11.6	13.2	12.5	9.3	8.5	7.4	5.2
Maíz amiláceo	2.0	4.9	9.9	13.2	19.9	31.6	12.2	4.0	0.4	0.4	0.2	1.3
Olluco	0.6	3.7	10.1	21.6	27.2	20.6	5.6	1.5	1.9	3.4	2.0	1.8
Papa	7.0	13.0	18.8	19.5	15.7	8.6	3.0	2.8	2.7	3.3	2.6	3.0
Trigo			0.1	0.4	4.5	30.4	40.9	17.7	2.4	2.8	0.7	0.1

mayor porcentaje de área cosechada
  menor porcentaje de área cosechada
  porcentaje muy bajo de área cosechada

FUENTE: MINAGRI (2016)

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. MATERIALES**

##### **3.1.1 Descripción de la zona de estudio**

El departamento de Ancash, situado en la región central – occidental del país, cubre una superficie de 35948, 32 Km<sup>2</sup>, que representa el 2,8 por ciento del territorio nacional. Comprende territorios tanto de las zonas altas de la Cordillera de los Andes como parte del desierto costero peruano. Limita con el océano Pacífico por el oeste, La Libertad, por el norte, Huánuco por el este y Lima por el sur. Está políticamente dividido en 20 provincias y 166 distritos, siendo la ciudad de Huaraz su capital.

El territorio comprende espacios geográficos de costa y sierra (aproximadamente el 72 por ciento de su territorio es andino). Presenta una altura que oscila entre los 4 m.s.n.m. (distrito Chimbote-Provincia Santa) y los 3 910 m.s.n.m. (distrito Shilla-Provincia Carhuaz) (Ver Figura 15).

El departamento tiene una población de 1084 millones de habitantes (INEI, 2007), situándolo como el décimo más poblado del país (3,8 por ciento de la población nacional).

##### **a. Clasificación climática**

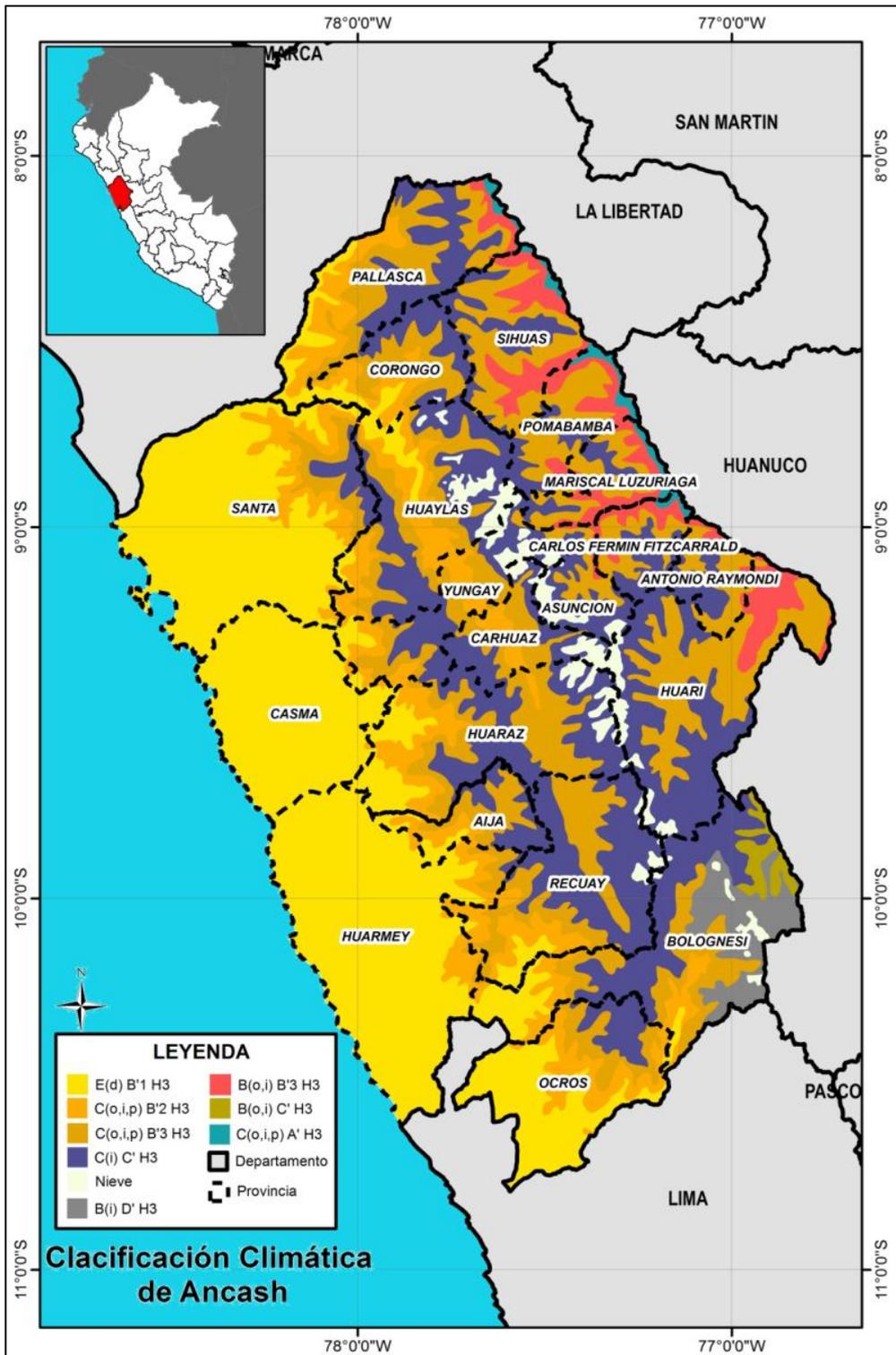
La zona de interés abarca parte de la costa y sierra central y según el mapa de clasificación climática por el método de Thornthwaite (SENAMHI, 1988), esta región presenta los siguientes climas (Ver Figura 16).

- **E(d)B'1 H3:** Clima de tipo árido, seco, semicálido, con deficiencia de lluvias en todo el año, y con alta humedad en el aire, debido a su proximidad al mar. Su temperatura anual es de 18 °C, reporta esporádicas lloviznas en invierno. Entre las provincias que poseen este tipo de clima tenemos a de Santa, Casma y Huarney.
- **C(o,i,p) B'2 H3 y C(o,i,p) B'3 H3:** Clima semiseco y templado, con deficiencia de lluvias en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda. Este tipo de clima corresponde a las localidades de la cuenca media de la vertiente occidental, entre los 500 y 2500 msnm, su temperatura promedio anual es de 17 °C.
- **C(i) C' H3:** clima de tipo semiseco, frío y abundantes lluvias en verano. Este tipo climático lo encontramos en las zonas altas de la cordillera negra y blanca entre en las provincias del callejón de Huaylas y en el callejón de Conchucos.

Estos son los cuatro principales climas que se presentan en la región de Ancash, asimismo, cabe indicar que por encima de la cota de 4500 m.s.n.m se tiene un clima frígido, propio de los glaciares de la cordillera blanca, donde dominan las temperaturas menores a 0 °C.



Figura 15: Zona de estudio y estaciones meteorológicas.



**Figura 16: Mapa de Clasificación Climática de Ancash.**

FUENTE: (SENAMHI, 1988).

## b. Actividad agrícola

Las tierras con nivel de uso en la región de Ancash ocupan aproximadamente 304 329 hectáreas (GORE Ancash, 2008), de las cuales el 84.7 por ciento están localizadas en la sierra y el 15.3 por ciento en la costa. Esta actividad se realiza en los fondos de los valles, laderas y terrazas y van hasta aproximadamente hasta 3700 msnm (Bolívar, 2012).

La producción agrícola regional se orienta fundamentalmente en dos rubros, el primero basado en la producción para consumo directo y el segundo en la de procesamiento agroindustrial; teniéndose en la actualidad en promedio 20 cultivos importantes entre los que destacan el arroz, maíz amarillo duro, algodón y la caña de azúcar en la Costa, y papa, maíz amiláceo, trigo, cebada, frijol y arveja en la Sierra.

**Tabla 7: Superficie cosechada de los cultivos más importantes de Ancash**

Cultivo	Superficie cosechada (ha*)	Porcentaje (%)
Maíz a. duro	12,014.50	13.6
Yuca	11,589.75	13.1
Cebada grano	10,922.00	12.4
Maíz amiláceo	10,398.00	11.8
Papa	5,480.50	6.2
Arroz cáscara	2,610.00	3.0
Arveja grano	2,421.50	2.7
Haba grano	2,415.00	2.7
Frijol gr. seco1/	2,213.00	2.5
Chocho Tarwi	718.00	0.8
Trigo	615.00	0.7
Soya	588.00	0.7
Olluco	487.00	0.6
Pallar	347.50	0.4
Kiwicha	300.00	0.3
Otros	25,066.53	28.4
<b>Total</b>	<b>88,186.73</b>	<b>100.0</b>

FUENTE: GORE Ancash (2008).

### 3.1.2. Datos observados

La información de temperaturas mínimas de la región Ancash, se obtuvo de las catorce estaciones meteorológicas de la red del servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI). Los datos que se utilizaron fueron desde el primero de setiembre al 28 de febrero de las campañas agrícolas 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 y 2016/2017. Se escogió este periodo, debido a que, en promedio, la campaña agrícola de la papa se da entre setiembre y febrero del próximo año (Ver Figuras 15 y Tabla 8).

**Tabla 8: Estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)**

Estación	Longitud (W)	Latitud (S)	Altitud (m)	Provincia	Distrito
Cabana	-78.0	-8.4	3160	Pallasca	Cabana
Sihuas	-77.7	-8.6	3375	Sihuas	Cashapampa
Pomabanba	-77.5	-8.8	3605	Pomabamba	Pomabanba
Yungay	-77.8	-9.1	2527	Yungay	Yungay
Buena Vista	-78.2	-9.4	216	Casma	Buena Vista Alta
Pariacoto	-77.9	-9.6	1260	Huaraz	Pariacoto
Cajamarquilla	-77.7	-9.6	3325	Huaraz	La Libertad
S. Atunes de Mayolo	-77.5	-9.5	3079	Huaraz	Independencia
Aija	-77.6	-9.8	3440	Aija	Aija
Recuay	-77.5	-9.7	3444	Recuay	Recuay
Huarmey	-78.2	-10.1	20	Huarmey	Huarmey
Malvas	-77.7	-9.9	3250	Huarmey	Malvas
Chamana	-77.6	-10.2	1221	Bolognesi	Antonio Raymondi
Chiquian	-77.2	-10.2	3381	Bolognesi	Chiquian

#### a. Datos de pronóstico

Los datos de pronóstico que se utilizaron fueron obtenidos de la página web del Centro de Pronóstico del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC, por sus siglas en portugués) y el rango de tiempo fue el mismo que se tomó para las estaciones meteorológicas (primero de setiembre al 28 de febrero de las campañas agrícolas 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 y 2016/2017).

## **b. Softwares**

- Sistema operativo Linux
- Modelo BRAMS 4.2
- Software gráfico: Grid Analysis and Display System (GrADS) y SIG
- Programas estadísticos: Excel y R Project.

## **3.2. MÉTODOS**

En las siguientes páginas se hace una descripción detallada del procedimiento realizado en la metodología para cumplir con los objetivos planteados en la presente investigación.

### **3.2.1. Determinación de los modelos empíricos de pronóstico**

#### **a. Ejecución del modelo regional BRAMS y determinación de las temperaturas pronosticadas**

Los datos que ingresaron al modelo BRAMS, se descargaron del modelo global del CPTEC, estos datos son generados cada 6 horas y están en formato grilla Gaussiana; sin embargo, los datos que ingresan al modelo tienen el formato grilla ASCII. Para ejecutar el modelo BRAMS se siguió los siguientes pasos. (Ver Figura 16).

- Como primer paso; se convirtió los datos de grilla gaussiana a grilla ASCII, ya que estos con los datos de entrada al modelo BRAMS (Archivos dps). Para esta conversión se ejecutó la orden: `/grib2dp.x > grib2dp.out` en la consola de Linux (Ver Figura 18).
- El segundo paso fue generar los archivos de superficie, las condiciones iniciales de la atmósfera y las condiciones de frontera al área del proyecto. Este paso se llevó a cabo editando el documento RAMSIN (etapa de pre-procesamiento), archivo que contiene información escrita en el lenguaje de programación

(Fortran) y, contiene especificaciones de ejecución relacionadas al tiempo, resolución, número de grillas, microfísica del modelo, topografía, parametrizaciones, entre otros (Fazenda, *et al.*, 2007). La secuencia de comandos que llevó a cabo dicho proceso fue:

- MAKESFC, fue el RUNTYPE establecido en documento RAMSIN; el cual implementó los archivos de superficie (topografía, temperatura superficial del mar y cobertura vegetal) para el área del proyecto, para esto se ejecutó en la consola de linux el siguiente comando:

```
./brams4.2-serial.x > sfc.out
```

- Como segundo ejecutable dentro de la etapa de pre-procesamiento se tuvo como RUNTYPE establecido a MAKEVFILE; el cual implementó las condiciones iniciales y de frontera, para esto se ejecutó en la consola el siguiente comando:

```
./brams4.2-serial.x>vfl.out
```

- Como tercer paso se ejecutó el modelo BRAMS, esto significa que durante la etapa de procesamiento se dio la simulación del tiempo desde el tiempo cero hasta lo estipulado en nuestro archivo RAMSIN. Cabe mencionar, que para este paso se ejecutó el siguiente comando:

```
./brams4.2-serial.x > ini.out &
```

- Finalmente, como cuarto paso se tuvo al post procesamiento, para lo cual se ingresó a la carpeta RAMSPOST60, donde se editó y guardó el archivo ramspost.inp. Una vez realizado este paso se prosiguió a ejecutar el comando `./ramspost60.x > rpost.out &`, el cual generó archivos en los 3 dominios de diferente resolución. Estos dominios se visualizaron en grads. (Ver Figura 18 y Tabla 9).

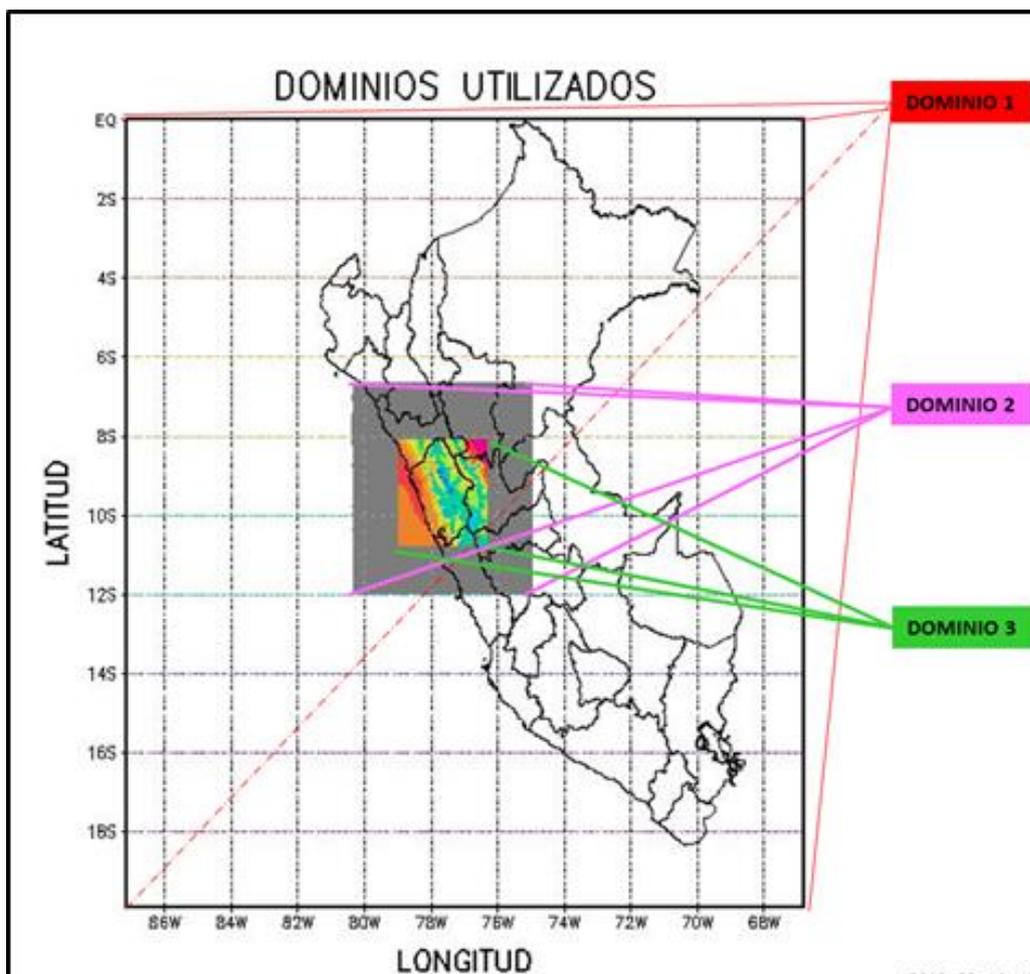


Figura 17: Dominios utilizados en el modelo regional BRAMS. Dominio1 (D1), Dominio 2 (D2) y dominio 3 (D3).

Tabla 9: Configuración de los dominios del modelo BRAMS

Grilla	NNXP	NNYP	NNZP	Resolución	CENTLAT	CENTLON	PROYECCIÓN DEL MAPA
1	32	32	32	72 km	-10	-77	Mercator
2	50	50	32	12 km	-9.4	-77.65	Mercator
3	98	98	32	3 km	-9.4	-77.65	Mercator

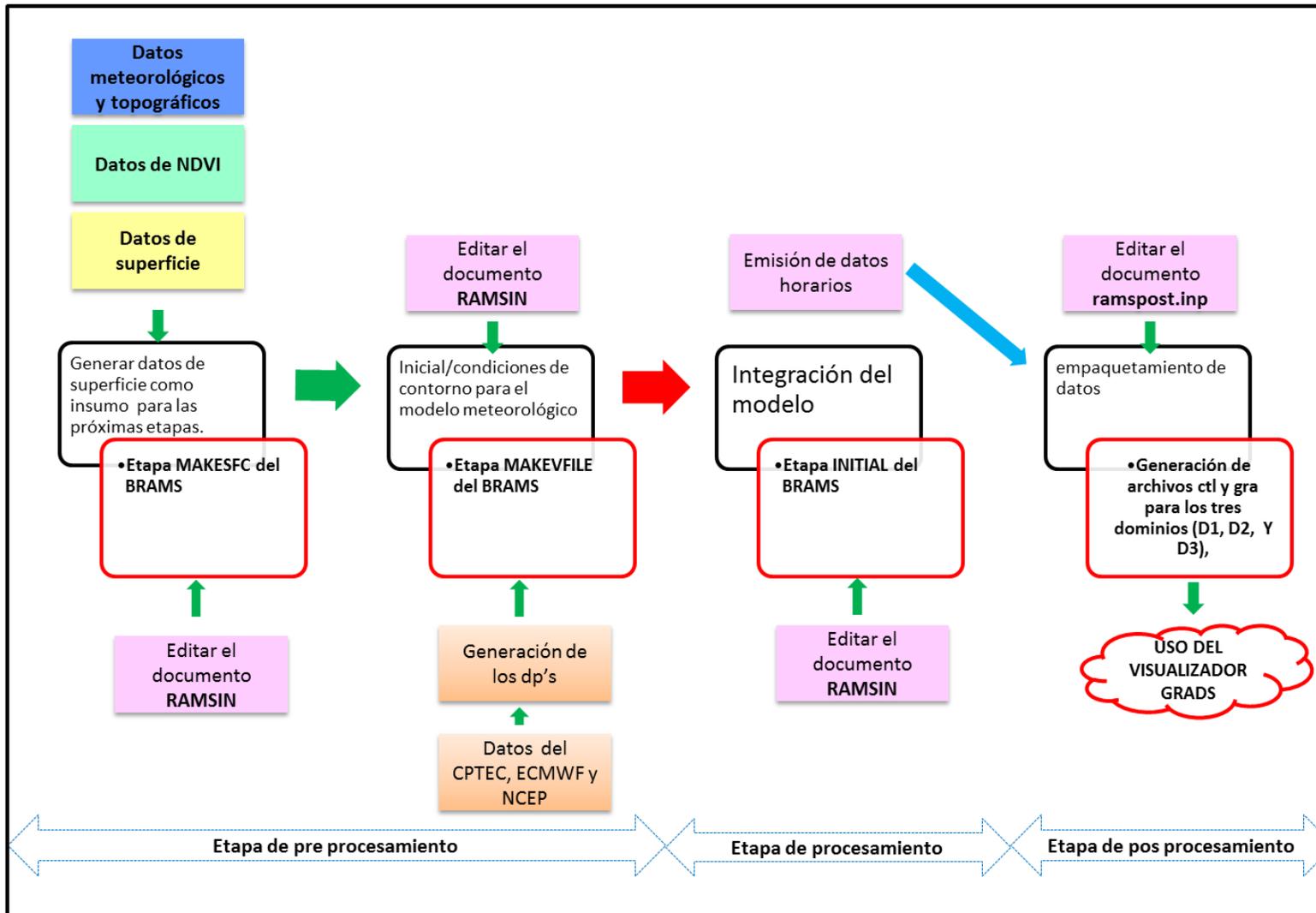


Figura 18: Esquema de tratamiento de datos en el modelo BRAMS.

Las salidas de los pronósticos de los tres dominios del modelo BRAMS, se tuvo en forma horaria y para cumplir con nuestro objetivo se extrajo los datos de la variable Tempc2m (temperatura pronosticada a 2 m) por cada estación que se indica en la Tabla 4; esta extracción se realizó haciendo uso de un scrip desarrollado en grads con la finalidad de exportar los datos pronosticados a un archivo texto con extensión dat. (Ver Anexo 1).

Los archivos con extensión dat fueron tratados con posterioridad en el software R proyect para extraer las temperatura mínimas pronosticadas en cada estación; en este paso se consideró como temperatura mínima pronosticada, aquella temperatura más baja registrada entre 00:00 horas a 7:00 horas; debido a que la temperatura mínima se da entre las horas de la madrugada y primeras horas de la mañana. Este tratamiento se hizo con los tres dominios, con los días dos, tres, cuatro y cinco de pronóstico y para cada una de las estaciones. (Ver Anexo 2).

**b. Análisis de las temperaturas mínimas pronosticadas y observadas en cada punto de estación**

El análisis fue evaluar el grado de relación entre las variables estudiadas, es decir entre las temperaturas mínimas pronosticadas en los tres dominios (dominio 1, dominio 2, y dominio 3) del modelo BRAMS y las temperaturas mínimas registradas en cada estación del área de estudio. El método estadístico que se utilizó fue el coeficiente de correlación de Pearson (R).

- **Coefficiente de correlación de Pearson**

Este índice fue planteado por Karl Pearson, el cual se calcula dividiendo la covarianza por el producto de las desviaciones estándar de las variables analizadas (X, Y), mide el grado de relación lineal entre estas dos variables cuantitativas, así como el sentido negativo y positivo de dicha relación. Varía entre el intervalo de -1 a +1. Este índice no depende de una variable respecto a la otra.

$$R = \frac{cov(T_{xi}^{mreg}, T_{xi}^{mbrams})}{\sigma_{T_{xi}^{mbrams}} * \sigma_{T_{xi}^{mreg}}}$$

Dónde:

$T_{xi}^{mbrams}$ : Temperatura mínima pronosticada por el modelo BRAMS para la estación xi.

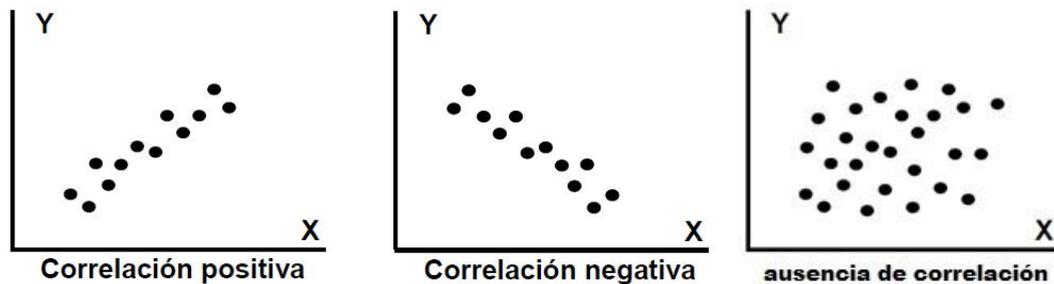
$T_{xi}^{mreg}$ : Temperatura mínima registrada para la estación xi (latitud y longitud de la estación meteorológica).

$cov$ : Covarianza.

$\sigma$ : Desviación estándar.

$R$ : Coeficiente de correlación de Pearson.

La Correlación Positiva ocurre cuando las variables X y Y aumentan ( $0 < R \leq 1$ ), mientras que en una *correlación negativa* ( $-1 \leq R < 0$ ) aumenta la variable Y y disminuye la variable X y cuando  $R=0$  no existe correlación entre las variables X y Y.



**Figura 19: Correlación positiva, negativa y nula de Pearson.**

- **Grado de significancia ( $\alpha$ ) de la correlación de Pearson**

Para hallar el grado de significancia de este índice se plantea la hipótesis nula ( $H_0$ ) e hipótesis alterna ( $H_1$ ), ambas son contrarias mientras una afirma la relación lineal la otra la niega. El valor del grado de significancia juega un papel importante en esta etapa, cuando se tiene un pequeño valor de  $\alpha$ , menor será la probabilidad de que la hipótesis nula sea cierta y se tendrá mayor probabilidad de que la hipótesis alterna sea correcta. En el presente estudio se utilizó una significancia del 0.1 y 0.05; permitiéndose un error del 10 por ciento y 5 por ciento para la afirmación de hipótesis alterna, respectivamente.

**$H_0: R=0$**

**$H_1: R \neq 0 (R < 0 \text{ ó } R > 0)$**

**$H_0$**  (hipótesis nula): No existe relación entre la temperatura mínima pronosticada por en BRAMS y la temperatura mínima registrada.

**$H_1$**  (hipótesis alterna): existe relación entre la temperatura mínima pronosticada por en Brams y la temperatura mínima registrada.

Finalmente, para la significancia estadística del coeficiente de correlación de Pearson se hizo la comparación del R calculado con el valor de un estadístico denominado R crítico (Correa, 2015), el cual se obtuvo de una tabla estadística. (Ver Anexo 3).

$|R \text{ calculado}| \geq R \text{ crítico, con un } \alpha=0.05 \text{ y } n=60$

**0.254**

(Ver anexo 3)

$|R \text{ calculado}| \geq R \text{ crítico, con un } \alpha=0.10 \text{ y } n=60$

**0.214**

(Ver anexo 3)

Lo anterior nos indica que el valor absoluto del coeficiente de Pearson (R calculado) que se calculó para cada tiempo (T2, T3, T4 Y T5) y dominio (D1, D2 y D3) de pronóstico debe ser mayor a R crítico, para rechazar la hipótesis nula y continuar con el siguiente paso. En este caso tenemos 60 pares de datos, y un  $\alpha=0.05$  se espera que R calculado sea mayor a 0.254 y con un  $\alpha=0.10$  se espera que se a mayor 0.214.

**c. Determinación de los modelos empíricos de pronóstico**

Una vez que se obtuvo el grado de relación entre las temperaturas mínimas pronosticadas por el modelo y las temperaturas mínimas observadas; se procedió a determinar las ecuaciones matemáticas que relacionen ambas variables, haciendo uso de la regresión lineal simple.

A diferencia de la correlación de Pearson, la regresión lineal si tiene dependencia de una variable respecto a la otra, tal es así que dado n pares de valores  $(x_1,y_1)$ ,  $(x_2,y_2)$ , ..... $(x_n,y_n)$  de una variable bidimensional  $(X,Y)$  la regresión lineal simple de Y con respecto a X, consiste en determinar la ecuación.

$$Y = a + bX + \text{err}$$

La ecuación nos indica que a partir de los valores de X (variable independiente o temperaturas pronosticadas por el BRAMS para el punto de estación) se puede predecir los valores de Y (variable dependiente o temperatura mínima observada en el punto de estación); sin embargo, los factores que influyen en la variable Y, se dividen en dos; (1) en la variable explicativa X y (2) los errores aleatorios (err), estos errores determinan que la relación entre la variable dependiente e independiente no sea perfecta. Sin embargo mediante el proceso de la recta de regresión de mínimos cuadrados de Y en X, hace posible que la suma de los cuadrados de errores (SCE) sea mínima.

$$SCE = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2$$

Este paso involucra hallar los valores a y b de manera que se haga mínima la suma de los cuadrados de errores.

$$SCE = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2$$

El coeficiente “b” es *la pendiente* o el *coeficiente de regresión lineal* y el coeficiente “a” es la ordenada en el origen.

Si  $b > 0$ , entonces la tendencia lineal es creciente, es decir a mayores valores de X corresponden mayores valores de Y.

Si  $b < 0$ , entonces la tendencia lineal es decreciente, es decir a mayores valores de X corresponden menores valores de Y.

Si  $b = 0$ , entonces,  $Y = a$ . luego Y permanece estacionario para cualquier valor de X. En este caso se dice que no hay regresión.

La determinación de los modelos empíricos se realizó para los tiempos de pronóstico (T2, T3, T4, Y T5) solo a aquellos puntos de estaciones que fueron significativas al 90 por ciento ( $\alpha = 0.1$ ) y 95 por ciento ( $\alpha = 0.05$ ) en el paso anterior. El procedimiento que se siguió fue el cálculo de la regresión lineal simple con el software R-project, donde las variables predictoras fueron los datos pronosticados para cada dominio y tiempo pronosticado por el modelo BRAMS ( $T_p$ ). El modelo que se obtuvo pronostica la temperatura mínima del aire a nivel de caseta meteorológica.

$$T_{xi}^{mi} = A + B * T_{xi}^{tp}$$

Dónde:

$T_{xi}^{mi}$ : Temperatura mínima para la estación xi.

$T_{xi}^{tp}$ : Temperatura mínima pronosticada por el modelo BRAMS para la estación xi.

A y B: coeficientes del modelo empírico

#### d. Prueba estadística Fisher

Para obtener el grado de significancia de las constantes A y B de la ecuación empírica de pronóstico, se hizo uso de la prueba estadística de Fisher. Donde se planteó como hipótesis nula ( $H_0$ ) que los coeficientes B y A ( $A=B=0$ ) son iguales cero y como hipótesis alterna ( $H_a$ ) que los coeficientes B y A son diferentes a cero ( $A \neq B \neq 0$ ) (Sutizal, 2017).

Para ver si se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ) o la hipótesis alterna ( $H_a$ ) se calculó el  $F_c$  (F calculado) y  $F_t$  (F tabular), con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ .

$$F_c = \frac{R^2(N-1-P)}{P(1-R^2)}; F_t = F[(1-\alpha); P, (N-1-P)]$$

Dónde:

N: Número de datos (tamaño de la muestra); en nuestro caso N=60

P: Número de parámetros, de la ecuación empírica; como nuestra ecuación es lineal, el número de parámetros es uno.

$R^2$ : Coeficiente de determinación.

Finalmente se aceptó las constantes A y B diferentes de cero ( $A$  y  $B \neq 0$ ) si  $F_c > F_t$ , con un nivel de confianza de  $\alpha=0.05$ .

#### e. Validación de los modelos empíricos

Para esta parte del estudio comparamos los 60 datos estimados con el modelo empírico calculado en el paso anterior con los 60 datos registrados en cada estación durante la campaña agrícola 2016/2017 (septiembre 2016 a febrero de 2017). Para lo cual emplearemos indicadores estadísticos como:

- **Error medio (ME) o BIAS**

El Bias es la diferencia entre la media de las simulaciones y la media de las observaciones, por lo tanto expresa el desvío de la simulación. El error medio es representativo de toda la serie de simulaciones, pero no proporciona información sobre errores individuales, representa una medida de precisión (SENAMHI, 2011). Las simulaciones que en promedio son mayores a las observaciones presentan un error medio (ME) mayor que cero ( $ME > 0$ ) y la simulaciones que son menores que las observaciones presentan error medio (ME) menor que cero ( $ME < 0$ ).

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{xi}^{mi} - T_{xi}^{mreg})$$

Dónde:

$T_{xi}^{mi}$ : es la temperatura mínima pronosticada con la ecuación empírica para la estación  $x_i$ .

$T_{xi}^{mreg}$ : es la temperatura mínima registrada en la estación  $x_i$ .

N: es el número de datos. En nuestro caso es igual a 24.

Finalmente, el score perfecto sería el BIAS igual a cero. Sin embargo, el criterio que se utilizó fue adoptar los valores más cercanos que estuvieron dentro del rango  $-2\text{ °C} \leq \text{BIAS} \leq +2\text{ °C}$ ; Las diferencias mayores a  $2\text{ °C}$  no deben constituir más del 25 por ciento de la muestra total para que se acepte la validación del modelo (Sanabria *et al.* 2006).

- **Error de los cuadrados medios residuales (RMSE)**

Este estadístico, mide la dispersión global de los datos alrededor de la línea de dispersión. Es decir mide el error total (error sistemático y al azar).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{xi}^{mi} - T_{xi}^{mreg})^2}$$

Dónde:

$T_{xi}^{mi}$ : es la temperatura mínima pronosticada con la ecuación empírica para la estación  $x_i$ .

$T_{xi}^{mreg}$ : es la temperatura mínima registrada en la estación  $x_i$ .

N: es el número de datos. En nuestro caso es igual a 24.

El RMSE perfecto sería igual a cero. Sin embargo, el criterio que se utilizó fue adoptar los valores más cercanos que estuvieron dentro del rango  $0\text{ °C} \leq \text{RMSE} \leq +2\text{ °C}$  (Sanabria *et al.* 2006).

### 3.2.2. Valorización económica del pronóstico de temperaturas mínimas

Para valorar económicamente el pronóstico de las ecuaciones empíricas, se consideró dos posibles alternativas (Ver Tabla 10).

**Alternativa 1:** En este caso los agricultores no pueden tomar acciones preventivas, como riego, encender maleza, aspersión, etc.; debido a que bajo esta alternativa, se supone que la ocurrencia de heladas agronómicas (según sea el caso, temperaturas menores a 5,8 °C para la papa, y menores a 7,6 °C para el maíz amiláceo) no se puede anticipar. Por lo tanto, si nos encontramos en una campaña agrícola normal (sin presencia de heladas) la producción del cultivo se mantendrá a un nivel actual y no habrá pérdidas netas. En campañas agrícolas que se presenten heladas habrá pérdidas en la producción del cultivo. Si  $Y$  es el rendimiento promedio del cultivo en años normales, el rendimiento del cultivo en años con heladas será una fracción de  $Y$  ( $kY$ ,  $k < 1$ ). Bajo la ocurrencia de heladas los agricultores tendrán una pérdida igual a:

$$L = Y - kY = (1 - k) * Y$$

Por lo tanto, la pérdida de rendimiento del cultivo cuando ocurre heladas ( $L$ ) será más alta bajo esta alternativa.

**Alternativa 2:** en esta alternativa el agricultor si cuenta con la información de pronóstico de temperaturas mínimas; entonces se tomará las acciones preventivas como; regar el sembrío horas antes, quemar maleza alrededor de la chacra, hacer podas, entre otros; es decir, los agricultores buscarán alternativas para reducir los daños de las heladas, lo que asegura que la pérdida de rendimiento del cultivo será menor que en la alternativa 1. Sin embargo, la toma de acciones preventivas solo lograra disminuir el rendimiento del cultivo en una menor cantidad que en la alternativa 1; por consiguiente el rendimiento en esta alternativa será  $\alpha Y$ ; donde  $\alpha$  es la sensibilidad de la producción a la presencia de heladas en cualquier campaña agrícola, teniéndose:

$$Y - \alpha * Y = (1 - \alpha) * Y$$

Esta pérdida puede expresarse como una fracción  $\gamma$  de la pérdida tomada en la alternativa uno:  $\gamma * L$ , con el coeficiente  $\gamma$  igual a:

$$\gamma = \frac{(1 - \alpha)}{(1 - k)}$$

**Tabla 10: Estructura de la toma de decisiones**

Acción	Estado de la naturaleza	
	ocurrencia de evento de heladas ( $\theta=1$ )	no ocurrencia de evento de heladas ( $\theta=0$ )
<b>tomar acciones preventivas ante la ocurrencia de heladas</b>	perdida de la producción debido a la toma de acciones preventivas (C ó $\gamma L$ )	perdida de la producción debido a la toma de acciones preventivas (C ó $\gamma L$ )
<b>no tomar ninguna acción preventiva</b>	perdida de la producción debido a la ocurrencia del evento (L)	no hay pérdida de producción (0)

La Tabla 10, nos muestra el modelo de costo (c) – pérdida (L) que se utilizó en la presente investigación; el cual involucra dos acciones posibles, tomar y no tomar acciones preventivas ante las heladas (alternativa 1 y 2), y dos eventos posibles, la ocurrencia y no ocurrencia de heladas agronómicas.

**a. Determinación la ecuación de producción de los cultivos de Papa y de Maíz amiláceo**

La investigación se centra en el departamento de Ancash, región donde, se siembra gran variedad de cultivos, entre los más importantes se encuentran los cultivos de papa y de maíz amiláceo.

Siguiendo los antecedentes que relacionan el rendimiento de los cultivos con las variables climáticas, se realizó una regresión lineal múltiple en la hoja de Excel entre el rendimiento del cultivo (papa o maíz amiláceo), temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación y una variable ficticia; se agregó la variable ficticia ( $\theta$ ) siguiendo el trabajo previo de Quiroga *et al.* (2011); esta variable se ha construido en base a la ocurrencia de heladas agronómicas para la papa (maíz amiláceo) tomando el valor de “1” si durante la campaña agrícola ocurrieron más de 50 (30) eventos de heladas y “0” si no hubo heladas (año normal).

**Tabla 11: Variables que intervienen en la función de producción de la papa o maíz amiláceo**

VARIABLE	DEFINICIÓN	UNIDAD	FUENTE DE INFORMACIÓN
<b>Y</b>	rendimiento del cultivo	Kg/ha	MINAGRI
<b>TMAX</b>	Temperatura máxima	°C	SENAMHI
<b>TMIN</b>	Temperatura mínima	°C	SENAMHI
<b>PP</b>	Precipitación	mm	SENAMHI
<b>θ</b>	Variable ficticia con respecto a la ocurrencia de heladas agronómicas en el cultivo de papa o maíz amiláceo	0 ó 1	ecuaciones empíricas de pronóstico

Una vez realizado la regresión múltiple se obtuvo la ecuación del rendimiento del cultivo similar a la ecuación 17. Donde  $Y_t$  es el rendimiento del cultivo de una región o departamento (en esta investigación será el rendimiento de papa o maíz amiláceo de Ancash) y en la campaña agrícola  $t$ , y las variables climáticas explicativas se describen en la Tabla 11.

$$Y_t = \alpha_0 + \alpha_1 * TMAX_t + \alpha_2 * TMIN_t + \alpha_3 * PP_t + \alpha_4 * \theta_t + err \dots\dots\dots(17)$$

La variable  $err$  es el error generado, sin embargo, para esta investigación se consideró a esta variable igual a cero.

**b. Significancia estadística de la ecuación de rendimiento**

Para encontrar la significancia estadística de la ecuación empírica de pronóstico se utilizó el valor del (i) coeficiente de correlación múltiple, (ii) coeficiente de determinación ajustado y (iii) la prueba estadística de F (explicado en el punto 3.2.1-d).

- **Coeficiente de correlación múltiple**

El coeficiente de correlación múltiple indica la correlación entre una de las variables independientes y la variable dependiente, manteniendo la otra u otras variables independientes estadísticamente constante.

$$R = \sqrt{\frac{\alpha_0 \sum Y + \alpha_1 \sum T_{max} * Y + \alpha_2 \sum T_{min} * Y + \alpha_3 \sum PP * Y + \alpha_4 \sum \theta * Y}{\sum Y^2 - n(\bar{Y})^2}}$$

Las variables se explican en el tabla 11. Este estadístico varía entre 0 a 1 donde el valor óptimo es 1.

- **Coefficiente de determinación ajustado**

El coeficiente de determinación ajustado está estrechamente relacionado con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que se utiliza para probar los resultados de una ecuación de regresión simple. El coeficiente de determinación ajustado es una medida estadística que muestra la proporción de variación explicado por la recta de regresión estimada. Variación se refiere a la suma de las diferencias al cuadrado entre los valores de Y y el valor medio de Y, expresado matemáticamente como:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

El coeficiente de determinación ajustada siempre toma un valor entre 0 y 1. Cuanto más cercano a 1 mejor es la ecuación de regresión estimada. El  $R^2$  ajustado aumenta a medida que se agrega nuevas variables independientes que expliquen la variable dependiente. Y la relación entre el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el coeficiente de determinación ajustado es la siguiente ecuación.

$$(\bar{R})^2 = 1 - (1 - R^2) * \left[ \frac{N - 1}{N - (K + 1)} \right]$$

Dónde:

N: es el tamaño de la muestra; en nuestro caso 12 años (2005-2016)

K= el número de variables independientes de la ecuación de regresión; en nuestro caso es 4.

El propósito de hallar la ecuación de rendimiento del cultivo, es cuantificar cuantos kilogramos por hectárea se estaría perdiendo si ocurren eventos de

heladas agronómicas (temperaturas mínimas por debajo de la temperatura crítica del cultivo) durante la campaña agrícola.

**c. Información de pronóstico**

La información de pronóstico de heladas agronómicas se obtuvo de aquellas ecuaciones empíricas que pasaron la validación en los cuatro tiempos de pronóstico (T2, T3, T4 y T5). Cabe señalar, que los datos de producción, rendimiento y precios de cultivos fueron tomados de la página web del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) y están disponibles a nivel regional; por lo tanto se consideró solo una estación meteorológica como representativa para todo el departamento de Ancash para evaluar económicamente el pronóstico meteorológico en la campaña agrícola septiembre del 2016 a febrero del 2017.

**d. Modelo de decisión y aversión al riesgo**

El modelo de toma de decisiones involucra las acciones de proteger y no proteger (modelo cost – loss) y dos eventos posibles, tiempo adverso y tiempo no adverso (Tabla 10) suponiendo que el tomador de decisiones incurre en un costo  $C$  ( $\gamma * L$ ) si toma medidas de protección y en una pérdida  $L$  si no se toman medidas de protección ante la ocurrencia de tiempo adverso.

Suponiendo que las consecuencias de cada combinación de acciones y estado del tiempo se conocen a priori, el modelo permite la representación de las preferencias del decisor (es decir las utilidades asociadas a los resultados futuros) y se establece la decisión mediante una estrategia óptima una vez se calcule cada utilidad esperada de cada decisión (Meza *et al.*; citado por Quiroga y Cerda, 2010). Sin embargo, la toma de decisiones está ligada a la aversión al riesgo que se suele tener al tomar acciones preventivas; Aunque la tolerancia al riesgo varía en cada individuo, la presente investigación tomó como coeficiente absoluto de aversión al riesgo ( $\rho$ ) a 0.5, valor que se sugiere en Huerta (2003) como un punto central.

Finalmente, para evaluar la información de pronóstico considerando la aversión al riesgo se usó el modelo planteado en Quiroga y Cerda (2010), Quiroga *et al.*, (2011) y Quiroga e Iglesias, (2009) donde se propone el Certain Equivalent (CE), el cual es la cantidad de dinero que produce la misma utilidad (U) sin incertidumbre como la utilidad esperada (UE) de una apuesta cuando existe el riesgo. La aversión al riesgo se evalúa considerando que el agricultor decida entre la Alternativa 1 (más riesgo) y Alternativa 2 (menor riesgo). Supongamos que las preferencias del agricultor pueden ser representadas por la utilidad esperada en la función de utilidad U:

$$U(x) = -\exp \{-\rho x\}$$

Donde, la utilidad (U) está expresada en la ganancia monetaria (x) y el coeficiente de aversión al riesgo ( $\rho$ ), que es constante para esta función e igual a 0.5. La decisión óptima en este caso se obtiene maximizando la utilidad esperada, que aumenta con disminución del gasto esperado al tomar una acción, esta es la razón para escribir los pagos como costos monetarios negativos. La finalidad del estudio es encontrar el valor económico de las ecuaciones de pronóstico, considerando como el beneficio de cambiar el comportamiento del agricultor cuando tiene acceso a información adicional. Entonces, dejemos que la variable aleatoria Z que indica un pronóstico de tiempo adverso ( $Z=1$ ), o de tiempo no adverso ( $Z=0$ ) se introduzca; y suponiendo que  $\Pr\{Z=1\}=\Pr\{\theta=1\}=P_\theta$ , es decir, el sistema de pronóstico produce señales meteorológicas adversas con la misma probabilidad de que se produzcan fenómenos meteorológicos adversos, por lo que pronóstico es al menos tan preciso como la información basada en los registros históricos. La calidad de información está dada por:

$$q = \text{corr}(\theta, Z) = \frac{(P_1 - P_\theta)}{(1 - P_\theta)}$$

Donde  $P_1 = \Pr\{\theta = 1 / Z = 1\}$ ; la tabla 12 resume las variables que se han mencionado.

**Tabla 12: Descripción de las variables incluidas en el modelo de decisión**

NOMBRE	VARIABLE	FUENTE DE INFORMACIÓN
$\theta$	Variable del evento extremo ( $\theta=1$ , "evento de heladas"; $\theta=0$ , "no hay eventos de heladas")	ecuaciones de pronóstico
$K$	coeficiente de producción en años de heladas agronómicas para el cultivo	función de producción del cultivo de papa
$L=Y-(K*/Y)$	perdida cuando se mantiene la demanda durante el evento de heladas	función de producción del cultivo de papa
$\alpha$	sensibilidad de producción a la ocurrencia de heladas	función de producción del cultivo de papa
$C$	Perdida cuando se ha tomado acciones preventivas. $C=Y-\alpha*Y=(1-\alpha)*Y=\gamma*L$	función de producción del cultivo de papa
$\rho$	coeficiente de aversión al riesgo: igual 0.5	Calibración basada en Gómez-Limón et al, 2003
$P\theta$	información climática: $Pr[\theta=1]$	Costo – pérdida (cosst loss)
$q$	calidad del pronóstico: $corr(\theta,Z)$ donde $Z$ representa un pronóstico imperfecto ( $Z=1$ , "tiempo adverso"; $Z=0$ "no hay tiempo adverso")	análisis de sensibilidad (cost-loss)

#### e. Cálculo del valor económico

Como se mencionó líneas arriba, la metodología para hallar la cantidad de dinero que los agricultores pagarían por el servicio de pronóstico de temperaturas mínimas fue el enfoque de Certain Equivalent (CE), el cual nos permite definir un valor de información en términos monetarios.

Se define como las ganancias monetarias (GM), como la diferencia en certeza equivalente, es decir:  $GM= CEF$  (con previsión) –  $CENF$  (sin previsión) y calculan las ganancias monetarias de un sistema de información. Teniendo el problema de decisión de la Tabla 10, la decisión óptima del agricultor considerando la maximización del criterio esperado es:

**Alternativa 1**, si  $A > P_\theta$ , y en este caso la utilidad esperada es de

$$UE(0) = -P_\theta * \exp\{\rho L\} + P_\theta - 1$$

**Alternativa 2**, si  $A < P_\theta$ , y la utilidad esperada es  $UE(1) = -\exp\{\rho \gamma L\}$

Indiferencia entre ambas alternativas si  $A = P_\theta$ .

Donde

$$A = \frac{1 - \exp\{\rho\gamma L\}}{1 - \exp\{\rho L\}}$$

La ganancia monetaria de un pronóstico definido como la diferencia entre CEF y CENF puede calcularse como:

$$MG_q = \frac{\ln[P_\theta * \exp\{\rho\gamma L\} + (1 - P_\theta) - P_\theta(1 - \exp\{\rho L\}) * [1 - q * (1 - P_\theta) + P_\theta]]}{-\rho} + \gamma * L$$

Si  $0 \leq A \leq P_\theta$ , y

$$MG_q = \frac{\ln\left[\frac{P_\theta * \exp\{\rho\gamma L\} + (1 - P_\theta) - P_\theta(1 - \exp\{\rho L\}) * [1 - q * (1 - P_\theta) + P_\theta]}{1 - P_\theta * (1 - \exp\{\rho L\})}\right]}{-\rho}$$

Si  $A > P_\theta$ .

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El interés del trabajo de investigación fue “determinar modelos empíricos de pronóstico de temperaturas mínimas en la región Ancash y evaluar económicamente el pronóstico de heladas agronómicas en la campaña agrícola 2016/2017 para los cultivos de la Papa y maíz amiláceo”, cultivos representativos de dicha región. Los resultados y discusiones se presentan teniendo en cuenta los objetivos específicos planteados.

### **4.1. DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS EMPÍRICOS DE PRONÓSTICO**

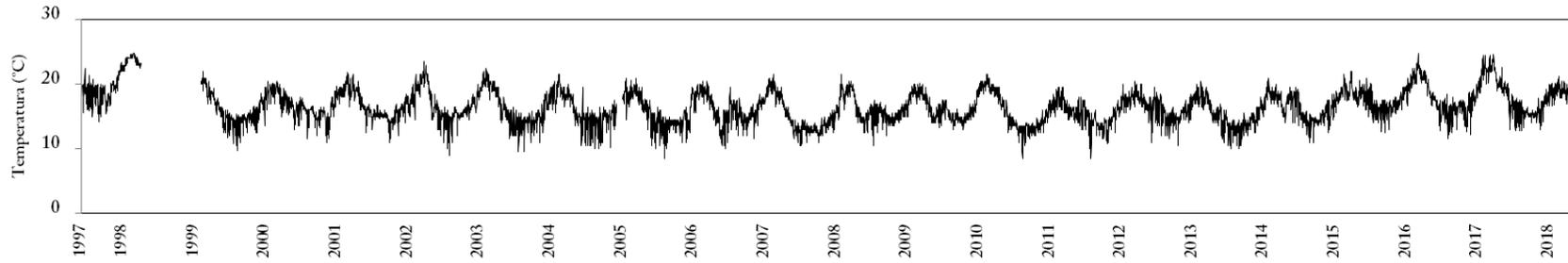
#### **4.1.1. Control de calidad de la temperatura mínima observada**

El control de calidad que se ejecutó fue un control básico a las catorce estaciones que se trabajó en el presente estudio de investigación; se hizo un control de calidad debido a que en el proceso de observación o medición y recolección de datos de la temperatura mínima se producen errores inevitables de diferentes naturaleza; por lo cual fue necesario hacer un control de calidad para detectar errores de carácter no sistemático (cambio de ubicación de la estación, ruptura o fraccionamiento del termómetro, mala lectura por parte del observador, etc.); se tuvo en cuenta los criterios que plantea el programa Andes Qc, este scrip se ejecutó en el R-project y se llegó a detectar “outliers” en años normales, es decir cuando no hubo eventos climáticos como el ENSO, estos valores muy altos fueron eliminados de la serie de tiempo; también se identificó el comportamiento de la temperatura mínima en los tres eventos El Niño (1982/83, 1997/98 y 2017) específicamente en las estaciones costeras de Huarmey y Buena Vista (Ver figura 20).

Los datos diarios de temperatura mínima conservan un comportamiento similar para cada serie histórica, sin embargo se detectó algunos valores muy altos que podrían estar relacionados a una mala lectura del instrumento o una mala digitación.

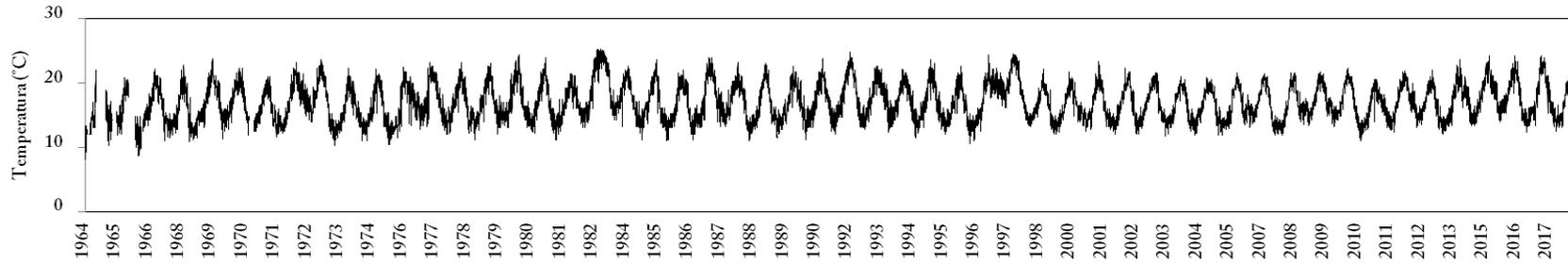
a)

SERIE DE TIEMPO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA PARA LA ESTACIÓN "HUARMEY" (20 msnm)



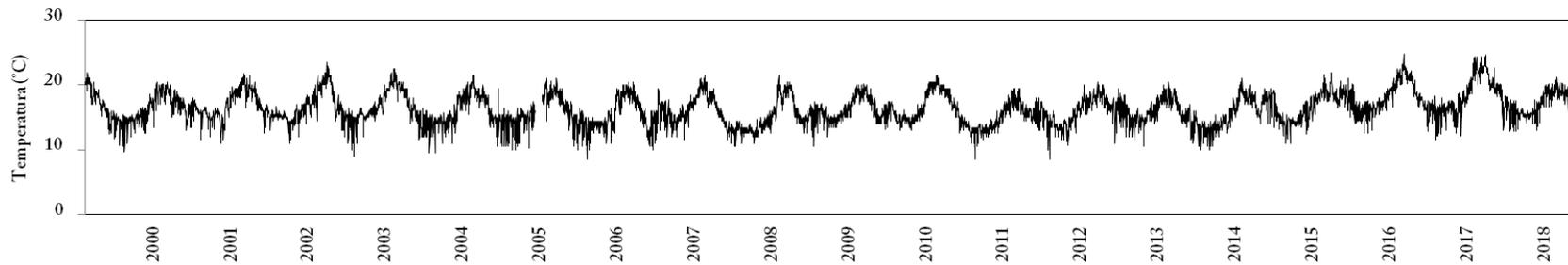
b)

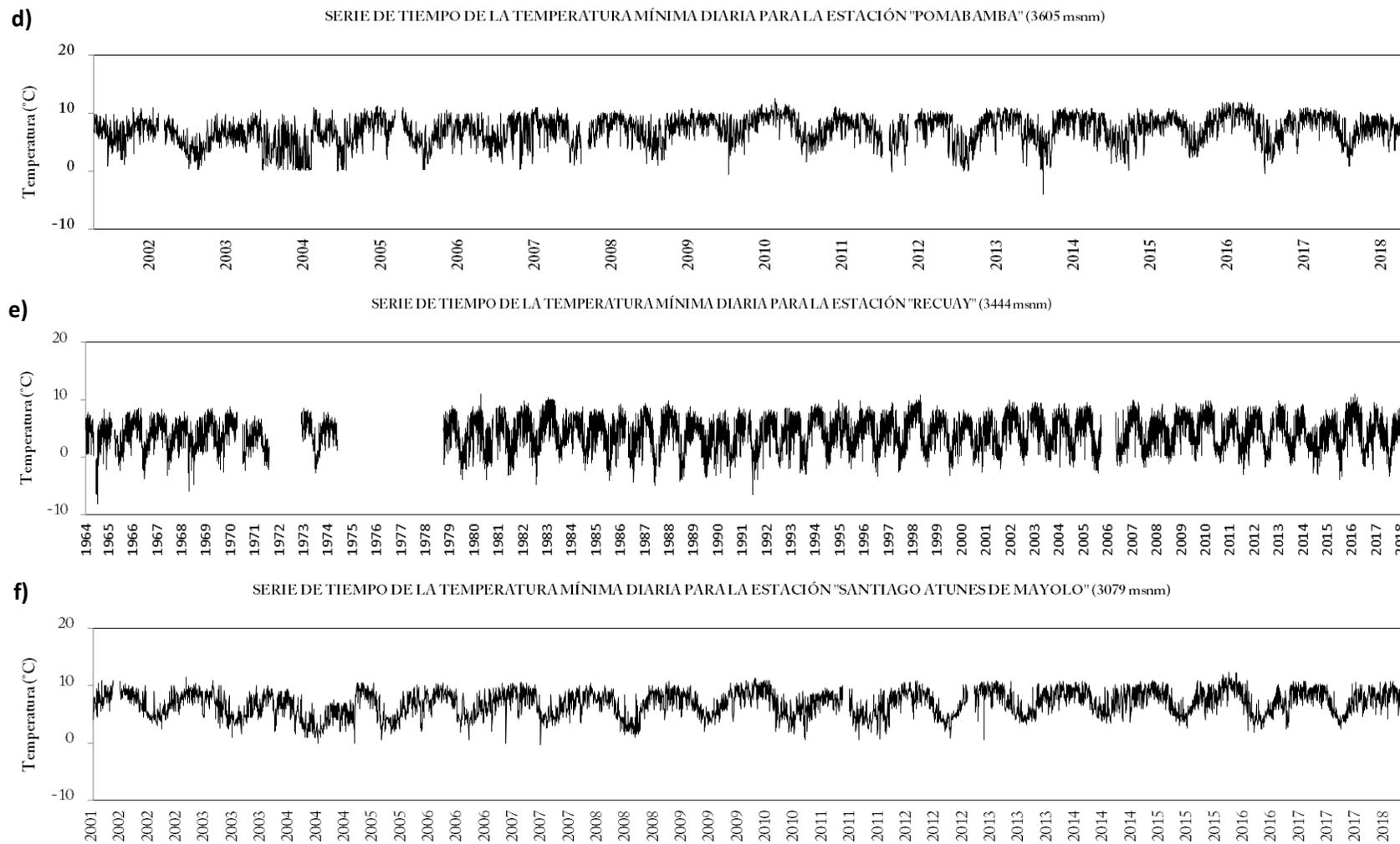
SERIE DE TIEMPO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA PARA LA ESTACIÓN "BUENAVISTA" (216 msnm)



c)

SERIE DE TIEMPO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA PARA LA ESTACIÓN "MALVAS" (3250 msnm)



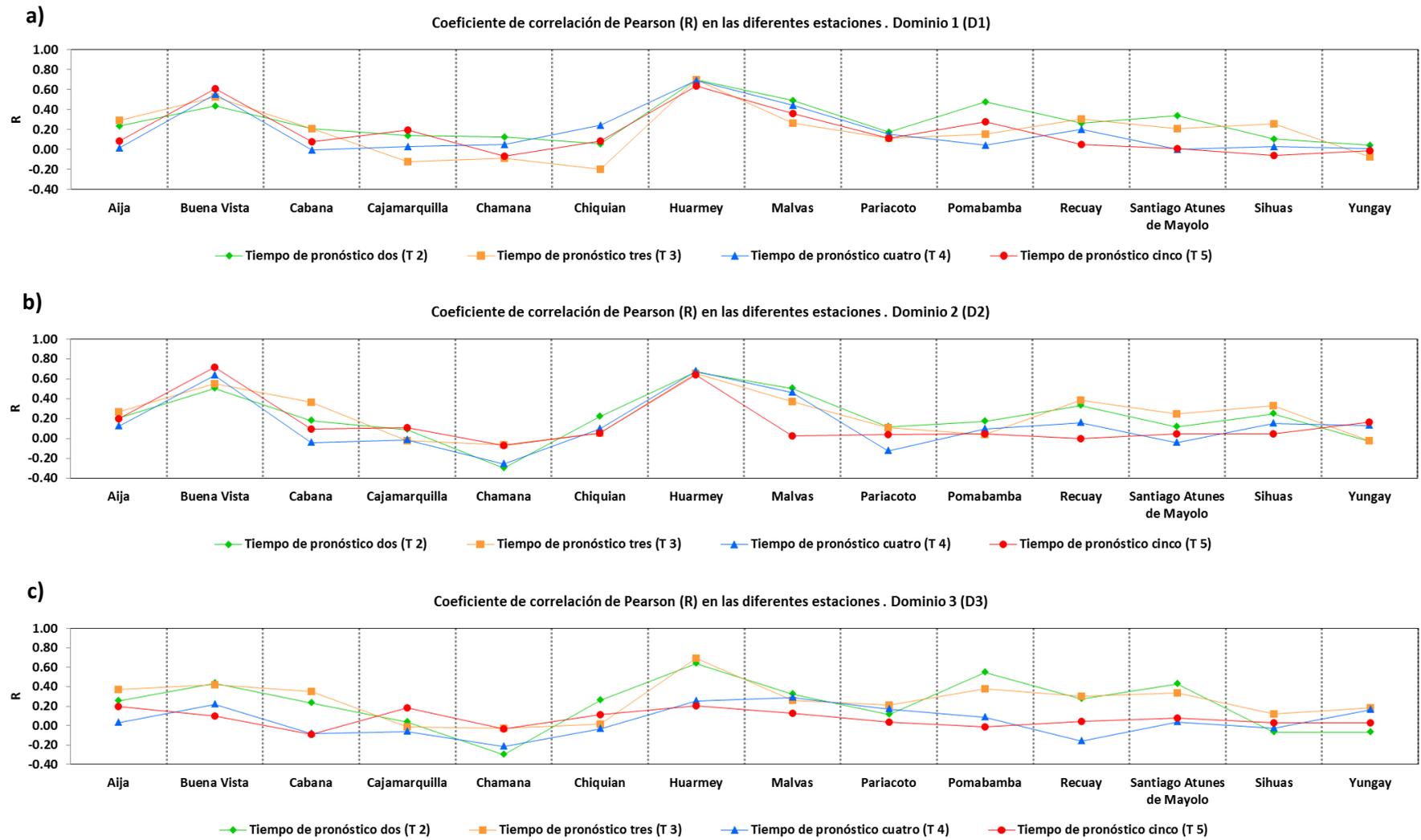


**Figura 20: Serie de tiempo de temperatura mínima diaria. Estación meteorológica Huarmey (a), Buena Vista (b), Malvas (c), Pomabamba (d), Recuay (e) y Santiago Atunes de Mayolo (f).**

#### **4.1.2. Relación lineal entre la temperatura mínima pronosticada por BRAMS y la temperatura mínima registrada en cada punto de estación**

La Figura 21, muestra las correlaciones de Pearson entre las temperaturas mínimas registradas y las temperaturas mínimas pronosticadas para cada salida de dominio del modelo BRAMS. La línea verde nos indica la correlación de Pearson para el tiempo o día dos pronósticos (T2), la línea naranja para el tiempo o día tres de pronóstico (T3), la línea azul para el tiempo o día cuatro de pronóstico (T4) y la línea roja para tiempo o día cinco de pronóstico (T5).

En la Figura 21 (a), Se puede apreciar que en los diferentes tiempos de pronóstico del dominio 1, las estaciones de Buena Vista, Huarney y Pomabamba son los que tienen mayor relación lineal ( $R$  más alto en comparación a los otros puntos de estación). En tanto, el pronóstico del dominio dos (D2) se tiene a las estaciones de Buena Vista, Huarney y Recuay entre las que guardan mayor relación lineal (Figura 21, b). Las estaciones con mayor correlación de Pearson en el dominio 3 son Huarney, Pomabamba y Santiago Atunes de Mayolo (Ver Figura 21).



**Figura 21: Coeficiente de correlación de Pearson entre la temperatura mínima pronosticada y registrada, en cada estación y en los cuatro tiempos de pronóstico (T2, T3, T4 y T5). (a) dominio 1, (b) dominio 2 y (c) dominio 3.**

A las estaciones que presentaron correlación negativa y positiva en los tres dominios y en los diferentes tiempos de pronóstico (Figura 21) se les planteo hipótesis nula (no existe relación entre la temperatura mínima pronosticada por el BRAMS y la temperatura mínima registrada) y la hipótesis alterna (existe relación entre la temperatura mínima pronosticada por el modelo BRAMS y la temperatura mínima registrada) para determinar el grado de significancia de dicha correlación; es decir, aquellas estaciones donde el valor absoluto del R calculado fue mayor o igual al R crítico (Ver el punto 3.2.1 y anexo 3), considerando un nivel de significancia del 95 por ciento y 90 por ciento.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos del coeficiente de correlación de Pearson con un nivel de confianza del 95 por ciento (cuadros verde) y 90 por ciento (cuadros rojo) para cada estación y por cada dominio; para evaluar la relación entre temperatura mínima y el desarrollo de los cultivos se tomó como puntos prioritarios a aquellas estaciones que están ubicadas por encima de los 2500 msnm, debido a que a partir de esta cota, la siembra y cosecha de los cultivos mencionados (papa y maíz amiláceo) es mayor, además a mayor altitud se tiene descensos de la temperatura del aire e incluso se registran heladas meteorológicas (temperaturas menores o iguales a 0 °C), las cuales suelen ser perjudiciales para los cultivos. Las estaciones más costeras como Buena Vista y Huarmey fueron tomadas en cuenta para evaluar el desempeño económico del pronóstico en el cultivo de maíz amiláceo.

La Tabla 13 muestra los valores del coeficiente de correlación y su nivel de significancia al 95 por ciento y 90 por ciento para el tiempo 2 de pronóstico, las estaciones están ordenadas de mayor a menor altitud, se observa que en el dominio 1 se tiene seis estaciones con un R significativo al 95 por ciento y dos con 90 por ciento, en tanto en el dominio 2 se tienen seis estaciones con un nivel de confianza del 95 por ciento y uno con 90 por ciento; y finalmente el dominio 3 (mayor resolución espacial) tiene 10 estaciones significativas. Por otro lado, la tabla 14 nos muestra los resultados para el tiempo tres de pronóstico, donde la mayoría de estaciones en los tres dominios tienen una buena significancia estadística a excepción de Chiquian, Cajamarquilla, Yungay y Chamana. En los dos primeros tiempos de pronóstico (T2 y T3) se tuvo las mayores significancias (al 95 por ciento y 90 por ciento) estadísticas, debido a que los

valores de correlación de Pearson entre la temperatura pronosticada y observada presentaron valores altos por tratarse de un horizonte de pronóstico de tres días por lo cual la incertidumbre del mismo pronóstico es menor (Ver Tabla 13 y 14).

**Tabla 13: Correlación de Pearson entre las temperaturas mínimas pronosticadas y observadas para el tiempo de pronóstico dos (T2) y para los tres dominios. Niveles de significancia al 95 por ciento (cuadro rojo) y 90 por ciento (cuadro verde)**

ESTACIONES	DOMINIO 1	DOMINIO 2	DOMINIO 3
Pomabamba	0.48	0.17	0.55
Recuay	0.26	0.33	0.27
Aija	0.24	0.20	0.25
Chiquian	0.06	0.22	0.26
Sihuas	0.10	0.25	-0.07
Cajamarquilla	0.14	0.09	0.04
Malvas	0.49	0.50	0.33
Cabana	0.21	0.18	0.23
Santiago Atunes de Mayolo	0.34	0.12	0.43
Yungay	0.04	-0.03	-0.07
Pariacoto	0.18	0.12	0.11
Chamana	0.12	-0.30	-0.30
Buena Vista	0.44	0.51	0.43
Huarmey	0.70	0.67	0.64

 Nivel de significancia del 90%
  Nivel de significancia del 95%
  No significativo

**Tabla 14: Correlación de Pearson entre las temperaturas mínimas pronosticadas y observadas para el tiempo de pronóstico tres (T3) y para los tres dominios. Niveles de significancia al 95 por ciento (cuadro rojo) y 90 por ciento (cuadro verde)**

ESTACIONES	DOMINIO 1	DOMINIO 2	DOMINIO 3
Pomabamba	0.15	0.04	0.38
Recuay	0.31	0.39	0.30
Aija	0.29	0.27	0.37
Chiquian	-0.20	0.06	0.01
Sihuas	0.26	0.33	0.12
Cajamarquilla	-0.12	-0.02	-0.01

...continuación

<b>Malvas</b>	0.26	0.38	0.26
<b>Cabana</b>	0.21	0.37	0.35
<b>Santiago Atunes de Mayolo</b>	0.21	0.25	0.34
<b>Yungay</b>	-0.07	-0.02	0.18
<b>Pariacoto</b>	0.11	0.11	0.21
<b>Chamana</b>	-0.09	-0.06	-0.02
<b>Buena Vista</b>	0.52	0.56	0.42
<b>Huarmey</b>	0.70	0.65	0.70

 Nivel de significancia del 90%
  Nivel de significancia del 95%
  No significante

Las Tablas 15 y 16, muestran la significancia (90 por ciento y 95 por ciento) del coeficiente de Pearson para los tiempos de pronóstico cuatro y cinco, respectivamente. Donde las estaciones como Buena Vista, Huarmey y Malvas presentan una significancia del 90 y 95 por ciento para los tres dominios del cuarto tiempo de pronóstico (T4); asimismo se tiene una significancia del 90 por ciento en la estación de Chiquian para el dominio 1. En el tiempo de pronóstico cinco, se tiene estaciones significativas al 95 por ciento en el dominio 1 (Buena Vista, Huarmey, Malvas y Pomabamba); mientras que para el dominio dos (D2) solo se tuvo dos (Buena Vista y Huarmey) estaciones con la misma significancia que en el dominio 1; y en el dominio tres solo la estación meteorológica de Huarmey se aceptó la hipótesis alterna a un 90 por ciento de significancia. En estos dos últimos tiempos de pronóstico (T4 y T5) se tuvieron menos cantidad de estaciones, donde se aceptaron la hipótesis alterna; asimismo, dos de las estaciones son costeras y las otras dos se encuentran en la sierra.

**Tabla 15: Correlación de Pearson entre las temperaturas mínimas pronosticadas y observadas para el tiempo de pronóstico cuatro (T4) y para los tres dominios. Niveles de significancia al 95 por ciento (cuadro rojo) y 90 por ciento (cuadro verde)**

<b>ESTACIONES</b>	<b>DOMINIO 1</b>	<b>DOMINIO 2</b>	<b>DOMINIO 3</b>
<b>Pomabamba</b>	0.04	0.09	0.09
<b>Recuay</b>	0.20	0.16	-0.16
<b>Aija</b>	0.02	0.13	0.03
<b>Chiquian</b>	0.24	0.10	-0.04
<b>Sihuas</b>	0.03	0.15	-0.03

...continuación

<b>Cajamarquilla</b>	0.03	-0.02	-0.06
<b>Malvas</b>	0.44	0.46	0.29
<b>Cabana</b>	-0.01	-0.04	-0.08
<b>Santiago Atunes de Mayolo</b>	0.00	-0.04	0.03
<b>Yungay</b>	0.01	0.13	0.16
<b>Pariacoto</b>	0.15	-0.12	0.17
<b>Chamana</b>	0.05	-0.26	-0.21
<b>Buena Vista</b>	0.56	0.63	0.22
<b>Huarmey</b>	0.69	0.68	0.25

 Nivel de significancia del 90%
  Nivel de significancia del 95%
  No significante

**Tabla 16: Correlación de Pearson entre las temperaturas mínimas pronosticadas y observadas para el tiempo de pronóstico cinco (T5) y para los tres dominios. Niveles de significancia al 95 por ciento (cuadro rojo) y 90 por ciento (cuadro verde)**

ESTACIONES	DOMINIO 1	DOMINIO 2	DOMINIO 3
<b>Pomabamba</b>	0.28	0.05	-0.01
<b>Recuay</b>	0.05	0.00	0.04
<b>Aija</b>	0.09	0.20	0.19
<b>Chiquian</b>	0.09	0.05	0.11
<b>Sihuas</b>	-0.06	0.05	0.03
<b>Cajamarquilla</b>	0.20	0.11	0.18
<b>Malvas</b>	0.36	0.03	0.13
<b>Cabana</b>	0.08	0.10	-0.09
<b>Santiago Atunes de Mayolo</b>	0.01	0.05	0.07
<b>Yungay</b>	-0.01	0.16	0.03
<b>Pariacoto</b>	0.11	0.04	0.03
<b>Chamana</b>	-0.07	-0.07	-0.03
<b>Buena Vista</b>	0.61	0.72	0.10
<b>Huarmey</b>	0.64	0.64	0.21

 Nivel de significancia del 90%
  Nivel de significancia del 95%
  No significante

#### 4.1.3. Modelos empíricos de pronóstico para cada estación y para los tiempos de pronóstico 2 (T2), 3 (T3), 4 (T4) y 5 (T5)

A continuación, se presentan las ecuaciones empíricas de pronóstico de la temperatura mínima, para cada tiempo o cada día de pronóstico (T2, T3, T4 y T5) y para los 3 dominios (D1, D2 Y D3) del modelo BRAMS. Las tablas solo contienen aquellas estaciones que tuvieron una significancia del 95 por ciento y 90 por ciento en el paso anterior (relación lineal); los resultados que se muestran contienen la ecuación de pronóstico, el Fc (F calculado) y Ft (F tabulado) y el grado de significancia al 95 por ciento; esto para aceptar o rechazar la hipótesis alterna ( $A \neq B \neq 0$ ) con respecto a las constantes A y B de la ecuación de empírica de pronóstico (Ver Tablas 17 a 28).

**Tabla 17: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día dos de pronóstico (T2). Dominio 1**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCIA
AIJA	$T_m = 0.18 * T_p + 2.45$	3.24	4.00	No significativa
BUENA VISTA	$T_m = 1.53 * T_p - 5.43$	12.89	4.00	significativa
CABANA	$T_m = 0.08 * T_p + 6.49$	2.52	4.00	No significativa
HUARMEY	$T_m = 1.74 * T_p - 19.4$	52.01	4.00	significativa
MALVAS	$T_m = 0.74 * T_p - 3.86$	17.4	4.00	significativa
POMABAMBA	$T_m = 0.44 * T_p + 4.84$	16.22	4.00	significativa
RECUAY	$T_m = 0.28 * T_p + 4.13$	4.0	4.00	significativa
SANTIAGO A. M.	$T_m = 0.28 * T_p + 7.08$	7.04	4.00	significativa

**Tabla 18: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día dos de pronóstico (T2). Dominio 2**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCIA
BUENA VISTA	$T_m = 1.12 * T_p - 4.82$	19.09	4.00	significativa
CHAMANA	$T_m = -0.24 * T_p + 16.12$	5.44	4.00	significativa
CHIQUIAN	$T_m = 0.07 * T_p + 3.95$	2.80	4.00	No significativa
HUARMEY	$T_m = 1.34 * T_p - 9.09$	45.09	4.00	significativa
MALVAS	$T_m = 0.7 * T_p - 0.12$	18.46	4.00	significativa
RECUAY	$T_m = 0.36 * T_p + 3.76$	6.7	4.00	significativa
SIHUAS	$T_m = -0.26 * T_p + 10.15$	3.56	4.00	No significativa

**Tabla 19: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día dos de pronóstico (T2). Dominio 3**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCIA
AIJA	$T_m = 0.17 * T_p + 2.14$	3.72	4.00	No significativa
BUENA VISTA	$T_m = 0.85 * T_p + 1.47$	12.61	4.00	significativa
CABANA	$T_m = 0.09 * T_p + 6.76$	3.11	4.00	No significativa
CHAMANA	$T_m = -0.16 * T_p + 14.36$	5.5	4.00	significativa
CHIQUIAN	$T_m = 0.08 * T_p + 3.93$	4.07	4.00	significativa
HUARMEY	$T_m = 0.87 * T_p - 0.16$	38.04	4.00	significativa
MALVAS	$T_m = 0.15 * T_p + 6.71$	6.55	4.00	significativa
POMABAMBA	$T_m = 0.52 * T_p + 4.28$	23.66	4.00	significativa
RECUAY	$T_m = 0.16 * T_p + 3.96$	4.4	4.00	significativa
SANTIAGO A. M.	$T_m = 0.29 * T_p + 5.68$	12.18	4.00	significativa

**Tabla 20: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día tres de pronóstico (T3). Dominio 1**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCIA
AIJA	$T_m = 0.31 * T_p + 2.18$	5.40	4.00	significativa
BUENA VISTA	$T_m = 1.81 * T_p - 9.13$	21.51	4.00	significativa
CABANA	$T_m = 0.1 * T_p + 6.46$	2.50	4.00	No significativa
HUARMEY	$T_m = 1.87 * T_p - 21.97$	55.27	4.00	significativa
MALVAS	$T_m = 0.34 * T_p + 2.33$	4.19	4.00	significativa
RECUAY	$T_m = 0.5 * T_p + 3.12$	5.87	4.00	significativa
SANTIAGO A. M.	$T_m = 0.23 * T_p + 7.36$	2.56	4.00	No significativa
SIHUAS	$T_m = 0.23 * T_p + 9.78$	3.97	4.00	No significativa

**Tabla 21: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día tres de pronóstico (T3). Dominio 2**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCIA
AIJA	$T_m = 0.33 * T_p + 2.66$	4.5	4.00	significativa
BUENA VISTA	$T_m = 1.33 * T_p - 8.36$	25.53	4.00	significativa
CABANA	$T_m = 0.2 * T_p + 6.19$	8.93	4.00	significativa
HUARMEY	$T_m = 1.36 * T_p - 9.18$	42.69	4.00	significativa
MALVAS	$T_m = 0.43 * T_p + 2.89$	9.38	4.00	significativa
RECUAY	$T_m = 0.55 * T_p + 2.89$	10.19	4.00	significativa
SANTIAGO A. M.	$T_m = 0.24 * T_p + 6.51$	3.64	4.00	No significativa
SIHUAS	$T_m = 0.42 * T_p + 9.03$	7.05	4.00	significativa

**Tabla 22: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día tres de pronóstico (T3). Dominio 3**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCIA
AIJA	$T_m = 0.27 * T_p + 1.84$	9.24	4.00	significativa
BUENA VISTA	$T_m = 0.86 * T_p + 1.75$	12.44	4.00	significativa
CABANA	$T_m = 0.22 * T_p + 6.37$	8.65	4.00	significativa
HUARMEY	$T_m = 0.97 * T_p - 2.05$	53.81	4.00	significativa
MALVAS	$T_m = 0.16 * T_p + 6.7$	4.1	4.00	significativa
PARIACOTO	$T_m = 0.11 * T_p + 12.76$	2.63	4.00	No significativa
POMABAMBA	$T_m = 0.36 * T_p + 5.6$	9.46	4.00	significativa
RECUAY	$T_m = 0.25 * T_p + 3.14$	5.74	4.00	significativa
SANTIAGO A. M.	$T_m = 0.26 * T_p + 6.28$	7.35	4.00	significativa

**Tabla 23: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cuatro de pronóstico (T4). Dominio 1**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCIA
BUENA VISTA	$T_m = 1.75 * T_p - 8.12$	25.45	4.00	significativa
CHIQUIAN	$T_m = 0.22 * T_p + 2.44$	3.48	4.00	No significativa
HUARMEY	$T_m = 1.72 * T_p - 18.8$	51.64	4.00	significativa
MALVAS	$T_m = 0.75 * T_p - 3.31$	14.04	4.00	significativa

**Tabla 24: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cuatro de pronóstico (T4). Dominio 2**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCIA
BUENA VISTA	$T_m = 1.5 * T_p - 11.46$	38.04	4.00	significativa
CHAMANA	$T_m = -0.23 * T_p + 16.2$	4.13	4.00	significativa
HUARMEY	$T_m = 1.46 * T_p - 11.29$	48.46	4.00	significativa
MALVAS	$T_m = 0.64 * T_p + 0.93$	15.65	4.00	significativa

**Tabla 25: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cuatro de pronóstico (T4). Dominio 3**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCIA
BUENA VISTA	$T_m = 0.19 * T_p + 14.15$	2.93	4.00	No significativa
CHAMANA	$T_m = -0.11 * T_p + 13.72$	2.74	4.00	No significativa
HUARMEY	$T_m = 0.19 * T_p + 12.73$	0.88	4.00	No significativa
MALVAS	$T_m = 0.26 * T_p + 6.46$	5.23	4.00	significativa

**Tabla 26: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cinco de pronóstico (T5). Dominio 1**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCI A
<b>BUENA VISTA</b>	$T_m = 1.85 * T_p - 9.32$	33.46	4.00	significativa
<b>HUARMEY</b>	$T_m = 1.49 * T_p - 13.96$	39.16	4.00	significativa
<b>MALVAS</b>	$T_m = 0.52 * T_p + 0.17$	8.41	4.00	significativa
<b>POMABAMBA</b>	$T_m = 0.63 * T_p + 3.81$	4.7	4.00	significativa

**Tabla 27: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cinco de pronóstico (T5). Dominio 2**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCI A
<b>BUENA VISTA</b>	$T_m = 1.82 * T_p - 17.68$	60.65	4.00	significativa
<b>HUARMEY</b>	$T_m = 1.34 * T_p - 8.78$	40.52	4.00	significativa

**Tabla 28: Ecuaciones empíricas de pronóstico de temperaturas mínimas en el tiempo o día cinco de pronóstico (T5). Dominio 3**

ESTACIÓN	ECUACIÓN	FC	FT	SIGNIFICANCI A
<b>HUARMEY</b>	$T_m = 0.01 * T_p + 16.23$	2.51	4.00	No significativa

Las Tablas del 17 al 19, muestran las ecuaciones empíricas significativas (prueba estadística de Fisher al 95 por ciento de confianza) para el tiempo o día dos de pronóstico (T2) en los tres dominios. Las estaciones de Buena Vista, Huarmey, Malvas y Recuay fueron significativas en los tres dominios, es decir que en estas ecuaciones de pronóstico se aceptó la hipótesis alterna ( $A \neq B \neq 0$ ). Mientras que estaciones como Pomabamba y Santiago Atunes de Mayolo solo fueron significativas para el dominio 1 y 3 y la estación de Chamana fue significativa en los dominios 2 y 3.

Las Tablas 20 al 22 muestran las ecuaciones de pronóstico para el tiempo de pronóstico tres (T3), estos modelos están en la capacidad de pronosticar a un horizonte de tres días. La prueba estadística de Fisher al 95 por ciento de confianza fue significativa en los tres dominios para las estaciones de Aija, Buena Vista, Huarmey, Malvas y Recuay mientras que, Cabana fue significativa en los dominios 1 (D1) y 2 (D2). Las estaciones de Pomabamba y Santiago Atunes de Mayolo tuvieron un valor de Fisher significativo en

el dominio 3 (D3).

Las Tablas del 23 y 25, presentan las ecuaciones de regresión lineal para el tiempo de pronóstico cuatro (T4). La prueba estadística Fisher resultó significativa al 95 por ciento de confianza ( $\alpha = 0,05$ ), para la estación de Malvas en los tres dominios; las estaciones de Buena Vista y Huarney fueron significativo en el dominio 1 (D1) y dos (D2) y la estación de Chamana fue significativa en el dominio 2 (D2).

Las Tablas 26 al 28 muestran las ecuaciones de pronóstico para un horizonte temporal de 5 días, donde las estaciones de Buena Vista y Huarney fueron significativas al 95 por ciento en los dominios uno (D1) y dos (D2); mientras que las estaciones de Malvas y Pomabamba fueron significativas en el dominio 1 (D1).

#### **4.1.4. Validación de los modelos empíricos de pronóstico**

En el punto 4.1.3 se vio la significancia a un nivel de confianza del 95 por ciento de las diferentes ecuaciones empíricas de pronóstico de cada tiempo de pronóstico y por cada dominio y las ecuaciones que resultaron significativas en ese paso fueron validadas mediante los estadísticos del error medio (ME o BIAS) y el error de los cuadrados residuales (RMSE), detallados en el punto 3.1.2. (e).

La Tabla 29, muestra los resultados de validación de los modelos empíricos para el tiempo de pronóstico dos (T2) para los tres dominios. Donde podemos verificar que en el dominio 1 (72 Km de resolución) las ecuaciones de las estaciones Huarney, Malvas y Santiago Atunes de Mayolo son las que pasan la validación con un RMSE de 1.59 °C, 1.18 °C y 1.63 °C, estos valores indican que la temperatura mínima pronosticada por el modelo empírico varía en esos valores respecto a las temperaturas mínimas registradas en cada estación. En tanto los valores del Bias para esas mismas estaciones son de -0.96 °C, 0.55 °C y -0.91 °C, respectivamente, los valores negativos indican que el modelo empírico está subestimado la temperatura mínima y los valores positivos que se está sobrestimado (ejemplo, el modelo empírico para la estación de Malvas sobrestima en 0.55 °C a la temperatura mínima registrada en estación); en los dominios dos (D2) y tres

(D3) tenemos a las ecuaciones empíricas de Huarmey y Malvas.

Por otro lado, para el tiempo de pronóstico tres (T3), tenemos que en el dominio uno (D1) la ecuación de la estación de Malvas es la que presenta el Bias y el RMSE dentro de los criterios establecidos en la metodología, por lo tanto esa ecuaciones será tomada; mientras que en el dominio dos (D2) se tuvo las estaciones de Cabana y Malvas, las cuales presentaron RMSE de 1.12 °C y 1.19 °C y Bias de -0.29 °C y 0.33; finalmente en el dominio tres (D3) las estaciones de Cabana, Malvas y Santiago Atunes de Mayolo presentaron un variación de 1.15 °C, 1.35 °C y 1.94 °C (valores del RMSE) en la temperatura mínima y según el Bias las ecuaciones de pronóstico para las estaciones subestiman a la temperatura mínima. (Ver cuadro 30).

**Tabla 29: Resultados de validación de los modelos empíricos para el tiempo de pronóstico dos (T2) y para los tres dominios (D1, D2, D3)**

<b>ESTACIÓN</b>	<b>RMSE</b>	<b>BIAS</b>
BUENA VISTA – D1	3.38	-1.12
RECUAY - D1	2.42	-0.79
<b>HUARMEY – D1</b>	<b>1.59</b>	<b>-0.96</b>
<b>MALVAS -D1</b>	<b>1.18</b>	<b>0.55</b>
POMABAMBA -D1	2.27	-1.55
<b>SANTIAGO ATUNES DE MAYOLO – D1</b>	<b>1.63</b>	<b>-0.91</b>
BUENA VISTA – D2	3.14	0.76
<b>CHAMANA - D2</b>	<b>1.19</b>	<b>0.20</b>
<b>HUARMEY – D2</b>	<b>1.26</b>	<b>0.47</b>
<b>MALVAS -D2</b>	<b>1.06</b>	<b>0.13</b>
RECUAY – D2	2.63	-1.13
BUENA VISTA – D3	2.7	0.19
<b>CHAMANA - D3</b>	<b>1.12</b>	<b>0.16</b>
<b>CHIQUIAN – D3</b>	<b>1.26</b>	<b>0.08</b>
<b>HUARMEY – D3</b>	<b>1.44</b>	<b>-0.47</b>
<b>MALVAS – D3</b>	<b>1.15</b>	<b>0.36</b>
POMABAMBA – D 3	3.23	-2.65
RECUAY – D3	2.42	-0.8
SANTIAGO ATUNES DE MAYOLO – D 3	8.69	7.43

**Tabla 30: Resultados de validación de los modelos empíricos para el tiempo de pronóstico tres (T3) y para los tres dominios (D1, D2, D3)**

<b>ESTACIÓN</b>	<b>RMSE</b>	<b>BIAS</b>
BUENA VISTA - D1	3.42	-1.93
AIJA - D1	2.39	-1.80
HUARMEY - D1	2.43	-1.75
<b>MALVAS - D1</b>	<b>1.35</b>	<b>0.61</b>
RECUAY - D1	2.88	-1.91
BUENA VISTA - D2	2.42	0.22
AIJA - D2	2.31	-1.68
<b>CABANA - D2</b>	<b>1.12</b>	<b>-0.29</b>
HUARMEY - D2	2.04	-0.83
<b>MALVAS - D2</b>	<b>1.19</b>	<b>0.33</b>
RECUAY - D2	3.04	3.13
SIHUAS - D2	2.26	-0.8
AIJA - D3	2.54	-1.99
BUENA VISTA - D3	2.62	-0.78
<b>CABANA - D3</b>	<b>1.15</b>	<b>-0.43</b>
<b>MALVAS - D3</b>	<b>1.35</b>	<b>0.46</b>
HUARMEY - D3	2.91	-2.3
RECUAY - D3	2.75	-1.63
POMABAMBA - D3	2.09	-1.45
<b>SANTIAGO ATUNES DE MAYOLO - D3</b>	<b>1.94</b>	<b>-1.11</b>

Las Tablas 31 y 32 muestran los estadísticos Bias y RMSE para el tiempo de pronóstico tres (T3) y cuatro (T4), respectivamente. En la tabla 31 podemos identificar que las estaciones de Malvas (en los tres dominios), Buena Vista y Huarmey (en el dominio 2), presentan estadísticos aceptables según lo establecido en la metodología y que solo la ecuación empírica de pronóstico de Huarmey es la que subestima la temperatura mínima en 1.09 °C y las demás estaciones la sobrestiman en menos de 2 °C. En tanto, la tabla 32 nos indica que las estaciones de Malvas (salida del dominio 1) y Buena Vista (salida del dominio 2) son las únicas que pasaron la fase de validación de las ecuaciones empíricas con valores de RMSE de 1.47 y 1.96, respectivamente, estos valores nos indican la dispersión global de la temperatura mínima alrededor de la línea de dispersión, es decir, las salidas de pronósticos que tengamos con el modelo empírico variaran dentro de esos valores, asimismo, se presenta un Bias de 0.74 en Malvas y -0.38 en Buena Vista.

**Tabla 31: Resultados de validación de los modelos empíricos para el tiempo de pronóstico cuatro (T4) y para los tres dominios (D1 y D2)**

ESTACIÓN	RMSE	BIAS
BUENA VISTA - D1	3.67	-2.67
HUARMEY - D1	2.38	-1.81
<b>MALVAS - D1</b>	<b>1.69</b>	<b>0.67</b>
<b>BUENA VISTA - D2</b>	<b>1.94</b>	<b>0.09</b>
CHAMANA – D2	2.06	1.21
<b>HUARMEY - D2</b>	<b>1.85</b>	<b>-1.09</b>
<b>MALVAS - D2</b>	<b>1.94</b>	<b>0.21</b>
<b>MALVAS – D3</b>	<b>1.46</b>	<b>0.64</b>

**Tabla 32: Resultados de validación de los modelos empíricos para el tiempo de pronóstico cinco (T5) y para los tres dominios (D1 y D2)**

ESTACIÓN	RMSE	BIAS
BUENA VISTA - D1	3.81	-2.64
HUARMEY - D1	2.62	-1.27
<b>MALVAS - D1</b>	<b>1.47</b>	<b>0.74</b>
POMABAMBA – D1	2.11	-1.21
<b>BUENA VISTA - D2</b>	<b>1.96</b>	<b>-0.38</b>
HUARMEY - D2	2.14	-0.72

#### **4.2. VALORIZACIÓN ECONÓMICA PARA EL PRONÓSTICO DE HELADAS AGRONÓMICAS EN LOS CULTIVOS DE PAPA Y MAÍZ AMILÁCEO**

Teniendo en cuenta que nuestro segundo objetivo específico es: “valorización económica el pronóstico de temperaturas mínimas (enfocada en las heladas agronómicas) en los cultivos de papa y maíz amiláceo durante la campaña agrícola 2016/2017”. Se consideró como supuestos lo siguiente:

- La ecuación empírica de pronóstico de la estación Malvas en el dominio 1 (D1) fue la única significativa al 95 por ciento en los diferentes tiempos o días de pronósticos (T2, T3, T4 y T5) y teniendo en cuenta que los datos históricos de rendimiento del cultivo de papa y de maíz amiláceo se tiene a nivel departamental, se consideró a la ecuación empírica de Malvas-D1 como la representativa para toda la región de

Ancash.

- Que la producción agrícola solo está influenciada por la temperatura mínima, máxima, precipitación y la ocurrencia de heladas agronómicas.

#### **4.2.1. Efectos de las heladas agronómicas en la producción agrícola del cultivo de papa y de maíz amiláceo**

##### **a. Para el cultivo de Papa**

La ecuación 18, relaciona el rendimiento del cultivo de papa ( $Y$ ) con las variables meteorológicas de temperatura mínima ( $TMIN$ ), temperatura máxima ( $TMAX$ ) y el acumulado de precipitación ( $PP$ ) durante la campaña agrícola que se desea evaluar y la ocurrencia de más de 50 heladas agronómicas ( $\theta$ ) para el cultivo de papa (temperaturas menores a 5,8 °C para la papa) de esa misma campaña agrícola. (Ver Tabla 11).

$$Y = 7709.8 + 182.2 * TMAX - 64.1 * TMIN + 0.9 * PP - 1565.3 * \theta \dots(18)$$

Los efectos de las variables meteorológicas en el rendimiento del cultivo se ven reflejados en los signos de los parámetros asociados a las variables de temperatura máxima y mínima, precipitación y heladas agronómicas. De esta manera, se tiene que la temperatura máxima y precipitación presenta coeficiente positivo, lo cual nos indica que el comportamiento de esta variable genera un aumento en la producción del cultivo. Por lo contrario, los coeficientes de la temperatura mínima y las helada agronómicas ( $\theta$ ) llevan el signo negativo, es decir, ocasionan disminuciones en los niveles de producción. Es preciso mencionar, que la ocurrencia de más de 50 heladas agronómicas (temperaturas mínimas inferiores o iguales a 5.8 °C) genera la pérdida en la producción que se muestra en la ecuación 20 y que con una temperatura mínimas superior a 7,3 °C, temperatura máxima inferior a 16 °C y un acumulado de lluvia inferior a 256 mm durante la campaña agrícola (septiembre – febrero) genera pérdidas en el rendimiento del cultivo de papa.

La ventaja de la ecuación planteada, es que la producción del cultivo de papa está relacionada con los factores climáticos y a la ocurrencia de heladas agronómicas. Por consiguiente nos da una idea que tanto se puede perder bajo la ocurrencia de este evento.

A continuación se detallan los resultados de la regresión lineal múltiple que se realizó en Excel para obtener la ecuación 20. Donde podemos observar que el coeficiente de determinación es 0.97, valor que nos indica que las variables independientes explican la variable dependiente en un 97 por ciento. Por otro lado, la prueba estadística de Fisher nos indica que el F calculado (57.23) es mayor al F (3.26), este resultado nos lleva aceptar los coeficientes de las variables independientes (Ver Tabla 33 y Anexo 4).

**Tabla 33: Resultados de la regresión del modelo de producción de la papa**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<b>Coeficiente de correlación múltiple</b>	0.88
<b>Coeficiente de determinación R<sup>2</sup></b>	0.97
<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	0.95
<b>F calculado</b>	57.23
<b>F tabular</b>	3.26

Una vez que se aceptó la ecuación de rendimiento del cultivo de papa, se procedió a encontrar el valor normal de rendimiento kg/ha (Y) en años que no hubo presencia de heladas agronómicas o hubo menos de 50 episodios de heladas agronómicas; y la normal de rendimiento en años que si hubo heladas agronómicas (kY). Esto se puede verificar en la tabla 34, donde se puede apreciar que la normal en años que no hay heladas agronómicas es de 10335.9 kg/ha y en años con presencia de heladas agronómicas es de 8785.0 kg/ha; teniéndose en promedio una pérdida (L) de 1550.9 kg/ha cada año que hay heladas.

**Tabla 34: Rendimiento promedio del cultivo de papa en años normales y con presencia de heladas agronómicas**

<b>Rendimiento en Kg/ ha del cultivo de papa</b>	
<b>Rendimiento en años normales (Y)</b>	10335.9
<b>Rendimiento en años con presencia de heladas agronómicas (kY)</b>	8785.0

El valor de k es igual 0.85.

FUENTE: Elaboración Propia

**b. Para el cultivo de maíz amiláceo**

La ecuación 19 muestra la relación que tiene el rendimiento (kg/ha) del cultivo de maíz amiláceo (Y) con las variables meteorológicas de temperatura mínima (TMIN), máxima (TMAX) y acumulado de precipitación (PP) y con la ocurrencia de heladas agronómicas (variable ficticia  $\theta$  que toma valores de “0” si no ocurre, y “1” si ocurre) durante la campaña agrícola que se está evaluando (Ver tabla 11):

$$Y = 1972.6 - 41.6 * TMAX - 4.4 * TMIN - 0.1 * PP - 67.4 * \theta \dots\dots ..(19)$$

Se puede verificar que las variables meteorológicas no son suficientes para explicar el rendimiento del cultivo de maíz, debido a que todos los coeficientes presentan signos negativos. Cabe resaltar, que en las pruebas estadísticas y a un nivel de significancia del 95 por ciento, los coeficientes de correlación múltiple, coeficiente de determinación y la prueba estadística F; resultaron poco significativas; por lo que, el segundo objetivo específico (valorización económica del pronóstico de temperaturas mínimas en el cultivo de maíz amiláceo) no se pudo cumplir (Ver anexo 5).

**4.2.2. Información del pronóstico de temperaturas mínimas con énfasis en las heladas agronómicas en el cultivo de papa**

Como se mencionó líneas arriba, se consideró la estación de Malvas, como la ecuación representativa para toda la región de Ancash. Entonces, se contabilizó el número de días que se pronosticó temperaturas mínimas por debajo de los 5.8 °C, los cuales fueron 9 días de los 96 pronostico, sin embargo la estación Malvas registró 16 días con

temperaturas menores a 5.8 °C en toda la campaña agrícola 2016/2017 (septiembre del 2016 a febrero del 2017).

#### 4.2.3. Determinación del modelo de decisión

En la Tabla 35 se muestra el problema de toma de decisiones para el cultivo de papa, en términos de rendimiento Kg/ha. La toma de acciones preventivas en caso suceda las heladas agronómicas es primordial, debido a que queda demostrado que cuando un agricultor decide tomar acciones, las pérdidas expresadas en rendimiento del cultivo será aproximadamente de 1033.6 Kg/ha, mientras que cuando no se tiene información o no se toma ninguna acción la pérdida es mayor e igual a 1550 Kg/ha (Ver Tabla 35 y 10).

**Tabla 35: Matriz de Payoff para la producción del cultivo de papa, bajo la ocurrencia de más de 50 heladas agronómicas durante las campañas agrícolas**

Acción	estado de la naturaleza	
	ocurrencia de evento de heladas ( $\theta=1$ )	no ocurrencia de evento de heladas ( $\theta=0$ )
<b>tomar acciones preventivas ante la ocurrencia de heladas</b>	Perdida de la producción debido a la toma de acciones preventivas. $\gamma L = 1033.6 \text{ Kg/ha}$	Perdida de la producción debido a la toma de acciones preventivas. $\gamma L = 1033.6 \text{ Kg/ha}$
<b>no tomar ninguna acción preventiva</b>	Perdida de la producción debido a la ocurrencia del evento. $L=1550 \text{ kg/ha}$	no hay pérdida de producción (0)

Donde  $\gamma$  es igual a 0.67 y  $\alpha$  igual a 0.9.

FUENTE: Elaboración Propia

#### 4.2.4. Valor económico del pronóstico de temperaturas en la campaña agrícola 2016/2017 para el cultivo de papa

Para evaluar económicamente el pronóstico de temperaturas mínimas menores a 5.8 °C (helada agronómica para el cultivo de papa) durante la campaña agrícola 2016/2017 se tuvo que verificar cuantos aciertos y desaciertos se presentaron en los resultados del pronóstico de la ecuación empírica; asimismo, como ya se mencionó el cultivo de papa se ve afectada con la ocurrencia de más de 50 días de heladas agronómicas. Este último

se verifica al momento de hallar la ecuación de rendimiento del cultivo de papa (ecuación 18), donde se obtiene un  $R^2$  igual a 0.97.

**Tabla 36: Tabla de contingencia de las ecuaciones empíricas en el pronóstico de temperaturas mínimas por debajo de 5.8 °C (heladas agronómicas para el cultivo de papa)**

Eventos pronosticados	Eventos observados		
	Si	No	total
Si	<b>9</b>	<b>7</b>	16
No	<b>21</b>	<b>59</b>	68
total	30	66	96

La Tabla 36, nos muestra la tabla de contingencia de los aciertos y desaciertos que se tuvo con el pronóstico de temperaturas mínimas menores a 5.8 °C en la estación de Malvas durante la campaña agrícola 2016/2017. Donde podemos verificar que a pesar de que la estación Malvas paso la validación, solo pronostico 9 heladas agronómica (temperaturas menores 5.8 °C) de los 30 eventos que se registraron (es decir solo acertó 30 por ciento de eventos registrados) durante la campaña agrícola 2016/2017. Por la cantidad de días con temperaturas mínimas menores a 5.8 °C no se puede usar la ecuación de rendimiento de la papa (ecuación 18), debido a que esta ecuación fue validada con la ocurrencia de 50 a más días con temperaturas mínimas menores a 5.8 °C.

## V. CONCLUSIONES

Conclusiones de acuerdo a los objetivos específicos planteados:

- De la determinación de los modelos empíricos de pronóstico de temperaturas mínimas que resultaron estadísticamente significativos y pasaron la validación fueron las estaciones de Huarmey, Malvas, Santiago Atunes de Mayolo, Cabana, Chamana, Chiquian y Buena Vista. En contraste, la mayoría de las estaciones y en los diferentes tiempos de pronóstico y dominio no pasaron todas las pruebas estadísticas respectivas, llegándose a verificar que las ecuaciones empíricas para el tiempo cinco fueron las que menos pasaron estos criterios, este debido a la incertidumbre que está asociado al tiempo de pronóstico.
- De la valorización económica del pronóstico de temperaturas mínimas relacionado a la producción de papa, solo se obtuvo el modelo de decisión más no la valorización económica durante el periodo agrícola 2016/2017. El modelo de decisión del agricultor nos muestra que bajo un escenario de ocurrencia de más de 50 heladas agronómicas durante la campaña agrícola se tiene una pérdida en la producción de 1550 Kg/ha si no se tomó ninguna acción preventiva; mientras que cuando el agricultor toma acciones preventivas ante la ocurrencia de heladas agronómicas solo se perderá 1033.6 kg/ha.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda el uso del modelo regional BRAMS para estudios de caso, debido a que se puede manejar diferentes resoluciones en los tres dominios que presenta.
- Se recomienda validar con más datos a las ecuaciones empíricas de la presente investigación así como evaluar la capacidad de pronóstico, dado que en el punto de validación hay pocas estaciones que poseen capacidad predictiva.
- Con respecto a la valorización económica del pronóstico meteorológico aplicado en la agricultura, se recomienda utilizar los pronósticos climáticos, ya que estos son con más tiempo de anticipación y el agricultor puede tomar acciones más favorables para su cultivo; asimismo involucrar en la ecuación de rendimiento, a variables agronómicas como enfermedades o plagas

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avalos, R.G. 2006. Validación del pronóstico de precipitación del modelo regional Eta durante periodos secos y lluviosos. Tesis Ing. Meteorólogo. UNALM. Lima, Perú.
- Baeza, G. 1993. Las heladas y su incidencia económica en la agricultura de Murcia. Papeles de Geografía. Universidad de Murcia. p. 37-51.
- Billiet, D.; Fernandez, M. 2008. Caracterización Agroclimática de las heladas en Salta. XII Reunión Argentina de Agrometeorología. San Salvador, Argentina.
- Campos, D. 2005. Agrometeorología Cuantitativa del Cultivo. Mexico. Trillas.
- Clark, T.L. 1977. A small-case dynamic model using a terrain-following coordinate transformation. Journal Comput. Phys. 24, p. 186-215.
- Correa, M.K. 2015. Evaluación del tropical rainfall measuring mision (TRMM) en la aplicación de índices de sequias en Lima y Ancash. Tesis Ing. Meteorólogo. UNALM Lima, Perú.
- Delgado, P. 2011. Optimización del Modelo Aermod Mediante el Modelo de Mesoescala Brams para la Dispersión de SO<sub>2</sub> de una Fuente Puntual. Tesis Ing. Ambiental. UNALM. Lima, Perú.
- Dirección General de Información Agraria. 2008. Calendario de Siembras y Cosechas. Lima, Perú.
- Elías, F.; Castellvi, F. 2001. Agrometeorología. 2da ed. Madrid. Mundi-Prensa.

- Fairlie, T.; Ortega, A. 1995. Efecto de la presencia de heladas simuladas en diferentes estados fenológicos y su impacto en el rendimiento de la papa cv Ccompis: Estudio preliminar. Revista Latinoamericana de la Papa. p. 86-93.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2010. Protección contra las Heladas: fundamentos, práctica y economía. Roma.
- Fuentes, Y. 2000. Iniciación a la Meteorología y la Climatología: La Helada. 1a ed. España. Ediciones Paraninfo.
- Gal-Chen, T.; Somerville, R. 1975. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations. J. Comput. Phys. 17 (2): 209-228.
- García, G.T. 2001. Condiciones Agroclimáticas en el departamento de Ancash. Tesis Ing. Meteorólogo. UNALM. Lima, Perú.
- Golding, B.; Mylne, K.; Clark, P. 2004. The history and future of numerical weather prediction in the Met Office. Royal Meteorological Society. Vol. 59, N° 11, p. 299–306.
- Gomez-Limón, A.; Arriaza, M.; Riesgo L. 2003. An MCD analysis of agricultural risk aversión. ELSEVIER. p. 569-585.
- Hernandez, L. 1994. Tipología, Genesis y desarrollo de las heladas en el valle medio del Ebro. Geographica, 31, 95-114.
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). 2007. Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda. 474 p. disponible en: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1136/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1136/libro.pdf)
- López, B.L. 2012. Evaluación de la calidad del pronóstico numérico de tiempo

en la ciudad de México. México.

- López, L.A. 2004. La predicción del tiempo a partir de modelos numéricos. Revista de aficionados a la meteorología. Colombia.
- Loyola, R.; Orihuela, C. 2010. El costo Económico del Cambio Climático en la agricultura Peruana: El Caso de la Región Piura y Lambayeque. UNAML-consorcio de investigación económica y social.
- Mahrer, Y.E.; Pielke, R.A. 1977. A Numerical Study of the Airflow over Irregular Ter- rain, Beitrage zur Physik der Atmospharic, V.50, p.98-113.
- Matías, L.; Fuentes, O.; García, F. 2007. Heladas. Centro Nacional de Prevención de Desastres Secretaría de Gobernación–CENAPRED. México.
- Mendoza, H. 2013. Correlación estadística entre el periodo libre de heladas y la temperatura superficial media del Golfo de México asociado con “La Niña” en la zona central de Veracruz. Tesis Lic. Ciencias Atmosféricas. Universidad Veracruzana. Veracruz, México.
- MINAN. 2010. El Perú y el Cambio Climático: Segunda Comunicación Nacional del Perú la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Lima, Perú.
- ODEPA. 2013. Estudio: “Cambio Climático en la Agricultura Heladas y Sequía”. Santiago de Chile.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 1992. Vocabulario meteorológico internacional. 2da ed. 471 p. disponible en: [http://www.wmo.int/pages/prog/hwrr/publications/international\\_glossary/385\\_I\\_GH\\_2012.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrr/publications/international_glossary/385_I_GH_2012.pdf)
- Palacios-Huerta, I. 2003. An empirical analysis of the risk properties of human

capital returns. *American Economic Review* 93 (3), 948–964.

- Pereyra, A.; Angelocci, R.; Senteihas, P. 2002. *Agrometeorología: Fundamentos e Aplicaciones Prácticas*. Brasil: livraria e editora agropecuaria Guaiba.
- Pereyra, D.; Zitacuaro, I.; Palma, B. 1990. *Heladas en el Cofre de Perote: Tecnicas de Protección*. Univercidad Veracruzana. 45 p.
- Quiroga, S.; Cerda, E.T. 2010. *Economic Value of weather forecasting: The role of risk aversion*. Springer. 1-20.
- Quiroga, S.; Garrote, L.; Fernandez-Haddad, Z.; Iglesias, A. 2011. *Vauling drought information for irrigation farmers: potential development of a hydrological risk insurance in Spain*. *Sapin Journal of Agricultural Research*. 17 p.
- Quiroga, S.; Garrote, L.; Iglesias, A.; Fernandez-Haddad, Z.; Schlickenrieder, J.; De Lama, B.; Mosso, C.; Sánchez-Arcilla, A. 2011. *The economic value of drought information for water management under climate change: a case study in the Ebro basin*. *Natural Hazards and Earth Sistem Sciences*. p. 1-15.
- Quiroga, S.; Iglesias, A. 2009. *A Comparison of the climate risks of cereal, citrus, grapevine and olive production in Spain*. *Elselvier*. p. 91-100.
- Rubio, O.; Noriega, R.; Espinoza, S. 2014. *Simulación de la Precipitación en Mezo Escala para la Región del Perú*. *Revista Científica del Departamento Académico de Matemáticas*. Perú.
- Sanabria, J.; García, J.; Lhomme, J.P. 2006. *Calibración y validación de modelos de pronóstico de heladas en el valle del Mantaro*. *ECIPERU*. p. 18-21.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 1988. *Mapa de Clasificación Climática del Perú*. Lima, Perú.

- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2010. Atlas de Heladas. 2da ed. Lima, Perú.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2011. Validación del modelo de calidad del aire BRAMS/TEB en el área metropolitana de Lima. Geo-Atmósfera RPGA. p. 125-133.
- Straschnoy, J.; Di Bella, C.; Jaimes, F.; Orichio, P.; Rebella C. 2006. Caracterización Espacial del Estrés Hídrico y de las Heladas en la Región Pampeana a partir de información satelital y complementaria. INTA. Argentina. p. 117-141.
- Sutizal, S.B. 2017. Modelos empíricos para pronóstico de temperaturas mínimas en periodos de inicio y fin de campaña agrícola. Tesis Ing. Meteorólogo. UNALM. Lima, Perú.
- Tripoli, G.J.; Cotton, W. R. 1982. Three-Dimensional Cloud/Mesoscale Model. Part I: General Theoretical Framework and Sensitivity Experiments. J. Rech. Atmos. 16, p.185-219.
- Vergara, R. 2011. Variabilidad climática, percepción ambiental y estrategias de adaptación de la comunidad campesina de Conchucos, Ancash. Tesis Lic. Geografía y Medio ambiente. Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Vidal, P. 1996. Geografía del Perú: Las Ocho Regiones Naturales. 2da. Ed. Lima, Perú. Peisa S.A.
- Wilks, D. 2006. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. 1a ed. Vol. 91. ELSEVIER. 627 p.

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1: Scrip desarrollado en Grads para extraer las temperaturas del aire en cada punto de estación y por cada dominio del modelo BRAMS

```
'reinit'
'c'
i=1
while (i<=3)
say i

'open 10a117de12de2013_g'i'.ctl'

a=1
while (a <= 30)
say a

**** Cabana
if (a=1);lata=-8.38;lona=-78.01;lab='Cabana';endif
****Sihuas
if (a=2);lata=-8.57;lona=-77.65;lab='Sihuas';endif
*** Pomabamba
if (a=3);lata=-8.78;lona=-77.47;lab='Pomabamba';endif
** ** Yungay
if (a=4);lata=-9.15;lona=-77.75;lab='Yungay';endif
**** Buena Vista
if (a=5);lata=-9.43;lona=-78.20;lab='Buenavi';endif
**** Pariacoyo
if (a=6);lata=-9.63; lona=-77.89;lab='Pariacoto';endif
**** Cajamarquilla
if (a=7);lata=-9.63; lona=-77.74;lab='Cajamarq';endif
**** Santiago Atunes de Mayolo
if (a=8);lata=-9.52; lona=-77.52;lab='Santiagoam';endif
* ** Aija
if (a=9);lata=-9.78;lona=-77.61;lab='Aija';endif
* ** Recuay
if (a=10);lata=-9.73;lona=-77.45;lab='Recuay';endif
* ** Huarmey
if (a=11);lata=-10.08; lona=-78.17;lab='Huarmey';endif
* ** Malvas
if (a=12);lata=-9.93; lona=-77.65;lab='Malvas';endif
* ** Chamana
if (a=13);lata=-10.21; lona=-77.56;lab='Chamana';endif
* ** Chiquian
if (a=14);lata=-10.15; lona=-77.15;lab='Chiquian';endif

'set lat 'lata
'set lon 'lona
'set xlopts 1 1 0.14'
*'set z 1'
;*set t 1 last'
;* nom='lab'_i'.dat'
;*say nom

tt=1
while (tt <= 169)
```

...continuación

```
        'set t 'tt
        say tt
        'q dims'
        lin = sublin(result,4)
        t = subwrdr (lin,9)
        lin = sublin(result,4)
        t= subwrdr(lin,6)

*****
        'd tempc'
        tempc=subwrdr(result,4)
*****
        rc1=tt
        rc2=tempc
        rec=rc1' 'rc2
        ;*dummy=write('lab'_i'.dat'," " tt " " tempc " ",append)
        ;*dummy=write('nom',rec,append)
        dummy=write('lab'_i'.dat',rec,append)
        tt=tt+1
    endwhile

    a=a+1
endwhile

i=i+1

'close 1'
endwhile
```

## ANEXO 2: Ejemplo de extracción del cuarto día de pronóstico para los tres dominios. Script en lenguaje de programación R para la estación meteorológica de Pomabamba

```
### cuarto día de pronóstico para los 3 dominios
##### posición considerada 68-75
rm(list=ls())
ruta <- setwd("G:/tesis/00z")
dire <- getwd()
setwd(dire)
print(dire)

VEC<-c("Pomabamba_2")
data<-matrix(NA,ncol=1,nrow=57)
colnames(data)<-VEC
library("tidyr", lib.loc=~R/win-library/3.3")

ld<- list.dirs(path=dire, recursive = FALSE)
car <- data.frame(x=c(ld))
df <- car %>% separate(x,c("A","B","c","d"))
for (i in c(1:57)) {
  print(ld[i])
  dire<-ld[i]
  setwd(dire) # fijo el nuevo directorio de trabajo
  dato<-read.table(paste("Pomabamba_2.dat"),header= T, as.is= T,sep = " ")
  data[i]<-matrix(min(dato[69:76,2]))
}
x1 <- as.matrix(cbind(df$d,data))

##### posición 62- 69
#rm(list=ls())
ruta <- setwd("G:/tesis/06z")
dire <- getwd()
setwd(dire)
print(dire)

VEC<-c("Pomabamba_2")
data1<-matrix(NA,ncol=1,nrow=12)
colnames(data1)<-VEC

ld<- list.dirs(path=dire, recursive = FALSE)
car1 <- data.frame(x1=c(ld))
df1 <- car1 %>% separate(x1,c("A","B","c","d"))

for (i in c(1:12)) {
```

...continuación

```
print(ld[i])
dire<-ld[i]
setwd(dire) # fijo el nuevo directorio de trabajo
dato1<-read.table(paste("Pomabamba_2.dat"),header= T, as.is= T,sep = " ")
data1[i]<-min(dato1[63:70,2])
}
x2 <-as.matrix(cbind(df1$d,data1))
A <- rbind(x1,x2)
```

**ANEXO 3: Tabla de valores críticos de coeficiente de correlación de Pearson**

n	0,10	0,05	0,01
3	0,988	0,997	1,000
4	0,900	0,950	0,990
5	0,805	0,878	0,959
6	0,729	0,811	0,917
7	0,669	0,754	0,874
8	0,622	0,707	0,834
9	0,582	0,666	0,798
10	0,549	0,632	0,765
11	0,521	0,602	0,735
12	0,497	0,576	0,708
13	0,476	0,553	0,684
14	0,458	0,532	0,661
15	0,441	0,514	0,641
16	0,426	0,497	0,623
17	0,412	0,482	0,606
18	0,400	0,468	0,590
19	0,389	0,456	0,575
20	0,378	0,444	0,561
21	0,369	0,433	0,549
22	0,360	0,423	0,537
23	0,352	0,413	0,526
24	0,344	0,404	0,515
25	0,337	0,396	0,505
26	0,330	0,388	0,496
27	0,323	0,381	0,487
28	0,317	0,374	0,479
29	0,317	0,374	0,479
30	0,306	0,361	0,463
35	0,282	0,333	0,428
40	0,264	0,312	0,402
45	0,248	0,296	0,381
50	0,235	0,276	0,361
60	0,214	0,254	0,330
70	0,198	0,235	0,305
80	0,185	0,220	0,286
90	0,174	0,208	0,270
100	0,165	0,196	0,256

**ANEXO 4: Resultados de la regresión lineal múltiple en la ecuación de producción del cultivo de papa, a nivel de confianza del 95 por ciento**

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<b>Regresión</b>	4	4250879.81	1062719.95	57.23	0.000020
<b>Residuos</b>	7	129971.11	18567.30		
<b>Total</b>	11	4380850.92			

	<b>Coefficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
<b>Intercepción</b>	7709.8	834.2	9.2	0.0	5737.2	9682.4
<b>TMAX</b>	182.2	53.2	3.4	0.0	56.3	308.1
<b>TMIN</b>	-64.1	56.6	-1.1	0.3	-197.8	69.6
<b>PP</b>	0.9	0.7	1.2	0.3	-0.8	2.6
<b><math>\theta</math></b>	-1565.3	121.8	-12.9	0.0	-1853.2	-1277.3

**ANEXO 5: Resultados de la regresión lineal múltiple en la ecuación de producción del cultivo de maíz amiláceo, aun nivel de confianza del 95 por ciento**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<b>Coefficiente de correlación múltiple</b>	0.60
<b>Coefficiente de determinación R<sup>2</sup></b>	0.36
<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	0.00
<b>Error típico</b>	53.99
<b>Observaciones</b>	12.00

<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<b>Regresión</b>	4	11504.3	2876.1	1.0	0.5
<b>Residuos</b>	7	20402.4	2914.6		
<b>Total</b>	11	31906.7			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<b>Intercepción</b>	1972.6	427.7	4.6	0.0	961.2	2984.1
<b>θ</b>	-67.4	43.8	-1.5	0.2	-170.9	36.1
<b>TMIN</b>	-4.4	22.7	-0.2	0.9	-57.9	49.2
<b>PP</b>	-0.1	0.3	-0.3	0.8	-0.7	0.6
<b>TMAX</b>	-41.6	29.3	-1.4	0.2	-111.0	27.7