UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES

CARRERA DE INFORMÁTICA

TESIS DE GRADO

MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL PRONÓSTICO DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CULTIVOS DE MAÍZ DE LA LOCALIDAD DE PALCA

para obtener el Título de Licenciatura en Informática

Mención Ciencias de la Computación

POR: GIOVANNKA NINOSKA ANTIA OLIVER FERRUFINO

TUTOR METODOLÓGICO: M.SC. ALDO VALDEZ ALVARADO

ASESOR: M.Sc. FRANZ CUEVAS QUIROZ

LA PAZ – BOLIVIA

2020

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE INFORMÁTICA

LA CARRERA DE INFORMÁTICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES PERTENECIENTE A LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

a) visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
b) copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
c) copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la referencia correspondiente respetando normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADOS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

Un sueño no es algo que ves, un sueño es algo que conviertes en una realidad, es algo que persigues con extrema determinación, ahora mientras empiezo a caminar hacia el futuro tendré todos y cada uno de mis recuerdos universitarios en el corazón, hasta que alcance el lugar de ensueño que he imaginado, jamás me rendiré, algún día cuando llegue el momento de mirar hacia atrás el camino que he recorrido, veré que soy fuerte y que no me he rendido, como las flores que se abren en el campo, uno de estos días nos veremos aquí de nuevo, así que hasta entonces jamás me rendiré.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la oportunidad de seguir viviendo para convertir mis sueños en realidad. A mis queridos padres, Mario y Rocío por su infinita paciencia y amor, por todo su apoyo, sus sabios consejos y por confiar en mí cuando más lo necesitaba.

A mi hija Voyheska, por estar siempre a mi lado y ser mi fuente de inspiración, resistencia y constancia.

A mi hermano Gunnar por alentarme en todo lo que hacía y estar a mi lado.

A mis queridos Tíos Carmen Ferrufino de Osuna y Richard Osuna por todo el apoyo brindado, a su gran cariño y sus oportunos consejos.

A mi tutor, M. Sc. Aldo Ramiro Valdez Alvarado, un profundo agradecimiento, por su guía, su resistencia y tenacidad en el proceso de elaboración de mi tesis, por su paciencia, por su apoyo y por compartir conmigo las luces de sus conocimientos.

A mi asesor, M. Sc. Franz Cuevas Quiroz, por su incontable paciencia, consejos, sugerencias y correcciones. Sin su guia jamás lo hubiera logrado.

A mi amigo José Blas Ralde por aceptar compartir este viaje juntos y siempre estar ahí brindándome su apoyo incondicional, por su gran paciencia y su inmensa terquedad, “no hubiera sido sencillo sin ti”.

A mi amigo M.Sc. Victor Blanco Durán por su amistad y asesoría académica tan acertada en momentos de mayor necesidad.

A la Universidad Mayor de San Andrés y a la Carrera de Informática donde conocí excelentes docentes, quienes me dieron las alas para volar lejos al compartir sus conocimientos con toda paciencia y transmitirme los valores éticos y profesionales que me guiaran toda la vida, lugar donde conocí amistades eternas y a todas esas personas que cada día compartieron conmigo el camino hacia el éxito quiero decirles desde el fondo de mi corazón…¡Muchas gracias!

RESUMEN

En la localidad de Palca, provincia murillo del departamento de La Paz, Bolivia, la gran mayoría de la población se dedica a la siembra y cosecha del maíz blanco o “yurac xara”, como forma de ganarse el sustento.

Debido al cambio climatológico a nivel mundial y a la falta de información entre los pobladores de la localidad sobre los efectos de este cambio y el impacto que esto tiene en los cultivos de maíz, en los últimos años esta siembra ha sido realizada por los pobladores en épocas inconvenientes y por lo tanto la cosecha ha diezmado mucho.

La presente tesis de grado intenta dar apoyo en este aspecto a los pobladores de la localidad de Palca, otorgándoles una herramienta para el pronóstico al respecto de este cambio climático y un análisis del impacto de dicho cambio en el cultivo de maíz, al mismo tiempo se ofrece un modelo de simulación para dicho pronóstico.

En la parte teórica se explica detalladamente, los métodos matemático-estadísticos, técnicas y herramientas, que se utilizaron para la elaboración de la tesis de grado.

En la parte aplicativa se realiza el procedimiento detallado en la parte teórica obteniendo el pronóstico deseado, se da el análisis de los resultados obtenidos en su relación con el cultivo del maíz y las conclusiones respectivas.

Por último, se realiza la implementación del modelo de simulación obteniendo un software en matlab, el cual utiliza los datos obtenidos del pronóstico.

Palabras clave: simulación, pronóstico, series de tiempo, cambio climático, cultivos de maíz.

SUMMARY

In the town of Palca, in the province of La Paz, Bolivia, the vast majority of the population is dedicated to planting and harvesting white corn or “yurac xara”, as a way to earn a living.

Due to the global climate change and the lack of information among the local residents about the effects of this change and the impact this has on corn crops, in recent years this planting has been carried out by villagers in times inconveniences and therefore the harvest has decimated a lot.

The present thesis tries to give support in this aspect to the inhabitants of the town of Palca, giving them a tool for the forecast regarding this climate change and an analysis of the impact of said change on the corn crop, at the same time offers a simulation model for this forecast.

The theoretical part explains in detail, the mathematical-statistical methods, techniques and tools, which were used for the elaboration of the thesis.

In the application part, the detailed procedure is carried out in the theoretical part, obtaining the desired prognosis, the analysis of the results obtained in relation to the corn crop and the respective conclusions are given.

Finally, the implementation of the simulation model is obtained by obtaining a software in matlab, which uses the data obtained from the forecast.

Keywords: simulation, forecast, time series, climate change, corn crops .

ÍNDICE

CAPÍTULO I 1
MARCO INTRODUCTORIO 1
1.1 ANTECEDENTES 2
1.1.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 2
1.1.2 ANTECEDENTES DEL MUNICIPIO DE PALCA 4
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 5
1.3 PROBLEMA CENTRAL 8
1.4 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS 8
1.4.1 OBJETIVO GENERAL 8
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 9
1.5 HIPÓTESIS 9
1.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES 9
1.6.1. VARIABLE INDEPENDIENTE 9
1.6.2. VARIABLE DEPENDIENTE 9
1.6.3. VARIABLE INTERVINIENTE 9
1.7 JUSTIFICACIÓN 10
1.8 ALCANCES Y LÍMITES 11
1.8.1 ALCANCES 11
1.8.2 LÍMITES 11
1.9 METODOLOGÍA 12
1.9.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN 12
1.9.2 METODOLOGÍA DE INGENIERIA 12
CAPÍTULO II 14
MARCO TEÓRICO 14
2.1 SIMULACIÓN 14
2.2 MODELOS DE SIMULACIÓN 14
2.2.1 TIPOS DE MODELOS DE SIMULACIÓN 14
2.2.1.1 MODELO ESTOCÁSTICO 14
2.3 METODOLOGÍA 15
2.3.1 METODOLOGÍA DE DESCOMPOSICIÓN 15

2.4 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN 18
2.5 PRONÓSTICO 19
2.6 PRONÓSTICOS BASADOS EN MODELOS DE SIMULACIÓN 20
2.7 PRONÓSTICOS BASADOS EN EL ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO 21
2.8 CAMBIO CLIMÁTICO 21
2.9 IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL MAÍZ Y SU CULTIVO 22
2.10 CARÁCTERÍSTICAS GENERALES DEL CULTIVO DE MAÍZ 22
2.10.1 MORFOLOGÍA BÁSICA DEL CULTIVO 24
2.10.2 REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS DEL CRECIMIENTO DEL MAÍZ 24
2.11 CORRELACIÓN DE SPEARMAN 25
2.12 HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA LA SIMULACIÓN 26
2.12.1 MATLAB 26
2.12.2 AQUACROP 27
CAPÍTULO III 28
MARCO APLICATIVO 28
3.1 DESARROLLO 28
3.2 ANÁLISIS DEL PRONÓSTICO DEL CLIMA 28
3.3 ANÁLISIS DE LA COSECHA DEL MAÍZ, AÑOS 2009 AL 2019. 35
3.3.1 DATOS GENERALES DEL DESARROLLO DEL MAIZ BLANCO 37
3.4 MODELO DE SIMULACIÓN PARA LA COSECHA DEL MAÍZ 50
3.4.1 MODELO ESTÁTICO 50
3.4.2 MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA 56
3.4.3 PRUEBA DE LA CORRELACIÓN DE SPEARMAN 58
CAPÍTULO IV 60
4. VALIDACIÓN DE LOS DATOS DEL CLIMA PRONOSTICADOS 60
4.1 VALIDACIÓN DEL PRONÓSTICO DE LOS DATOS DEL CLIMA 62
4.1.1 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS 62
4.1.2 NIVEL DE SIGNIFICANCIA 63
4.2. ESTADÍSTICO DE PRUEBA 63
4.3. PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV 63
4.4 VALIDACIÓN DEL PRONÓSTICO DE LA COSECHA DEL MAÍZ 66

4.5 TOMA DE DECISIÓN 69
CAPÍTULO V 70
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 70
5.1 CONCLUSIONES 70
5.2 RECOMENDACIONES 70
VI. BIBLIOGRAFÍA 72

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG.1. 1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA LOCALIDAD DE PALCA 6
FIG.2. 1 FACTOR DE LA TENDENCIA EN LAS PRECIPITACIONES DE PALCA 16
FIG.2. 2 COMPONENTE CÍCLICO SOBRE LA TEMPERATURA MÍNIMA DE PALCA 17
FIG.2. 3 COMPONENTE CÍCLICO SOBRE LA TEMPERATURA MÍNIMA DE PALCA 17
FIG.2. 4 PLANTAS DE MAÍZ EN DESARROLLO 25
FIG.3. 1 GRÁFICO DE LA TENDENCIA AJUSTADA DE TEMPERATURA MÍNIMA 30
FIG.3. 2 GRÁFICO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA PRONOSTICADA 30
FIG.3. 3 GRÁFICO DEL PRONÓSTICO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA 31
FIG.3. 4 GRÁFICO DE LA TENDENCIA AJUSTADA DE TEMPERATURA MÁXIMA. 32
FIG.3. 5 GRÁFICO DEL PRONÓSTICO PARA LAS PRECIPITACIONES 33
FIG.3. 6 GRÁFICO DE LA TENDENCIA AJUSTADA DE TEMPERATURA MÁXIMA. 34
FIG.3. 7 GRÁFICO DEL DEL PRONÓSTICO DEL CLIMA 34
FIG.3. 8 GRÁFICO DE LA PRODUCCIÓN DEL MAÍZ EN LA LOCALIDAD DE PALCA 36
FIG.3. 9 GRÁFICO COSECHA DE MAÍZ POR AÑO VS. CANTIDAD DE HE. SEMBRADAS. 37
FIG.3. 10 GRÁFICO LA TEMPERATURA MÍNIMA EN LOS AÑOS 1972-2019 38
FIG.3. 11 GRÁFICO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA POR AÑOS 41
FIG.3. 12 GRÁFICO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA POR AÑOS 42
FIG.3. 13 GRÁFICO DE LAS PRECIPITACIONES POR AÑO 45
FIG.3. 14 MODELO DE SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ 55
FIG.3. 15 GRÁFICA GENERADA POR EL MODELO DE SIMULACIÓN 55
FIG.3. 16 RESULTADO DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ 57
FIG.4. 1 GRÁFICO DEL CLIMA 62
FIG.4. 2 GRÁFICO DE LA SIMULACIÓN DEL PRONÓSTICO DEL CLIMA 62
FIG.4. 3 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL AJUSTE DE DATOS 64
FIG.4. 4 APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV 65
FIG.4. 5 APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV A LA TEMP. MÁXIMA 65
FIG.4. 6 APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE KOLMOGÓROV-SMIRNOV EN LAS PRECIPITACIONES 66
FIG.4. 7 GRÁFICO DEL ANÁLISIS DE LOS DATOS DEL PRONÓSTICO DE LA COSECHA DE MAÍZ 67

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA. 3. 1 COEFICIENTES PARA EL FACTOR CÍCLICO 29
TABLA. 3. 2 DATOS OBTENIDOS PARA LA TEMPERATURA MÍNIMA EN ºC 31
TABLA. 3. 3 DATOS OBTENIDOS PARA LA TEMPERATURA MÁXIMA EN [°C] 32
TABLA. 3. 4 DATOS OBTENIDOS PARA LAS PRECIPITACIONES EN [MM] 33
TABLA. 3. 5 DATOS DE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN LA LOCALIDAD DE PALCA 36
TABLA. 3. 6 DATOS DE LA TEMPERATURA MÍNIMA DE 1972-2019 39
TABLA. 3. 7 DATOS DE LA TEMPERATURA MÁXIMA AÑOS 1973-2019 43
TABLA. 3. 8 DATOS DE LA PRECIPITACIÓN PARA LOS AÑOS 1973-2019 46
TABLA. 3. 9 DATOS PRONOSTICADOS PARA LAS TEMPERATURAS Y PRECIPITACIÓN 47
TABLA. 3. 10 DATOS REALES OBTENIDOS DEL SENAMHI Y DATOS PRONOSTICADOS DEL AÑO 201958
TABLA.4. 1 PRONÓSTICO GENERADO POR EL MODELO DE SIMULACIÓN 60
TABLA.4. 2 DATOS REALES Y PRONOSTICADOS SOBRE LA TEMPERATURA MÍNIMA EN PALCA 61
TABLA.4. 3 RELACIÓN DE HECTÁREAS Y PRODUCCIÓN 68
TABLA.4. 4 RESULTADO DEL ANÁLISIS 68

CAPÍTULO I

MARCO INTRODUCTORIO

En Bolivia el desarrollo se ha ido vinculando estrechamente a la agricultura y ésta a su vez, depende de los factores climáticos y de la gran influencia que los últimos años ha tenido el efecto de Cambio Climático en los cultivos ya que la mayoría de los sistemas productivos se desarrollan a secano, por este motivo la investigación y desarrollo de técnicas que permitan aminorar las catástrofes que conllevan estos cambios climáticos son muy importantes.

"En los valles bolivianos donde el maíz se desarrolla, el impacto de las variaciones climáticas se siente incluso sin el efecto del Cambio Climático, ya teniendo en cuenta este efecto las consecuencias suelen ser mucho más desastrosas. Siendo este cultivo de extrema importancia en la seguridad alimentaria, es necesario estimar los posibles impactos de estos cambios en las actuales áreas productivas". (Tellería, 2015)

Bolivia es un país con una gran variedad de cultivos de maíz, papa, haba y arvejas, al mismo tiempo estos son productos muy importantes para la dieta de los bolivianos ya que se los consume en diferentes maneras, tanto en su presentación natural como en forma de harinas. (Achacollo et al, 2012).

En la localidad de Palca del departamento de La Paz que es un valle productor del maíz (en su variedad de maíz blanco), la principal actividad en agricultura es la siembra de maíz, de esta manera la población de la mencionada localidad basa sus principales ingresos económicos en esta actividad. Por lo tanto, el cuidado de los cultivos de maíz es crucial para las personas que se dedican a su cultivo y cosecha.

A este respecto, el cambio climático ha cobrado relevancia en lo referente a los aspectos sobre actividades humanas en los últimos años y su efecto sobre los sectores agrícolas, los bruscos cambios de temperatura debido al efecto producido por el cambio climático, está causando efectos

negativos en su crecimiento y por lo tanto en la producción al registrarse temperaturas bastante bajas seguidas de temperaturas bastante altas combinadas con frecuentes precipitaciones fluviales fuera de estación, esto en desmedro del agricultor y de la población en general.(Galindo, 2009).

El presente trabajo plantea un modelo de simulación para el pronóstico de la cosecha del maíz en base al análisis y posterior pronóstico del efecto que ejerce el cambio climático sobre los cultivos de ese producto de la localidad de Palca, usando modelos matemáticos y estadísticos para este fin.

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Los orígenes de la predicción del tiempo se remontan prácticamente a los orígenes de la humanidad. Ya nuestros ancestros, al observar la bóveda celeste, comenzaron a establecer primitivas reglas de predicción, basadas en las tonalidades del cielo, en el tipo de nubes o, algo más tarde, en el lugar de procedencia del viento. Fueron dándose cuenta de que los cambios en el aspecto del cielo solían traducirse en cambios de tiempo. Esto era importante para ellos, ya que su supervivencia dependía en gran medida del factor ambiental. (Viñas, 2013).

Ya en el año 1950 gracias a ENIAC, la primera computadora electrónica de la historia. En realidad, ENIAC nació algo antes, en 1943, en la Universidad de Pensylvania, aunque no terminó de construirse hasta 1946. Uno de sus principales impulsores fue el matemático John Von Neumann (1903-1957), quien pronto se dio cuenta de que el problema de la predicción meteorológica era ideal para probar las capacidades de ENIAC. La predicción meteorológica que llevó a cabo ENIAC, Charney, Von Neumann, Fjörtoft y el resto de miembros de su equipo emplearon 33 días, con sus respectivas noches, en programar y ejecutar tres predicciones para un plazo de 24 horas. Lo que les llevó más tiempo fue, sin duda, la programación. Obtuvieron una evolución futura del movimiento medio de la troposfera, conocida gracias a las observaciones tomadas de forma periódica. Aquello fue el pistoletazo de salida del desarrollo de los modelos meteorológicos, una carrera que aún no ha terminado, ya que los actuales modelos no paran de mejorar, ganando en

complejidad cada día que pasa junto con el avance en las nuevas tecnologías. Todo ello ha ido siendo posible gracias a la extraordinaria capacidad de cálculo que, en poco más de 60 años, han ido adquiriendo los ordenadores. (Viñas, 1990).

En el año 2014 se desarrolló en la ciudad de México D.F la aplicación del modelo EPIC para evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el rendimiento de grano en maíz de temporal, donde se estudió el rendimiento de grano de maíz de temporal para las regiones Altos-Sur y Ciénega de Jalisco. (Flores et al, 2014).

A continuación, se presentan algunos trabajos similares de investigación de pronósticos y en su implementación para modelos de simulación de los últimos años:

El año 1994 en Bolivia es creado el Sistema Regional de Modelamiento del Clima (PRECIS) por el Laboratorio de Física de la Atmósfera del Instituto de Investigaciones Físicas de la Universidad Mayor de San Andrés, hoy en día es dirigida por diferentes profesionales del ámbito científico según sus respectivas investigaciones, los cuales se dedican a la investigación y al análisis del clima y la influencia del efecto del cambio climático en diferentes áreas geográficas del país. (Andrade, Blacutt & Seiler, 2010).

El año 2013 se presentó una Tesis titulada Modelo Predictivo para la Evaluación del Impacto Ambiental en Proyectos Basados en la Matriz de Leopold en la Universidad mayor de San Andrés. Tesis presentada por Karla Sánchez. El cual tomo como ámbito de investigación el tema de Gestión Ambiental desde un punto de vista sistémico, tesis en la cual se combinaron la gestión ambiental con la informática. Esto en relación a que en dicha tesis se exhorta a emprender acciones encaminadas a la conservación y mejoramiento del ambiente para garantizar el derecho a un medio ambiente sano, regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, regular las acciones de mitigación y adaptación al cambio climático y reducir la vulnerabilidad de las

poblaciones y los ecosistemas del país frente a los efectos adversos del cambio climático en general. (Sánchez, 2015).

El año 2017 en el Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana San Pablo de la ciudad de Cochabamba, Bolivia se presentó un artículo científico referente a los escenarios de cambio climático y sistematización de tecnologías campesinas e innovaciones tecnológicas contra las heladas donde se analiza la producción agrícola y como se enfrenta problemas climáticos adversos, entre estos las heladas que provocan disminución o pérdida en las cosechas de los cultivos afectando la economía familiar campesina analizando los escenarios del cambio climático y su influencia en diversos cultivos entre estos el maíz.(García, Delfín & Azero, 2017)

El año 2017 se creo En España, en la ciudad de Barcelona una empresa privada de nombre La Andaluza ec2ce, que ha desarrollado una innovadora tecnología propia para crear modelos predictivos de plagas y de productividad de las cosechas, basada en el uso de Inteligencia Artificial y Big Data para crear dichos modelos predictivos, especialmente en cultivos de alto valor para ellos tales como el olivo y la vid o la horticultura. Con una facturación de 120.000 este año y previsión de duplicarla en 2017. (Romanos, 2017).

1.1.2 ANTECEDENTES DEL MUNICIPIO DE PALCA

Las pérdidas de los cultivos de maíz mencionados en el subtítulo anterior también afectaron al municipio de Palca del departamento de La Paz, Bolivia, el cual no cuenta con cifras oficiales sobre dichas pérdidas y ningún tipo de estudio formal o informal al respecto, por lo tanto se tuvo que realizar una encuesta aleatoria a los agricultores de maíz dicha localidad, donde el 100% de los encuestados afirma que tuvieron pérdidas en su cosecha del maíz blanco en los últimos 5 años las cuales fueron mucho más marcadas que en años anteriores y el 95% de ellos concuerdan con que dichas pérdidas en las cosechas se deben a un cambio en el clima, teniendo un 3% que indicaron otras causas y un 2% que no sabe a qué se debe esto.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El seguimiento de los valores de temperatura tiene importancia por sus impactos en la agricultura y por supuesto, en consideraciones ambientales y en relación con el cambio climático, de ahí la gran importancia del desarrollo de herramientas científicas y tecnológicas que coadyuven a que el efecto del cambio climático en la agricultura sea mínimo para esto el ser humano ha ido investigando y modelando diferentes mecanismos tanto científicos como tecnológicos para la realización del pronóstico en el cambio climático y de esa manera aminorar el daño que este fenómeno causa en la agricultura implementando políticas de prevención acorde a los resultados de la investigación.(Nelson et al, 2009).

Estos valores de temperatura que tienen relación con el cambio climático, influyen también en Bolivia pese a no ser una potencia en la agricultura, "Bolivia sin ser un país contaminador global, a escala planetaria sería responsable de solo el 0.03% de la contaminación mundial, sin embargo, es uno de los países andinos tanto o más afectados que los demás países; los suelos agrícolas del altiplano, valles, trópico y chaco ya muestran evidencias de salinización, y degradación. A principios del 2007, ocurrió una afectación severa por el cambio climático con lluvias muy fuertes e intensas, las cuales afectaron aproximadamente a 40.000 familias, o el equivalente a 200.000 personas, en ocho de sus nueve departamentos, el nivel de catástrofe subió ya que las perdidas colaterales por este hecho llegaron a millones". (Camacho, 2017).

Las pérdidas ocurridas debido al cambio climático en Bolivia se encuentran en estadísticas de la sequía de la campaña agrícola 2016/2017 de 8 departamentos afectados con los siguientes datos; 172 municipios afectados; 162,631 familias damnificadas; 607,532 ha de cultivos de maíz afectadas de las cuales el 69% (423,759 Ha) fueron reportadas como superficie perdida todo esto debido al cambio climático. (UCRMDRyT, 2010).

Al respecto de estas pérdidas en los cultivos de maíz , el INE (Instituto Nacional de Estadística), en gestiones 2012/13, menciona que el departamento de La Paz, ocupa el segundo lugar en la

producción de maíz blanco en Bolivia, con 7.65%, indicando que en los últimos años hubo un incremento en superficie y no en producción, en comparación de la gestión 2003/04 que ocupaba el sexto lugar con 3.53% con superficie cultivable de 1.215 Ha, teniendo una producción 3.086 Tn; en la gestión 2012/2013 alcanzó una superficie de 582 Ha, pero una producción de 1.646 Tn. También se indica que, el principal cultivo agrícola de la localidad de Palca del departamento de La Paz, es el maíz y que la venta de este producto a su vez es la principal fuente de ingreso económico para los comunarios de dicha localidad. (Instituto Nacional de Estadística, 2018).

La localidad de Palca se encuentra en una cabecera de valle pasando las localidades de Ovejuyo y Uni desde La Paz. Se encuentra a unas dos horas de la ciudad de La Paz en las faldas del Illimani y el Mururata.(wiki, 2020).

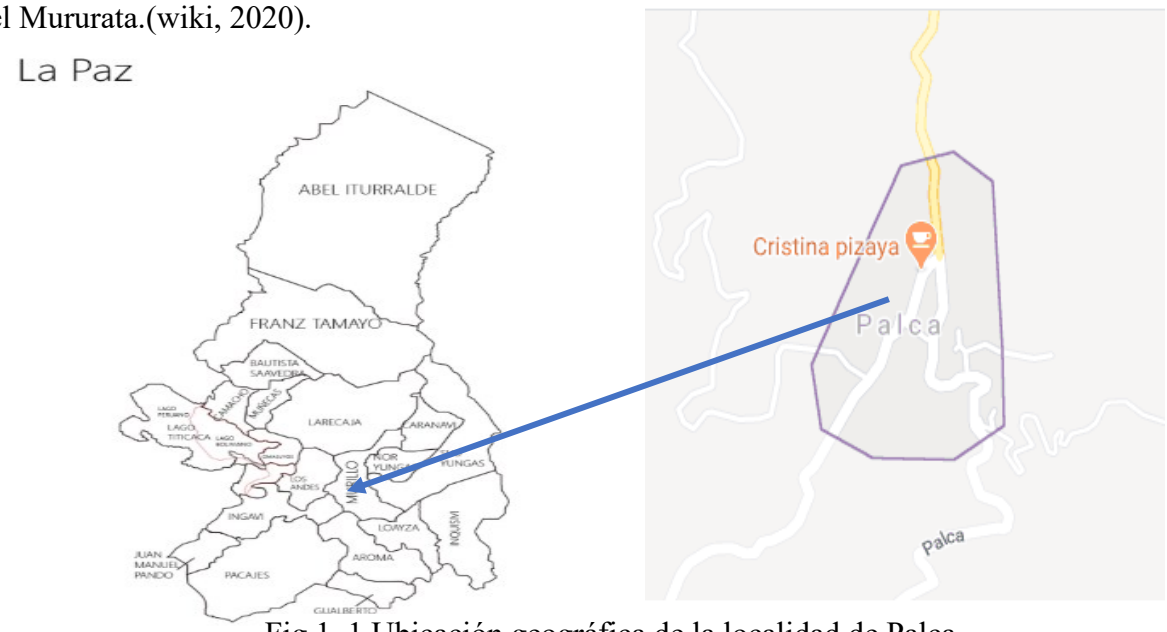


Fig.1. 1 Ubicación geográfica de la localidad de Palca

Fuente. Atlas Wikipedia, 2020

La temperatura media anual en la localidad de Palca es de 13,4ºC. El promedio de temperaturas máximas es 22,4°C y la temperatura mínima promedio es de 5°C. El promedio anual de precipitaciones es de 557 mm, gran parte de la cual cae intensamente desde noviembre a marzo. junio y julio son los meses más secos y fríos. (Senamhi,2018)

Por todo lo mencionado anteriormente se han identificado algunos problemas emergentes al cambio climático en relación a los cultivos de maíz en la localidad de Palca, los cuales se pasa a detallar:

- Las pérdidas en la cosecha de maíz en los últimos años se han incrementado y por lo tanto los comunarios dedicados a la siembra de este cultivo están perdiendo ingresos indispensables, por ser esto su principal fuente de ingresos económicos.

- La alcaldía de la localidad de Palca no ayuda a la comunidad a minimizar las pérdidas en la cosecha de maíz de dicha localidad, esto por falta de herramientas que le sirva de guia para este propósito y por este motivo no puede canalizar sus recursos para mejorar la producción.

- No se puede determinar el cambio de temperatura en la localidad de Palca lo que ocasiona que los periodos óptimos de siembra y cosecha para el cultivo de maíz hayan variado con los años.

- La época de precipitaciones en la localidad de Palca ha ido variando con el tiempo y los comunarios que usan los saberes ancestrales para la siembra y cosecha, siguen sembrando el maíz en los meses de agosto y septiembre, lo que ocasiona que la planta de maíz se vea afectada en su desarrollo y producción por la escases de dichas precipitaciones las cuales ocurren actualmente en otro periodo de tiempo.

1.3 PROBLEMA CENTRAL

Teniendo en cuenta que, el aumento de la temperatura del planeta provocado por las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero derivadas de la actividad del ser humano, están provocando variaciones en el clima que de manera natural no se producirían a dichas variaciones llamaremos cambio climático.

A este respecto del cambio climático bajo la perspectiva anteriormente descrita se tiene que: "Las observaciones y conocimientos ancestrales de predicción climática son utilizados para la toma de decisiones en la actividad agrícola en las comunidades rurales. De acuerdo con Ponce (2003), la predicción del clima tiene su origen en la herencia cultural de los pueblos prehispánicos y constituye parte fundamental del sistema de conocimientos de esta cultura en lo que corresponde al desarrollo de las actividades productivas. Es una práctica vigente en las comunidades campesinas, que consiste esencialmente en la observación e interpretación de diferentes estados fenológicos de plantas silvestres, comportamiento de aves e insectos, fenómenos astronómicos y físicos que llevan al campesino finalmente a la toma de decisiones orientadas hacia el inicio de las siembras. Aun así, hoy en día las comunidades requieren complementar estos conocimientos con otros que se basan en el uso de modelos y observaciones meteorológicas modernas además de las festividades tradicionales de las comunidades campesinas". (PNUD, 2011).

Producto de todo lo anteriormente mencionado el problema central es:

¿Cómo determinar el efecto que tiene el cambio climático en la producción y cosecha del maíz en la localidad de Palca del departamento de La Paz, Bolivia?

1.4 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Plantear un modelo de simulación para el pronóstico de la cosecha de maíz, basado en el análisis del cambio climático en la localidad de Palca del departamento de La Paz, Bolivia.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Se deben minimizar las pérdidas en la cosecha de maíz debido al cambio climático.
- Proporcionar a la Alcaldía de Palca un instrumento que le sirva de guia a fin de que puedan destinar los recursos económicos necesarios para minimizar las perdidas en la cosecha de maíz.
- Determinar los cambios de temperatura a futuro en la localidad de Palca.
- Determinar las fluctuaciones en las precipitaciones fluviales a futuro en la localidad de Palca.

1.5 HIPÓTESIS

El cambio climático en la localidad de Palca disminuye la producción de maíz en un promedio del 2% anuales.

1.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

1.6.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Diseño de un modelo matemático para el pronóstico de la cosecha de maíz en base al análisis del cambio climático sobre los cultivos de maíz.

1.6.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Planteo y aplicación de un modelo de simulación para el pronóstico de la cosecha de maíz en base al análisis de la influencia del cambio climático sobre los cultivos de maíz.

1.6.3. VARIABLE INTERVINIENTE

Modelos matemáticos del pronóstico de las temperaturas medias máximas y mínimas, así como de las precipitaciones existentes en la localidad de Palca.

1.7 JUSTIFICACIÓN

La simulación del modelo para pronóstico trae como beneficios para la localidad de Palca el ahorro de recursos económicos; tales como la compra de equipos, herramientas necesarias y el empleo de personal para realizar el estudio del comportamiento del clima y su consiguiente efecto en los cultivos, así como el pronóstico de sus cosechas.

Con el uso de la simulación para pronóstico de la cosecha de maíz también se ganó tiempo, ya que se puede predecir procesos que demorarían años en ser analizados en tan solo minutos y, de esa manera, tomar acciones preventivas ante los problemas que requieren atención para salvaguardar los cultivos

La localidad de Palca fué beneficiada con el uso del modelo de simulación para pronóstico de la cosecha de maíz, ya que pueden hacer frente a los problemas que surjan.

La Alcaldía del Municipio de Palca también se visto beneficiada ya que puede canalizar mejor sus recursos económicos puesto que obtiene información sobre el clima y su efecto en los cultivos de maíz de la localidad con anticipación sin la necesidad de contratar personal especializado para esto, beneficiando así a toda la población y tomando las medidas preventivas necesarias para evitar pérdidas, pues la población de este municipio se mantiene gracias a la producción que recolectan.

Para la elaboración del presente trabajo se aborda diferentes áreas de estudio, entre las que podemos mencionar las matemáticas, ya que primeramente se plantea un modelo matemático con procesos estocásticos para el comportamiento del clima y un margen de confiabilidad aceptable en ellos. Por otro lado, se incursiona en la simulación en el momento de aplicar los resultados, lo que permitirá aplicar el modelo matemático para el pronóstico de la cosecha de maíz con mayor efectividad.

Los resultados obtenidos contienen información del área estadística, clima y agricultura, los mismos podrán ser utilizados en las diferentes áreas y aplicados a nuevas ramas dentro de la informática.

1.8 ALCANCES Y LÍMITES

1.8.1 ALCANCES

Los resultados se muestran en tablas y gráficos realizados para la localidad de Palca del departamento de La Paz, Bolivia, utilizando en ellos datos obtenidos del pronóstico tanto del cambio climático como del pronóstico de la cosecha de maíz.

1.8.1.1 ALCANCE POBLACIONAL

El presente trabajo tiene su centro de análisis en los cultivos de maíz.

1.8.1.2 ALCANCE TEMPORAL

El presente trabajo se realiza en base a datos meteorológicos obtenidos del Senamhi de 1972 al 2018 y datos obtenidos de las autoridades de la comunidad de la localidad de Palca sobre la cosecha de maíz del 2009 al 2018.

1.8.1.3 ALCANCE ESPACIAL

El presente trabajo se aplica dentro de la localidad de Palca del departamento de La Paz, Bolivia.

1.8.2 LÍMITES

Los límites del modelo de simulación para pronóstico son los siguientes:

- El modelo de simulación para pronóstico, no es aplicado a niveles de grandes extensiones territoriales o en todo el territorio boliviano debido a que no se cuenta con datos disponibles al respecto.

- Los resultados obtenidos están basados en factores climáticos, como la precipitación y la temperatura por lo que se produce una alta dependencia de los datos pronosticados, es importante señalar que si estos datos pronosticados no se llegaran a cumplir esto influirá de manera negativa en los resultados.

- No se tiene en cuenta el impacto que tendrá a nivel del cambio climático y su efecto sobre los cultivos de maíz, por los últimos catastróficos incendios ocurridos en la Chiquitanía.

- Para la implementación de este modelo se analizaron los datos meteorológicos obtenidos del Senamhi y los pronósticos obtenidos sobre las temperaturas medias mínimas y máximas junto con la precipitación media. También se toman en consideración los datos obtenidos de las cosechas de años anteriores, datos obtenidos de las autoridades de la localidad de Palca del departamento de La Paz, Bolivia. (Apéndice B).

1.9 METODOLOGÍA

1.9.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo tiene un enfoque cuantitativo, con base en la medición numérica y análisis estadístico, la técnica utilizada es descriptiva exploratoria lo que permitirá familiarizase con algo hasta el momento desconocido y se usará para describir la realidad del objeto de estudio, el método a usar es el hipotético deductivo porque se llega a conclusiones lógicas a partir del uso de esos datos numéricos, adecuados para modelo de simulación.

1.9.2 METODOLOGÍA DE INGENIERIA

La metodología utilizada para realizar el diseño del modelo de simulación para pronóstico del clima y del pronóstico en la cosecha de maíz en relación al tiempo transcurrido es la metodología de descomposición estacional, se elabora un pronóstico de una serie de tiempo con variación estacional, en la cual se emplea la regresión lineal donde se determinan la pendiente y la constante a usarse para el pronóstico, se determina el índice estacional de la serie de tiempo aplicando un

factor de corrección necesario, se realiza la desestacionalización de los datos para el pronóstico de los mismos. Las herramientas de apoyo utilizadas son el excel y el minitab para el cálculo de números, para la realización de la simulación del modelo estático se usó el PCA (Principal Component Análisis) para las componentes principales que son las variables de estado y sus ecuaciones. También se utiliza el software de matlab para la programación de la simulación del modelo estático en su paquete llamado Simulimk Para la simulación del modelo dinámico para el rendimiento de la cosecha de maíz se usó el software AquaCrop con los resultados obtenidos del modelo de simulación estático.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO
2.1 SIMULACIÓN

La simulación es un proceso de proyectar un modelo computacional de un sistema real y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender su comportamiento y evaluar estrategias para su operación. (Pegden, 1990).

De esta manera, podemos entender la simulación como un proceso amplio que engloba no sólo la construcción de un modelo, sino también todo un método experimental donde se busca, según Pegden:

- Describir el comportamiento del sistema.
- Construir teorías e hipótesis considerando las observaciones efectuadas.
- Usar el modelo para prever el comportamiento futuro, es decir, los efectos producidos por alteraciones en el sistema o por los métodos empleados en su operación.

2.2 MODELOS DE SIMULACIÓN

La experimentación puede ser un trabajo de campo o de laboratorio. El modelo de método usado para la simulación seria teórico, conceptual o sistémico. (Bijari, 1996).

2.2.1 TIPOS DE MODELOS DE SIMULACIÓN

2.2.1.1 MODELO ESTOCÁSTICO

Posee una o más variables aleatorias como entrada, lo que lleva a salidas aleatorias.

Es utilizado cuando por lo menos una de las características operacionales es dada por una función de probabilidad. Es por ello que las salidas de la simulación estocásticas deben ser tratadas como estimaciones estadísticas de las características reales de un sistema. Normalmente, son más complejos que los modelos determinísticos. Los simuladores Estocásticos como Arena y Simio, son capaces de imitar la aleatoriedad del sistema real a través de distribuciones probabilísticas, las

cuales representan matemáticamente las posibilidades de ocurrencia de todos los valores posibles para un determinado proceso del sistema. En conjunto con un sistema generador de números aleatorios como el denominado Método de Monte Carlo, u otros, los simuladores estocásticos permiten reproducir el comportamiento del sistema con todas las posibilidades y combinaciones y sin límite en el periodo de tiempo deseado por el usuario. (Meza, 2013).

2.3 METODOLOGÍA

La palabra metodología tiene su origen en el idioma griego, y se refiere al modelo aplicable que deben necesariamente seguir los métodos de investigación, aun cuando resulten cuestionables.

El término metodología se define como el grupo de mecanismos o procedimientos racionales, empleados para el logro de un objetivo**,** o serie de objetivos que dirige una investigación científica. Este término se encuentra vinculado directamente con la ciencia. (Canastuj, 2016).

La metodología ha obtenido diferentes definiciones o conceptos en diferentes campos y especialidades, aunque estos siempre han mantenido la esencia del concepto principal.

- Definición de Metodología. Ciencia que estudia los métodos del conocimiento.
- Definición de Metodología. Aplicación coherente de un método. Conjunto de métodos utilizados en la investigación científica.
- Definición de Metodología. Método, conjunto de operaciones. En pedagogía, estudio de los métodos de enseñanza.
- Lo que principalmente hace la metodología es estudiar los métodos para luego determinar sistematizarlo en una investigación o trabajo. (Agulló,1997).

2.3.1 METODOLOGÍA DE DESCOMPOSICIÓN

El Método de descomposición corresponde a una metodología para proyección o pronóstico que, como el nombre lo sugiere**,** descompone el comportamiento de una Serie de

Tiempo en tendencia, estacionalidad y ciclo, relacionando dichos componentes a través de la siguiente fórmula (multiplicativa):

$$\mathbf{s_{(T)} = T\ Y\ C}$$

Donde:

S= Valor pronosticado: Resultado final de los análisis

T= Factor de tendencia: Es la componente de largo plazo que constituye la base del crecimiento o declinación de una serie histórica. Las fuerzas básicas que producen o afectan la tendencia de una serie son: cambios en buscos en la temperatura, humedad, precipitaciones.

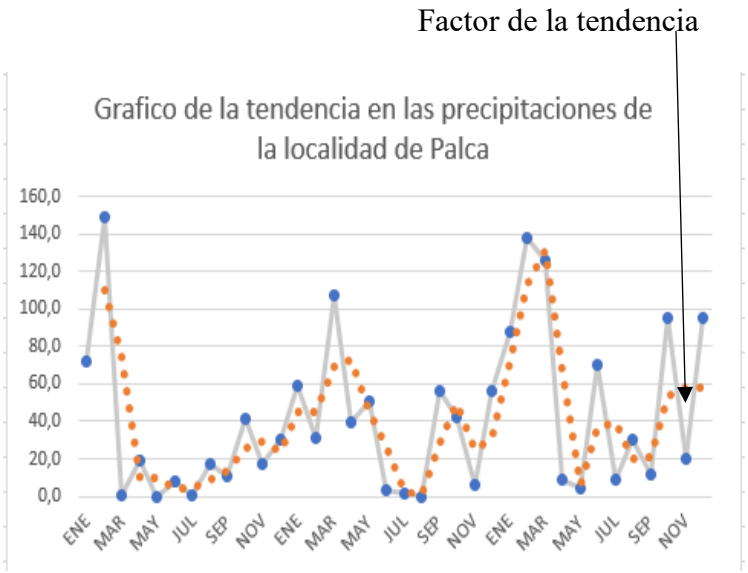


Fig.2. 1 Factor de la tendencia en las precipitaciones de Palca
Fuente. Senamhi,2018

C= Componente cíclico: Es un conjunto de fluctuaciones en forma de onda o ciclos, de más de un año de duración, producidos por cambios en las condiciones de las variables estudiadas.

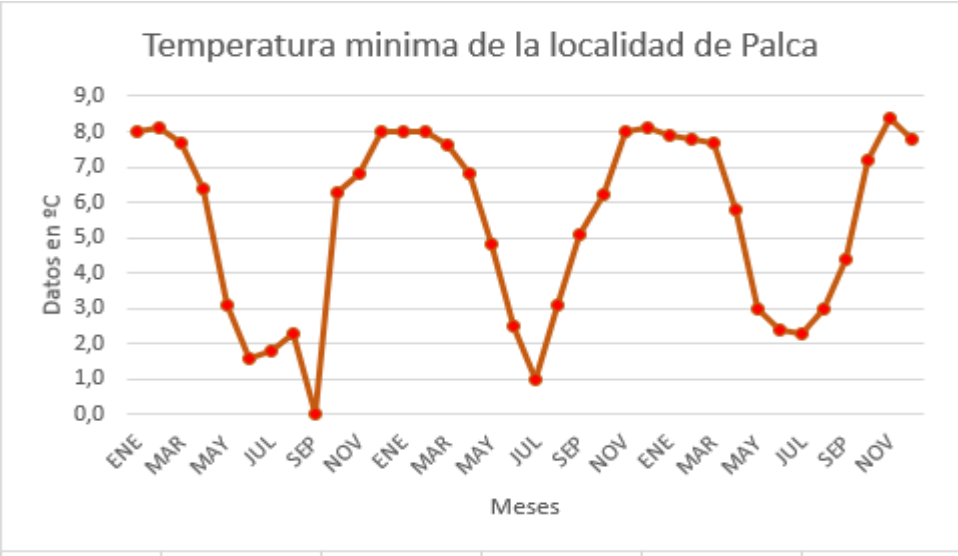


Fig.2. 2 Componente cíclico sobre la temperatura mínima de Palca
Fuente. Senamhi, 2018

Y= Componente estacional: Las fluctuaciones estacionales se encuentran típicamente en los datos clasificados por trimestres, mes o semana. La variación estacional se refiere a un patrón de cambio, regularmente recurrente a través del tiempo. El movimiento se completa dentro de la duración de un año y se repite a sí mismo año tras año.

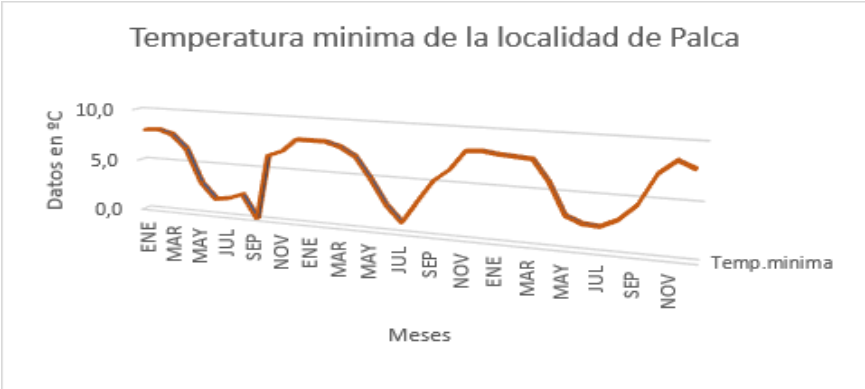


Fig.2. 3 Componente cíclico sobre la temperatura mínima de Palca
Fuente. Senamhi, 2018

2.4 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN

Se uso para el pronóstico de una serie de tiempo sobre la cual se tiene información histórica de un periodo de 3 años consecutivos.

Se debe calcular el factor de estacionalidad realizando el cociente entre el valor pronosticado según el promedio o media móvil simple y el valor real. Se calcula el factor de estacionalidad promedio para cada periodo.

Se ajusta cada factor promedio, multiplicándolo por un factor de estacionalidad K, calculado según la siguiente ecuación:

$$K = \frac{(\text{Número de observaciones por período}) * 100}{\sum \text{indices promedios}}$$

Se calcula la tendencia de la serie de tiempo mediante el método de las dos medias. Este método consiste en separar las observaciones en dos grupos (preferiblemente iguales) y calcular la media aritmética de cada uno de los grupos, obteniéndose así dos puntos. La línea de tendencia se halla entonces haciendo pasar una recta por los dos puntos hallados.

La recta que pase por los dos puntos se determinará analíticamente mediante la expresión general:

$$y = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} (t - t_1) + y_1$$

Se calcula el factor cíclico de la serie de tiempo histórica a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Factor Cíclico}_t = \frac{\text{Promedio Móvil}_t}{\text{Tendencia}_t}$$

Determinar el factor cíclico promedio para cada periodo.

El promedio móvil es un indicador de tendencias que se usan para realizar análisis de datos anteriores con la finalidad de formar una serie de medidas que provengan de diversos subconjuntos de datos. Este método consiste en atenuar los datos al obtener la media aritmética de cierto número

de datos históricos para obtener con este el pronóstico para el siguiente periodo. El número de datos a tomar en cuenta para calcular el pronóstico es decisión de la persona que realiza dicho pronóstico.

Cada uno de los puntos de una medida móvil referente a una serie temporal, se refiere a la media aritmética de una cantidad de puntos consecutivos de la serie, donde la cantidad de puntos se elegirá de tal forma que los efectos irregulares o estacionales se eliminarán.

$$P_{t+1} = \sum_{t=1}^{n} \frac{X_t}{n}$$

La media aritmética, también llamada promedio o media, de un conjunto infinito de números es el valor característico de una serie de datos cuantitativos, se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}$$

Luego de completado este último paso se realiza el pronóstico deseado utilizando la siguiente formula:

$$\mathbf{s_{(T)} = T\ Y\ C}$$

2.5 PRONÓSTICO

Los pronósticos se pueden clasificar en tres principales criterios:

- El primer criterio es el tiempo, es decir, existen pronósticos a corto y a largo plazo. Estos últimos ayudan a establecer el curso general de la organización en un plazo largo de tiempo, mientras que los primeros se utilizan para diseñar las estrategias que se utilizarán inmediatamente y serán ejecutadas por niveles medios en la organización. En esta tesis se utilizó un pronóstico a corto plazo.

- El siguiente tipo de criterio se relaciona directamente con la posición en cuanto al entorno micro y macro, y cómo es que aquí se generan diferentes tipos de detalles en una organización. Estos tipos de detalles son el micro pronóstico y el macro pronóstico. Un ejemplo de micro pronóstico es que el gerente de producción sepa cuanto se necesitará para la producción anual de un producto determinado, mientras que un macro detalle sería conocer el incremento en la carga tributaria (impuestos) que el gobierno aplicará en el siguiente año fiscal.

- El tercer tipo de criterio clasifica los pronósticos en cualitativos y cuantitativos, el primero se aplica cuando se emite el juicio de una persona, mientras que los cuantitativos se refieren a procesos mecánicos que dan como resultado datos matemáticos. (Aldanalisis, 2012).

2.6 PRONÓSTICOS BASADOS EN MODELOS DE SIMULACIÓN

Los diferentes métodos se pueden dividir en tres clases:

- El subjetivo: En el cual las opiniones individuales se procesan quizá de una manera complicada.

- El extrapolativo: En el cual se efectúan pronósticos para una variable en particular, usando únicamente la historia previa de esa variable. Se supone que los patrones identificados en el pasado se extienden hacia el futuro. A esto se le llama series históricas las cuales tienen un comportamiento cíclico.

- El causal (o estructural): En el cual se intenta identificar las relaciones entre variables que existieron en el pasado, por ejemplo, el volumen de precipitación pluvial y la humedad relativa existente. Luego, se supone que las relaciones continúan siendo válidas en el futuro, si estas no sufren un cambio importante a nivel externo no considerado como, por ejemplo, un evento catastrófico de la misma naturaleza, eventos creados por la mano del hombre. Los cuales no se contemplan en las relaciones de estructural. (Makridakis & Wheelwright, 1992).

2.7 PRONÓSTICOS BASADOS EN EL ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

Estos pronósticos incluyen los siguientes:

- Promedios móviles
- Promedio móvil ponderado
- Suavización exponencial
- Análisis de regresión
- Box Jenkins
- Series de tiempo de Shiskin
- Proyecciones de tendencia. (U.S.B Slides, 2009).

Para este caso en concreto se usará promedios móviles.

2.8 CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio de clima es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (CMNUCC, 1992).

El cambio climático es el mayor desafío de nuestro tiempo y nos encontramos en un momento decisivo. Desde pautas meteorológicas cambiantes, que amenazan la producción de alimentos, hasta el aumento del nivel del mar, que incrementa el riesgo de inundaciones catastróficas, los efectos del cambio climático son de alcance mundial y de una escala sin precedentes. Si no se toman medidas drásticas desde hoy, será más difícil y costoso adaptarse a estos efectos en el futuro (ONU, 2019).

Existen pruebas alarmantes de haber alcanzado o sobrepasado puntos de inflexión que darían lugar a cambios irreversibles en importantes ecosistemas y en el sistema climático del planeta. Ecosistemas tan diversos como la selva amazónica y la tundra antártica pueden estar llegando a umbrales de cambio drástico debido al calentamiento y a la pérdida de humedad. Los glaciares de montaña se encuentran en alarmante retroceso y los efectos producidos por el abastecimiento reducido de agua en los meses más secos tendrán repercusiones sobre varias generaciones futuras,

estas repercusiones tendrán un efecto catastrófico en las cosechas y en los cultivos en diversas partes del mundo, debido al cambio en el ecosistema. (ONU, 2019).

2.9 IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL MAÍZ Y SU CULTIVO

El impacto del cambio climático sobre el cultivo del maíz es fundamental para el desarrollo social y económico de los países. En el año 2009 el Banco Mundial señaló que, de los sectores económicos, el que probablemente sufrirá el impacto más directo e importante por los cambios graduales en la temperatura y la precipitación será la agricultura, la cual es una de las actividades determinantes en la evolución social, económica y cultural de muchos países incluyendo a México. (Hernández et al, 2011).

El informe sistematiza las publicaciones claves nacionales e internacionales que sobre el tema de cambio climático en Bolivia a escala nacional e internacional se han escrito y a las que se ha tenido la oportunidad de acceder. (UNDP,2018).

El maíz, en particular, tiene un protagonismo muy alto en la seguridad alimentaria, por su efecto directo en el alza del precio de la carne de pollo, leche, huevos y otros alimentos; además, este cereal es el alimento básico de muchas comunidades campesinas e indígenas, que lo consumen todos los días en una infinidad de platillos y bebidas.

2.10 CARÁCTERÍSTICAS GENERALES DEL CULTIVO DE MAÍZ

El origen del maíz es un problema aun no resuelto totalmente por los botánicos. Puesto que se desconoce en forma silvestre y parece cierto que esta planta se cultivaba ya en América en el periodo precolombino (Molano, 2011).

Hoy día el maíz es el segundo cultivo más importante del mundo por su producción, después del trigo, mientras que el arroz ocupa el tercer lugar. Es el primer cereal en rendimiento de grano por hectárea y es el segundo, después del trigo, en producción total.

Se indica que los principales departamentos productores de maíz son Santa Cruz, Chuquisaca, Tarija y Cochabamba, alcanzando el 92% del total de la producción nacional. (FAO, 2007).

La mayoría del maíz cosechado por debajo de los 1,000 [m] snm, producido en régimen de agricultura empresarial, se destina a la producción de alimentos para el ganado.

El Centro eco-fitogenético de Pairumani (departamento de Cochabamba) ha colectado y caracterizado más de 1,500 accesiones de maíz, recolectadas a partir de la década de los años 1970, estudiadas bajo el perfil ambiental, morfológico y citológico (características de los cromosomas) y clasificadas en 7 Complejos raciales, 45 razas y centenares de agro-ecotipos. Estas accesiones se encuentran guardadas en el Banco de germoplasma del Centro.

El desafío para cada productor es determinar sus factores limitantes y eliminar o minimizar su efecto, se debe planificar el cultivo con tiempo.

Los componentes de rendimiento en maíz son cuatro: número de plantas/Ha, número de mazorcas/Ha, número de granos/ mazorca y peso de los granos. Para lograr un buen resultado en cada uno de ellos es necesario realizar distintos manejos en el cultivo, el primer paso corresponde a la etapa de planificación del cultivo, el cual tiene que ver con el estado del clima adecuado.

La cosecha del tipo del Maíz blanco o “yurac xara”, es el que nos interesa analizar, ya que este es el que más se produce en la localidad de Palca.

El INE, en gestiones 2012/13, menciona que el departamento de La Paz, ocupa el segundo lugar en la producción de maíz blanco en Bolivia, con 7.65%, indicando que en los últimos años hubo un incremento en superficie y no en producción, en comparación de la gestión 2003/04 que ocupaba el sexto lugar con 3.53% con superficie cultivable de 1.215 Ha, teniendo una producción 3.086 Tn; en la gestión 2012/2013 alcanzó una superficie de 582 Ha, pero una producción de 1.646 Tn.(Centro Pairumani,2018).

2.10.1 MORFOLOGÍA BÁSICA DEL CULTIVO

El cultivo del maíz es de régimen anual. Su ciclo vegetativo oscila entre 80 y 200 días, desde la siembra hasta la cosecha. La estructura del maíz es la siguiente:

El grano de maíz maduro, la semilla, está compuesto por: la cubierta o pericarpio, el endospermo y el embrión o germen. (Dacsa, 2017).

Según los autores Dacsa, las tres partes del grano cumplen una función definida:

Su peso es de alrededor de 6% del peso total de grano, menciona que el maíz tiene un sistema radicular. Al germinar, emergen las raíces temporales o embrionarias que nacen en el primer nudo, las raíces permanentes que nacen en el segundo nudo de la plántula o nudo superior del mesocotilo y las raíces adventicias que emergen de los nudos basales de la planta en crecimiento activo.

El Tallo del maíz es una caña formada por nudos y entrenudos macizos, de longitud variable, gruesos en la base y de menor grosor en los entrenudos superiores. En cada nudo funciona la hormona que determina la erección de la caña.

El tallo del maíz difiere de otros cereales en que es sólido y lleno de medulas. Los nudos sirven para dar más resistencia al tallo, además son los puntos donde se forman todos los brotes laterales, tales como raíces, ramas (hijos), hojas y mazorcas, el número de los nudos varía de 8 a 25, con un promedio de 16 nudos.

2.10.2 REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS DEL CRECIMIENTO DEL MAÍZ

La temperatura óptima diurna para el crecimiento del maíz oscila de 21-25 ºC y temperatura nocturna no inferior a 14 ºC. (Gallardo, 2014).

Los factores que pueden afectar al cultivo son muchos y de distinta índole. Pero, sólo los factores climáticos y algunos factores específicos del suelo, como por ejemplo presencia de toscas y

pedregosidad, son imposibles de manejar, considerando los cultivos de invierno y los de verano, las preparaciones de suelo debieran concentrarse entre diciembre y principios de mayo dependiendo de la humedad del suelo, la cual es un factor muy importante al igual que la profundidad de la plantación y compactación de la misma. El factor climático puede tener efectos positivos como negativos en la siembra y cosecha del maíz si estos factores no son los más favorables. Si no se toman en cuenta dichos factores podría tener un efecto adverso (Fundación Chile, 2017)

Fig.2. 4 Plantas de maíz en desarrollo
Fuente. Elaboración propia

2.11 CORRELACIÓN DE SPEARMAN

Este coeficiente es una medida de asociación lineal que utiliza los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos y compara dichos rangos. Existen dos métodos para calcular el coeficiente de correlación de los rangos. (Martinez,2009).

En estadística, el coeficiente de correlación de Spearman, ρ (rho) es una medida de la correlación (la asociación o interdependencia) entre dos variables aleatorias (tanto continuas como discretas). Para calcular ρ, los datos son ordenados y reemplazados por su respectivo orden.

El estadístico ρ viene dado por la expresión:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N\ (N^2 - 1)}$$

donde *D* es la diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden de *x* - *y*. *N* es el número de parejas de datos.

Se tiene que considerar la existencia de datos idénticos a la hora de ordenarlos, aunque si éstos son pocos, se puede ignorar tal circunstancia.

Para muestras mayores de 20 observaciones, podemos utilizar la siguiente aproximación a la distribución t de Student

$$t = \frac{\rho}{\sqrt{(1 - \rho^2)/(n - 2)}}$$

La interpretación de coeficiente de Spearman es igual que la del coeficiente de correlación de Pearson. Oscila entre -1 y +1, indicándonos asociaciones negativas o positivas respectivamente, 0 cero, significa no correlación, pero no independencia. (Wikipedia, 2020).

2.12 HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA LA SIMULACIÓN

2.12.1 MATLAB

Este software fue utilizado para realizar el modelo de simulación del pronóstico del cambio climático en sus variables de temperaturas medias máximas y mínimas y de las precipitaciones en la localidad de Palca.

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, laboratorio de matrices) es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio(lenguaje M). Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. (Wiki, 2020).

Fig. 2.5 Imagen del icono del software de Matlab
Fuente. Imagen adaptada de IEEE web hosting

2.12.2 AQUACROP

AquaCrop es un modelo de simulación de crecimiento de los cultivos desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO para abordar la seguridad alimentaria y evaluar el impacto del medio ambiente y la gestión de los cultivos sobre la producción. AquaCrop simula la respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua y es particularmente adecuado para las condiciones en las que el agua es un factor limitante en la producción de cultivos. AquaCrop equilibra precisión, simplicidad y robustez. Utiliza un número relativamente pequeño de parámetros y variables que requieren métodos simples para su determinación, lo que simplifica su utilización en diferentes condiciones y localizaciones.

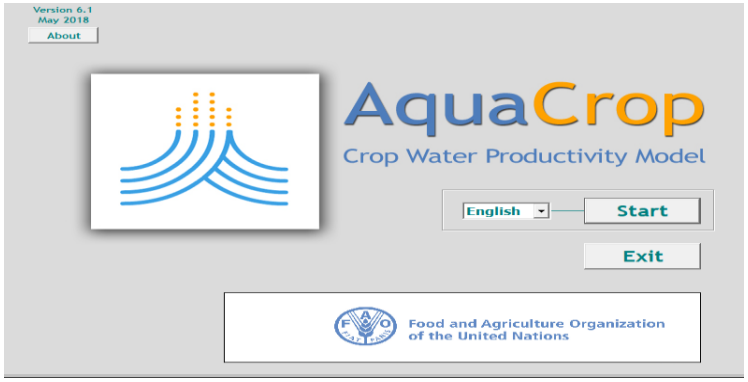


Fig. 2.6. Imagen del icono de AquaCrop
Fuente. Organización de las Naciones Unidas

CAPÍTULO III

MARCO APLICATIVO

3.1 DESARROLLO

3.2 ANÁLISIS DEL PRONÓSTICO DEL CLIMA

En el desarrollo de la presente tesis primeramente se realzó y analizó el pronóstico del clima a corto y mediano plazo en los cambios de temperatura y precipitaciones con relación al cambio climático y su posterior efecto en los cultivos de maíz de la localidad de Palca, ya sea este efecto positivo o negativo a través de un modelo matemático encontrado.

Se trabajó con datos obtenidos de 20 años sobre factores climáticos medios de temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones por los doce meses obtenidos del departamento del Senamhi.

Adicionalmente se tienen los datos de la superficie sembrada y de la cosecha de maíz por año de la localidad de Palca de 10 años consecutivos del 2009 al 2019 obtenidos de la alcaldía de Palca y de datos de la Junta de Vecinos de la localidad. (Apéndice A, B).

Para el cálculo del pronóstico de la temperatura mínima se utilizó lo siguiente:

El factor de corrección utilizado para pronosticar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\mathrm{K} = \frac{(\text{Número de observaciones por período}) * 100}{\sum \text{indices promedios}}$$

K= (12*100)/11,900847

$$\text{factor de corrección K} = 1{,}00833159$$

Para el cálculo del factor cíclico se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Factor Cíclico}_t\ C = \frac{\text{Promedio Móvil}_t}{\text{Tendencia}_t}$$

Se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla. 3. 1 Coeficientes para el Factor cíclico

	Coeficientes
Intercepción	74,475947
1	0,10266295

Fuente. Elaboración propia usando Excel

Datos fueron pronosticados mes por mes (para cada periodo), usando la fórmula:

$$\mathbf{s_{(T)} = T\ Y\ C}$$

S(t)= 6,04090

La ecuación de la tendencia ajustada encontrada para su representación es:

$$Y_t = 4{,}599 + 0{,}00431xt$$

De la forma:

$$Y_t = mt \pm b$$

La cual se calculó mediante el método de los mínimos cuadrados, utilizando las siguientes ecuaciones:

Pendiente: $$m = \frac{\sum_{t=1}^{n} t_t y_t - n\bar{t}\bar{y}}{\sum_{t=1}^{n} t_t^2 - n\bar{\bar{t}}.^2}$$(elevación/recorrido)

Corte con el eje Y: $$b = \bar{\bar{y}} - m\bar{t}$$

De donde t es el mes representado en número para este caso, n es la variable que representa el número de observaciones, m es la pendiente, y b es el coeficiente de posición.

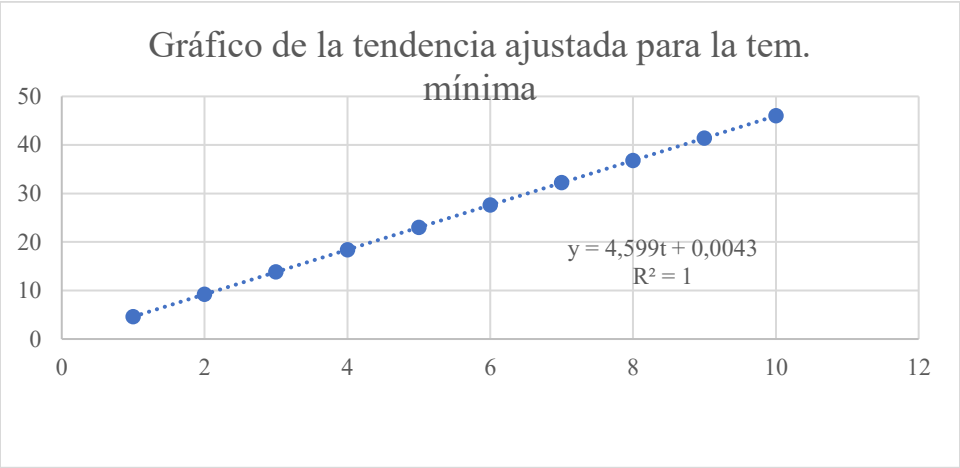


Fig.3. 1 Gráfico de la Tendencia Ajustada de Temperatura Mínima.
Fuente. Elaboración propia, 2019

Donde Y_t representa el resultado del pronóstico obtenido, t representa el número del mes en el cual se desea el pronóstico, contando como el primer mes el mes de enero del 2019 ya que dicha ecuación representa a la tendencia pronosticada en ese mes.

Este modelo de ecuación se obtuvo luego del análisis del pronóstico realizado para el año 2019, utilizando los datos obtenidos del Senamhi.

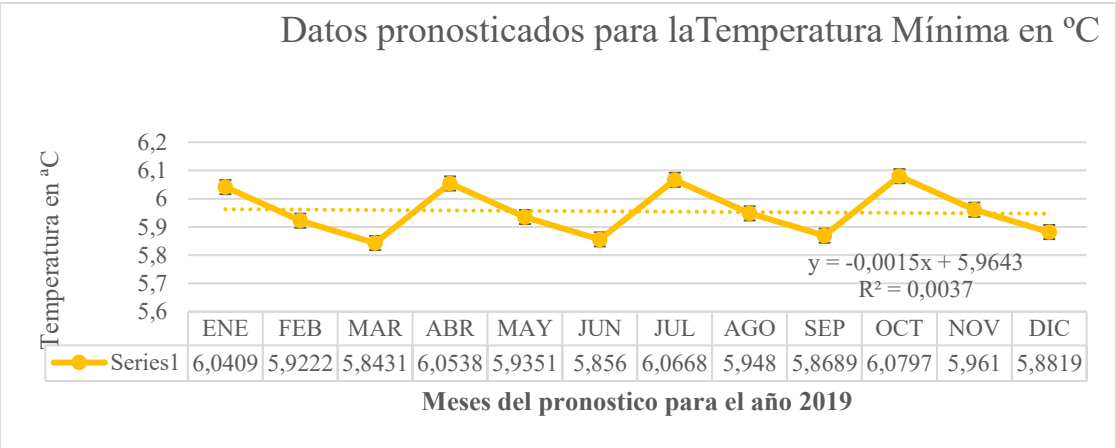


Fig.3. 2 Gráfico de la Temperatura Mínima pronosticada

Fuente. Elaboración propia, 2019

Los datos pronosticados son los siguientes:

Tabla. 3. 2 Datos obtenidos para la Temperatura Mínima en ºC

AÑO	MES	PRONÓSTICO
2019	ENERO	6,040904375
2019	FEBRERO	5,92215617
2019	MARZO	5,843082651
2019	ABRIL	6,053838019
2019	MAYO	5,935089814
2019	JUNIO	5,856016295
2019	JULIO	6,066771663
2019	AGOSTO	5,948023458
2019	SEPTIEMBRE	5,868949939
2019	OCTUBRE	6,079705307
2019	NOVIEMBRE	5,960957102
2019	DICIEMBRE	5,881883583

Fuente. Elaboración propia, 2019

De la misma manera usando la metodología de descomposición para las series de tiempo meteorológicas de la temperatura máxima y precipitaciones se obtuvieron los siguientes resultados:

Para la temperatura máxima en la localidad de Palca los datos obtenidos son los siguientes:

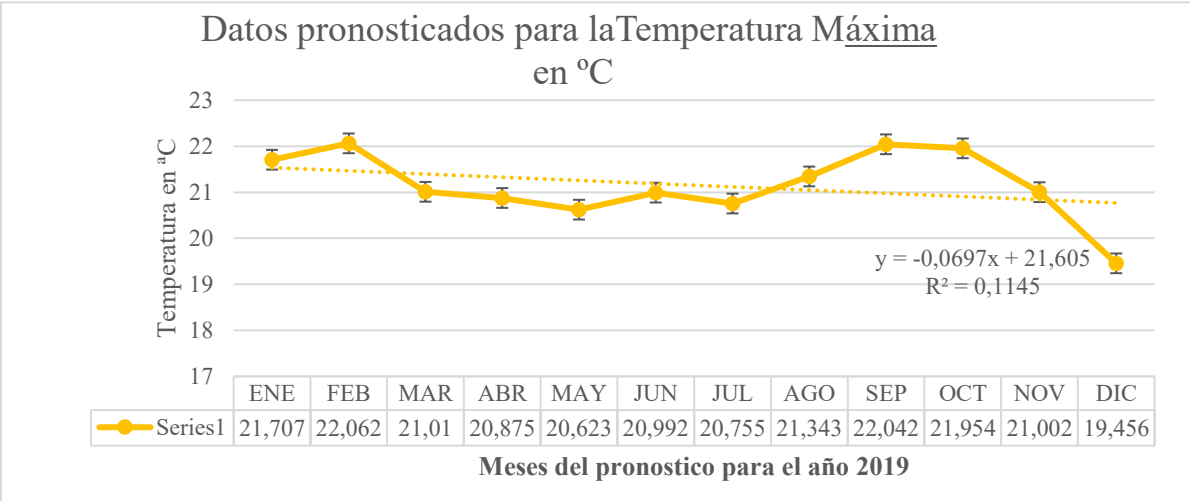


Fig.3. 3 Gráfico del pronóstico de la Temperatura Máxima

Fuente. Elaboración propia, 2019

Tabla. 3. 3 Datos obtenidos para la Temperatura Máxima en [°C]

AÑO	MES	PRONÓSTICO
2019	ENERO	21,70690165
2019	FEBRERO	22,06238868
2019	MARZO	21,00979157
2019	ABRIL	20,87547288
2019	MAYO	20,62254092
2019	JUNIO	20,9917858
2019	JULIO	20,75527186
2019	AGOSTO	21,34321882
2019	SEPTIEMBRE	22,04242981
2019	OCTUBRE	21,95424014
2019	NOVIEMBRE	21,00168814
2019	DICIEMBRE	19,45621066

Fuente. Elaboración propia, 2019.

La ecuación de la tendencia ajustada del modelo es:

$$\mathbf{Yt = 18{,}485 + 0{,}007110 \times t}$$

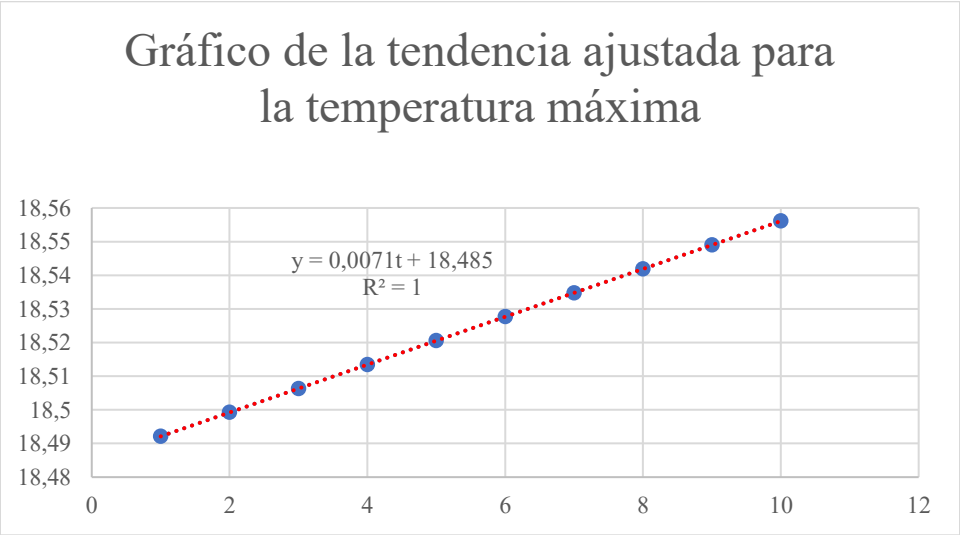


Fig.3. 4 Gráfico de la Tendencia Ajustada de Temperatura Máxima.

Fuente. Elaboración propia, 2019

Donde Y_t representa el resultado del pronóstico obtenido, t representa el número del mes en el cual se desea el pronóstico, contando como el primer mes el mes de enero del 2019 ya que dicha ecuación representa a la tendencia pronosticada en ese mes.

Para las precipitaciones en la localidad de Palca se obtuvo lo siguiente:

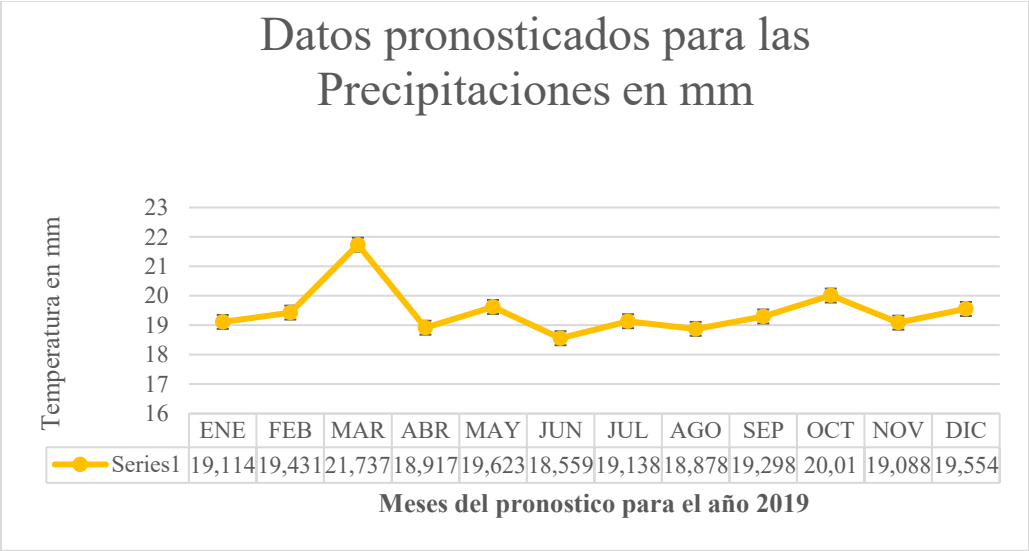


Fig.3. 5 Gráfico del pronóstico para las Precipitaciones
Fuente. Elaboración propia, 2019
:

Tabla. 3. 4 Datos obtenidos para las Precipitaciones en [mm]

AÑO	MES	PRONÓSTICO
	ENERO	19,11391161
	FEBRERO	19,43083292
	MARZO	21,73745963
	ABRIL	18,91741842
	MAYO	19,62314971
	JUNIO	18,55891388
	JULIO	19,13776342
	AGOSTO	18,87842062
	SEPTIEMBRE	19,29842168
	OCTUBRE	20,00966562
	NOVIEMBRE	19,08811209
2019	DICIEMBRE	19,55441351

Fuente. Elaboración propia, 2019

La ecuación de la tendencia ajustada del modelo es:

$$\mathbf{Yt = -5{,}73 + 0{,}0780 \times t}$$

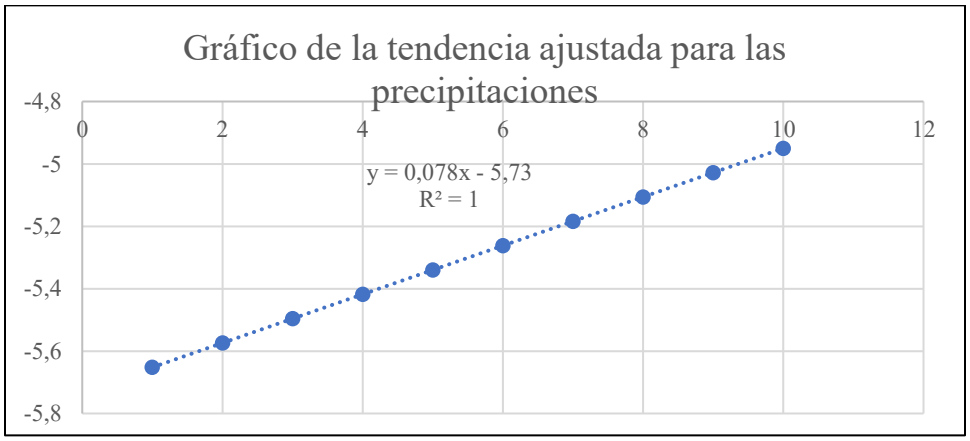


Fig.3. 6 Gráfico de la Tendencia Ajustada de Temperatura Máxima.
Fuente. Elaboración propia, 2019

Donde Y_t representa el resultado del pronóstico obtenido, t representa el número del mes en el cual se desea el pronóstico, contando como el primer mes el mes de enero del 2019 ya que dicha ecuación representa a la tendencia pronosticada en ese mes.

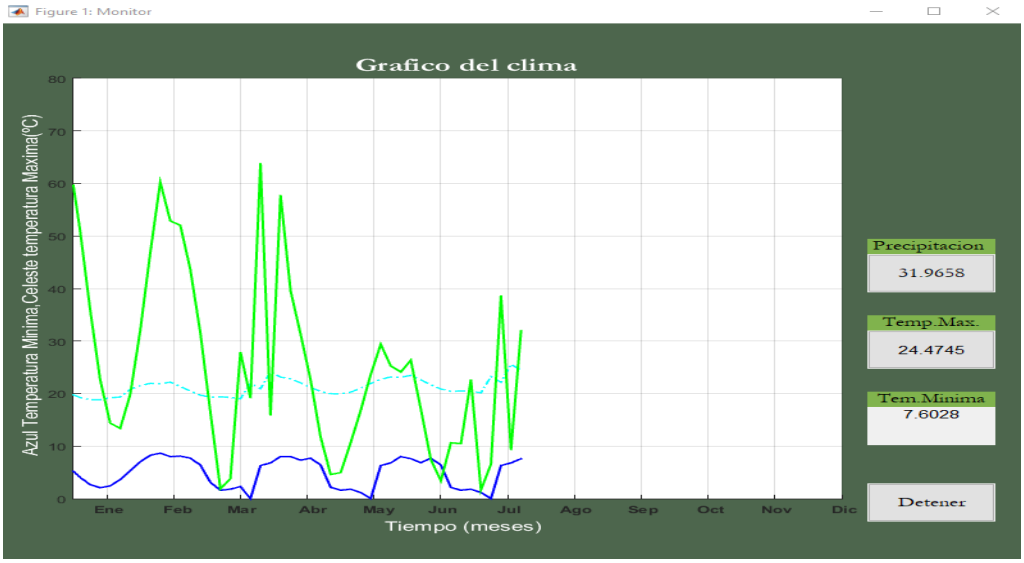


Fig.3. 7 Gráfico del del pronóstico del clima
Fuente. Elaboración propia usando matlab, 2019

Donde la línea azul representa la temperatura máxima, la línea turquesa la temperatura mínima y la línea verde representa la precipitación.

3.3 ANÁLISIS DE LA COSECHA DEL MAÍZ, AÑOS 2009 AL 2019.

Se obtuvieron datos de la recolección de la cosecha de maíz por año de la Honorable Alcaldía de la localidad de Palca, que posee un registro hecho a mano por superficie cultivada y recolectada, esto a razón de que realizan ventas comunitarias del producto, se obtuvo un documento de las autoridades comunitarias responsables de llevar esta relación de cuentas.

Tabla 3. 5 generalidades del maíz hualtaco

VARIEDAD HUALTACO	Esta variedad proviene: Mollevilque (Grat Bilbao, Potosí); altura de 3100 m.s.n.m. Muy utilizada en valles de La Paz. **Planta:** Medianamente alta, de nulo macollaje; hojas en número regular, índice de venación intermedio y borde finamente aserrado. **Resistencia:** Mediana resistencia a royas y susceptibilidad a helmintosporiosis, pudrición de tallo y mazorcas. Se adapta bien a las condiciones de los valles situados entre los 1800 y 2600 m.s.n.m. Esta variedad presenta grano mediano a grande, harinoso y de color blanco. Está destinada a la producción de choclo y de grano para la elaboración de maíz pelado. Tiene un porte mediano a alto, lo cual permite la obtención de un alto volumen de forraje. Mazorca de mediana longitud, de forma cilíndrica cónica con 10 a 12 hileras. Granos grandes, redondeados, aplanados, de color blanco y de consistencia muy suave.

FLORACIÓN FEMENINA	CICLO (días)		DISTANCIA SURCOS	DISTANCIA PLANTAS	DENSIDAD	EPOCA DE SIEMBRA
	Choclo	Grano				
83-97 Días	130	150	0.65	0.45 m (/golpe de 2 planta)	61 500 pl/ha	Sept.-Nov.

Fuente. Elaboración propia. Adaptado del Centro experimental Pairumani 2010

La tabla siguiente es de la producción de maíz desde el año 2009 al año 2018 consecutivamente más la superficie total cultivada de maíz en la localidad de Palca, donde se muestra el aumento del territorio en contraposición a la cosecha de maíz por año.

Tabla. 3. 5 Datos de la producción de maíz en la localidad de Palca

AÑOS	SUPERFICIE(m2)	CANTIDAD (qq/ha)
2011	10700	72
2012	10700	71
2013	13500	91
2014	15200	102
2015	15800	106
2016	18500	125
2017	18500	123
2018	20639	139
2019	20639	137

Fuente. Elaboración propia, datos obtenidos de la alcaldía de Palca-2019

Con estos datos se obtuvo la siguiente gráfica donde se muestra el decrecimiento en la cosecha del maíz pese al aumento del terreno de cultivo en cada año.

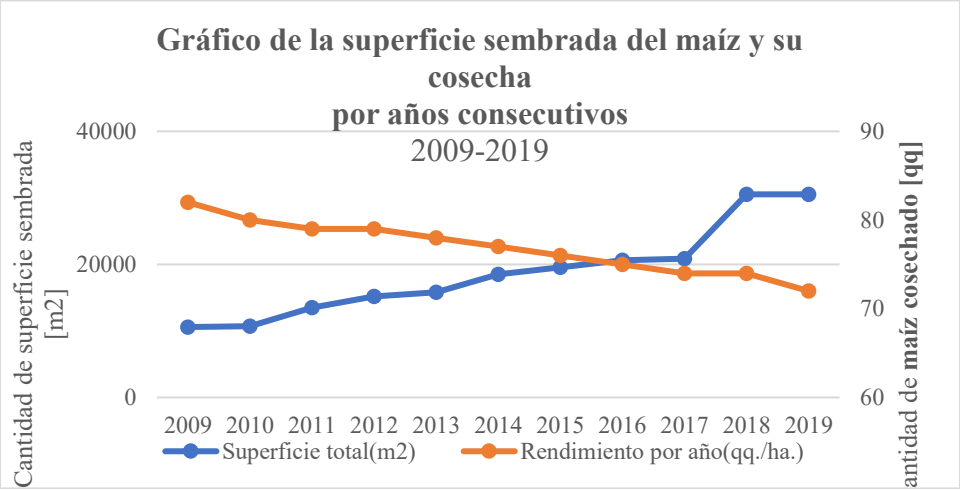


Fig.3. 8 Gráfico de la producción del maíz en la localidad de Palca
Fuente. Elaboración propia. Datos de la comunidad en la alcaldía de Palca-2019

En el presente trabajo se analiza si existe alguna influencia del cambio climático para que ocurran pérdidas en la cosecha de maíz de la localidad de Palca y en base a este análisis, se realiza el modelo de simulación para pronosticar la cantidad futura de maíz a ser cosechada en la localidad de palca.

3.3.1 DATOS GENERALES DEL DESARROLLO DEL MAIZ BLANCO

El maíz requiere una temperatura de 25°C a 30ºC. Requiere bastante incidencia de luz solar y en aquellos climas húmedos su rendimiento es más bajo. Para que se produzca la germinación en la semilla la temperatura debe situarse entre los 15°C a 20ºC
El maíz llega a soportar temperaturas mínimas de hasta 8ºC y a partir de los 30ºC pueden aparecer problemas serios debido a mala absorción de nutrientes minerales y agua. Para la fructificación se requieren temperaturas de 20°C a 32ºC. Las aguas en forma de lluvia son muy necesarias en periodos de crecimiento en unos contenidos de 300 [mm] a 650 [mm]. (Scribd, 2020).

Con estos datos se analizó el comportamiento de la cosecha del maíz a través del tiempo

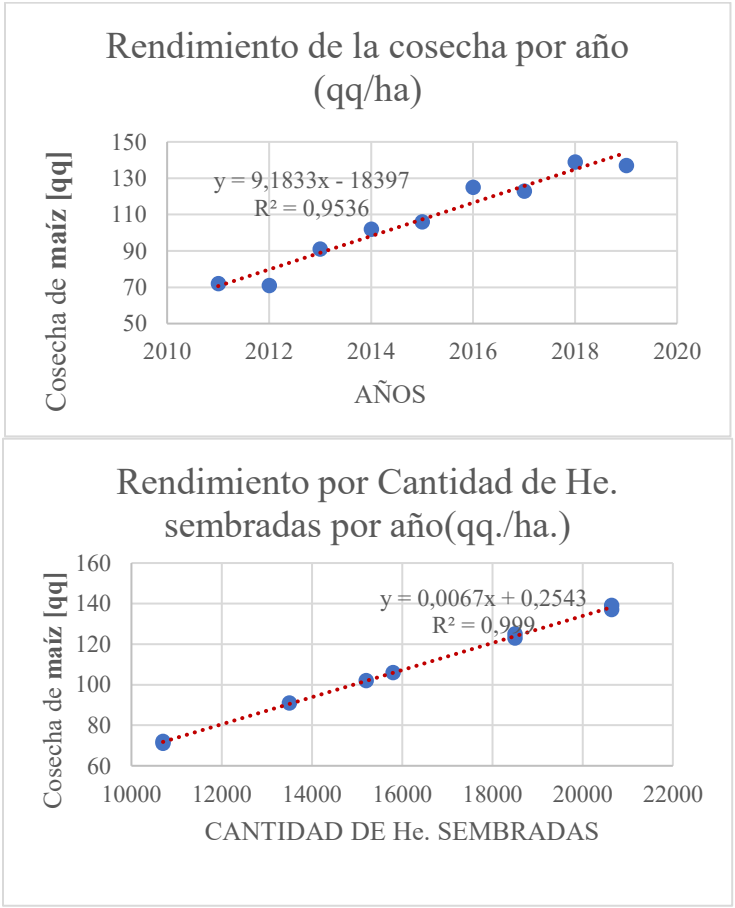


Fig.3. 9 Gráfico cosecha de maíz por año Vs. Cantidad de He. sembradas.
Fuente. Elaboración propia, adaptada de los datos de la alcaldía de Palca

La ecuación de la tendencia ajustada encontrada de este análisis es la siguiente:

$$\mathbf{Y = 9,1833x - 18397}$$

Donde Y_t representa el resultado del pronóstico obtenido, x representa el año del cual se desea el pronóstico.

Con una correlación de:

$$R^2 = 0,9536$$

En este análisis se puede ver que, en las cantidades de maíz cosechadas por año existe una tendencia muy suave a decrecer la misma, esta puede ser atribuía a los cambios climáticos, lo cual se pasa a analizar. Estos años incluyen el pronóstico realizado para el 2019.

Para el análisis de las temperaturas mínimas en la localidad de Palca se tiene:

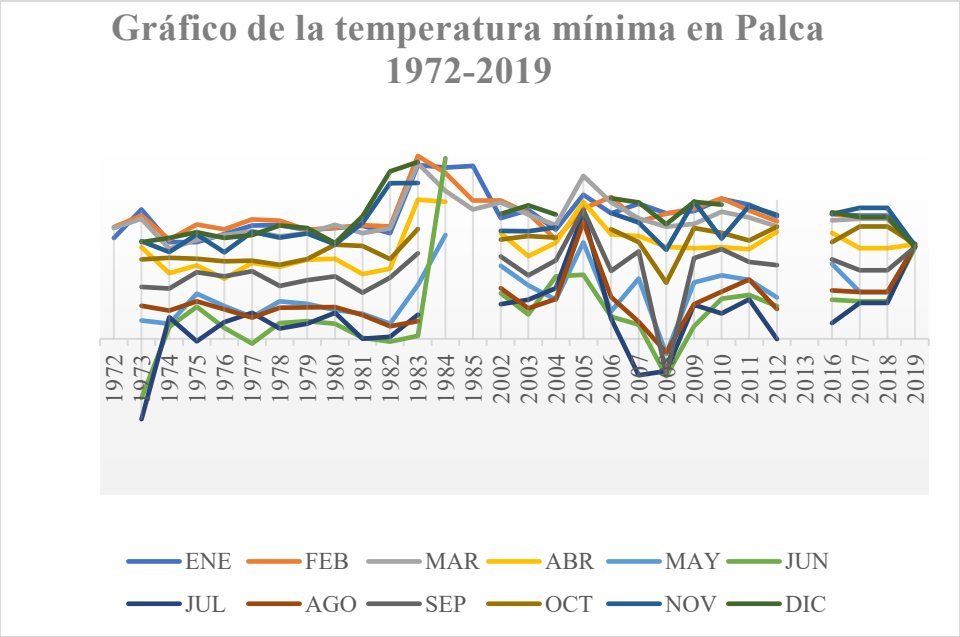


Fig.3. 10 Gráfico la Temperatura Mínima en los años 1972-2019
Fuente. Elaboración propia

Para la temperatura mínima y la producción y cosecha del maíz para los años 1972-2019 se tiene.

Tabla. 3. 6 Datos de la Temperatura mínima de 1972-2019

DATOS DE : TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA (ºC)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1972	6,5	7,2	7,1									
1973	8,3	7,9	7,7	5,9	1,2	-3,8	-5,2	2,1	3,3	5,1	6,3	6,2
1974	6,2	6,4	5,8	4,2	1,0	0,8	1,4	1,8	3,2	5,2	5,6	6,5
1975	6,2	7,3	6,3	4,7	2,9	2,1	-0,2	2,4	4,3	5,1	6,7	6,8
1976	6,7	7,0	6,6	3,9	2,1	0,7	1,1	1,9	4,0	5,0	5,5	6,5
1977	7,3	7,7	6,9	4,9	1,4	-0,3	1,7	1,3	4,3	5,0	6,9	6,6
1978	7,3	7,6	6,6	4,6	2,4	1,0	0,7	2,0	3,4	4,7	6,5	7,3
1979	7,0	7,0	6,8	5,1	2,2	1,1	1,0	2,0	3,8	5,1	6,8	7,1
1980	7,1	7,1	7,3	5,1	1,9	1,0	1,7	2,0	4,0	6,0	6,1	6,1
1981	7,2	7,3	6,8	4,2	1,6	0,1	0,0	1,5	3,0	6,0	7,4	7,9
1982	6,8	7,2	7,1	4,5	1,0	-0,2	0,1	0,8	3,9	5,1	10,0	10,7
1983	11,1	11,7	11,2	8,9	3,4	0,2	1,5	1,1	5,5	7,0	10,0	11,3
1984	11,0	10,6	9,5	8,8	6,7	11,6						
1985	11,1	8,9	8,3									
2002	7,7	8,9	8,7	6,8	4,7	2,9	2,2	3,2	5,3	6,4	6,9	8,0
2003	8,3	8,0	8,0	5,3	3,4	1,6	2,5	2,0	4,1	6,6	6,9	8,5
2004	7,0	6,4	7,3	6,2	2,5	4,0	3,2	2,5	5,0	6,5	7,1	8,0
2005	9,2	8,4	10,5	8,8	6,2	4,1	8,0	7,5	8,3			
2006	8,0	9,1	8,7	6,7	1,8	1,4	1,3	2,7	4,4	7,0	8,1	9,0
2007	8,7	7,5	7,7	6,6	3,9	0,9	-2,3	1,1	5,6	6,2	7,4	8,7
2008	8,0	8,0	7,2	5,9	-1,0	-2,4	-2,1	-0,9	-2,2	3,6	5,7	7,3
2009	8,2	8,3	7,4	5,8	3,6	0,8	2,2	2,2	5,2	7,1	8,8	8,8
2010	9,0	9,0	8,2	5,9	4,1	2,6	1,6	3,0	5,7	6,8	6,4	8,6
2011	8,6	8,2	7,8	5,7	3,8	2,8	2,5	3,8	4,9	6,3	8,5	
2012	7,8	7,5	7,2	6,9	2,7	2,1	0,0	1,9	4,7	7,2	7,9	8,9
2013												
2016	8,0	8,0	7,6	6,8	4,8	2,5	1,0	3,1	5,1	6,2	8,0	8,1
2017	7,9	7,8	7,7	5,8	3,0	2,4	2,3	3,0	4,4	7,2	8,4	7,8
2018	7,9	7,8	7,7	5,8	3	2,4	2,3	3	4,4	7,2	8,4	7,8
2019,00	6,04	5,92	5,84	6,05	5,94	5,86	6,07	5,95	5,87	6,08	5,96	5,88

Fuente. Elaboración propia, adaptada de los datos de la alcaldía de Palca

Según lo investigado la temperatura mínima aceptable para el crecimiento del maíz es de 5°C en promedio mensual, la época tradicional de siembra del maíz en la localidad de Palca es en los meses de agosto y septiembre, datos que se encuentran debidamente documentados en el presente documento en anteriores páginas. (Scribd, 2020)

Tomando en cuenta estos datos se analiza lo siguiente:

No existen temperaturas extremadamente bajas como para destruir el cultivo de maíz en la localidad de Palca y estas temperaturas se mantuvieron estables hasta el año 2012, pero a partir de ese momento se verifica un aumento en la temperatura.

En el año 2016 los meses más afectados por temperaturas muy frías registradas fueron:

Mayo, junio, julio, agosto, septiembre, precisamente en el mes de septiembre es donde se observa una temperatura de 1,2 °C y los comunarios acostumbran a iniciar la siembra del maíz, donde se verifica que la cosecha de maíz de esta siembra la mayor parte fue destinada a perdida.

En el año 2017 los meses más afectados por temperaturas muy frías registradas fueron:

Junio, julio, agosto.

En el año 2018 los meses más afectados por temperaturas muy frías registradas fueron:

Abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre, nuevamente en el mes de septiembre donde se observa una temperatura de 4,4°C donde también se dieron perdidas en la cosecha de maíz.

También se analiza la cosecha en relación a los datos pronosticados del clima para el año 2019 dando los siguientes resultados: las temperaturas más frías del año fueron en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

Para la temperatura máxima y la producción y cosecha del maíz para los años 2016-2019 se tiene.

En el año 2019 las temperaturas mínimas se mantuvieron estables en un promedio de 5,6% todo el año.

Para el análisis de la temperatura máxima se tiene:

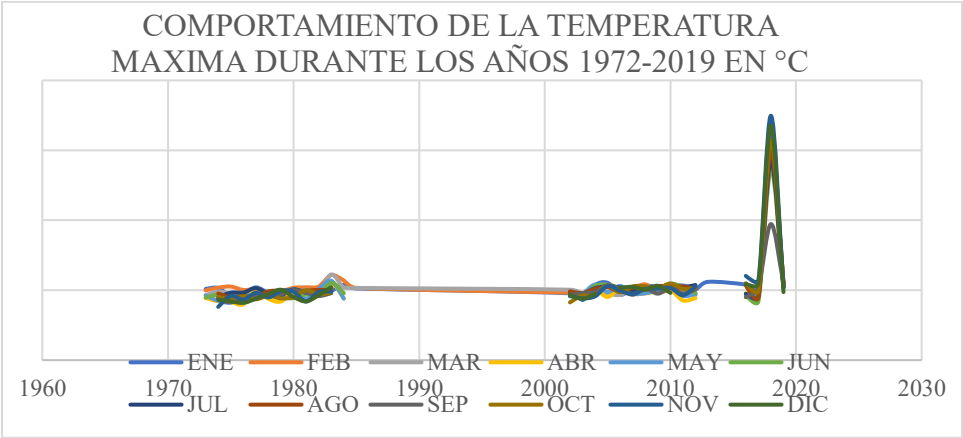
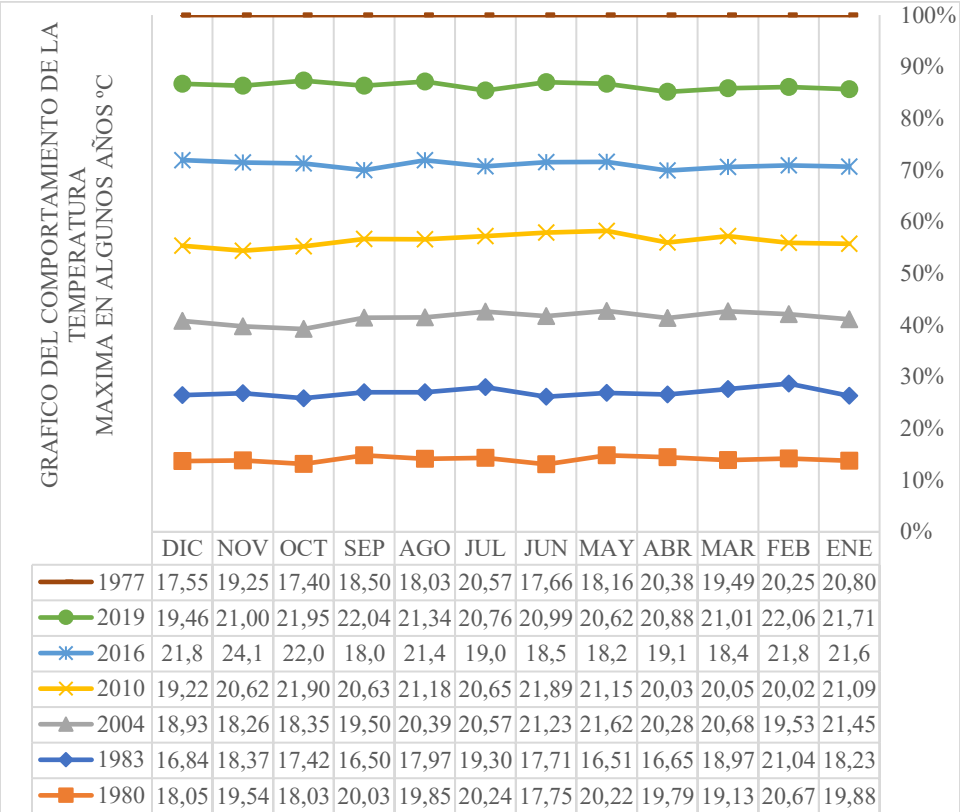


Fig.3. 11 Gráfico de la temperatura máxima por años
Fuente. Elaboración propia.

Para un mejor análisis y una mejor comprensión del comportamiento de la temperatura máxima a través del tiempo transcurrido se ha graficado algunos años por separado con intervalos de 5 años entre cada uno de ellos y con lo cual se puede apreciar mucho mejor el aumento de dicha temperatura.

Con los siguientes resultados donde se evidencia el aumento en la temperatura entre los años de 1977 y 2019.

Se puede observar en la siguiente gráfica:



	DIC	NOV	OCT	SEP	AGO	JUL	JUN	MAY	ABR	MAR	FEB	ENE
1977	17,55	19,25	17,40	18,50	18,03	20,57	17,66	18,16	20,38	19,49	20,25	20,80
2019	19,46	21,00	21,95	22,04	21,34	20,76	20,99	20,62	20,88	21,01	22,06	21,71
2016	21,8	24,1	22,0	18,0	21,4	19,0	18,5	18,2	19,1	18,4	21,8	21,6
2010	19,22	20,62	21,90	20,63	21,18	20,65	21,89	21,15	20,03	20,05	20,02	21,09
2004	18,93	18,26	18,35	19,50	20,39	20,57	21,23	21,62	20,28	20,68	19,53	21,45
1983	16,84	18,37	17,42	16,50	17,97	19,30	17,71	16,51	16,65	18,97	21,04	18,23
1980	18,05	19,54	18,03	20,03	19,85	20,24	17,75	20,22	19,79	19,13	20,67	19,88

Fig.3. 12 Gráfico de la temperatura máxima por años
Fuente. Elaboración propia

Los datos utilizados para la realización de esta grafica se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla. 3. 7 Datos de la Temperatura máxima años 1973-2019

DATOS DE : TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA (ºC)												
AÑO	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**
1972												
1973	20,36	19,95	18,58	17,79	18,48	17,86						
1974	20,63	20,71	19,60	16,81	16,99	18,70	17,95	19,07	17,35	18,09	15,23	17,34
1975	18,23	21,04	18,97	16,65	16,51	17,71	19,30	17,97	16,50	17,42	18,37	16,84
1976	19,07	20,07	17,70	16,00	18,57	18,79	19,33	18,24	17,95	18,20	17,29	16,39
1977	20,80	20,25	19,49	20,38	18,16	17,66	20,57	18,03	18,50	17,40	19,25	17,55
1978	19,41	19,19	18,74	17,55	18,38	18,54	18,96	19,68	18,57	18,37	17,95	18,87
1979	20,02	19,67	18,83	16,77	19,11	17,82	18,58	19,83	18,83	17,66	19,77	20,13
1980	19,88	20,67	19,13	19,79	20,22	17,75	20,24	19,85	20,03	18,03	19,54	18,05
1981	19,65	20,83	20,16	17,33	17,64	18,86	19,28	19,87	19,31	19,97	16,78	16,79
1982	19,50	21,05	19,36	18,58	20,36	18,48	18,85	20,11	18,35	18,88	19,51	18,59
1983	19,88	24,28	24,51	22,15	22,69	22,13	19,69	19,99	19,15	19,25	19,53	20,88
1984	21,53	22,79	20,77	17,60	17,60	19,12						
1985	20,52	20,66	20,64									
2002	19,11	19,30	20,14	18,98	18,24	19,20	19,27	19,69	18,65	16,52	18,37	18,59
2003	17,16	19,10	19,10	18,49	18,96	17,88	19,03	19,19	19,17	18,50	17,66	17,53
2004	21,45	19,53	20,68	20,28	21,62	21,23	20,57	20,39	19,50	18,35	18,26	18,93
2005	22,10	19,37	19,16	18,07	19,54	21,55	21,10	20,87	21,40	21,29	21,20	
2006	18,73	20,58	18,61	20,64	21,23	20,50	20,77	19,55	20,44	19,42	19,82	20,71
2007	20,53	20,60	20,19	18,98	19,04	19,96	20,09	20,75	18,71	21,10	18,88	20,94
2008	21,33	21,66	19,69	19,09	19,13	20,38	20,69	20,13	20,48	21,11	20,35	20,16
2009	20,92	19,48	19,61	19,71	19,95	20,49	21,04	21,14	19,01	20,44	20,45	21,27
2010	21,09	20,02	20,05	20,03	21,15	21,89	20,65	21,18	20,63	21,90	20,62	19,22
2011	21,33	19,84	19,20	17,09	18,39	20,93	20,85	21,06	19,06	20,36	18,55	
2012	20,32	18,94	18,64	17,74	18,92	19,21	21,48	20,32	20,19	20,74	21,12	21,19
2013	22,39											
2016	21,6	21,8	18,4	19,1	18,2	18,5	19,0	21,4	18,0	22,0	24,1	21,8
2017	20,4	19,0	19,5	20,4	19,5	16,8	18,1	17,9	20,9	19,8	22,9	21,9
2018	21,6	21,8	18,4	19,1	18,2	18,5	19	21,4	18	22	24,1	21,8
2019	21,7069	22,0624	21,0098	20,8755	20,6225	20,9918	20,7553	21,3432	22,0424	21,9542	21,0017	19,46

Fuente. Elaboración propia, adaptada de los datos de la alcaldía de Palca

Se tiene como dato que la temperatura máxima en el cual el maíz progresa en su crecimiento está entre los 13°C y 30°C según lo mencionado anteriormente.

Con estos datos se analiza lo siguiente:

Se puede verificar con la comparación de datos que con el transcurso del tiempo el aumento en la temperatura en la localidad de Palca ha sido constante puesto que desde el año 1972 hasta el año 2019 la temperatura ha variado y a aumentado en 1ºC aproximadamente.

En el año 2016 los meses más cálidos fueron enero, mayo llegando estas a oscilar entre los, noviembre y diciembre 22°C y 23°C. Lo cual indica que, si la planta de maíz sobrevivo a las bajas temperaturas en los meses de septiembre y agosto del año 2015 que son meses de siembra, estas lograron crecer para esta época. No se presentan temperaturas altas nocivas para los cultivos de maíz en este año.

En el año 2017 los meses más cálidos fueron octubre, noviembre y diciembre, llegando estas a oscilar entre los 23°C y los 24°C. Lo cual indica que si la planta de maíz sobrevivo a las bajas temperaturas en los meses de septiembre y agosto del año 2016 que son de siembra lograron crecer para esta época.

En el año 2018 los meses más cálidos fueron enero, abril, septiembre y noviembre, llegando estas a oscilar entre los 20°C y los 22°C. Lo cual indica que si la planta de maíz sobrevivo a las bajas temperaturas en los meses de septiembre y agosto del año 2017 que son de siembra lograron crecer para esta época.

En el año 2019 el cual fue pronosticado, los meses más cálidos fueron enero, octubre, noviembre y diciembre, llegando estas a oscilar entre los 21°C y los 22°C. Lo cual indica que si la planta de maíz sobrevivo a las bajas temperaturas en los meses de septiembre y agosto del año 2018 que son de siembra lograron crecer para esta época.

Por investigación realizada con los comunarios del lugar e información sacada del SEDALP que es el sistema de información municipal regionalizado del departamento de La Paz se tiene que las temperaturas altas se dan durante el día y las temperaturas bajas se presentan durante la noche cambiando bruscamente el clima. (Sedalp, 2020)

Para las precipitaciones en la localidad de Palca para los años 1972-2019 se tiene:

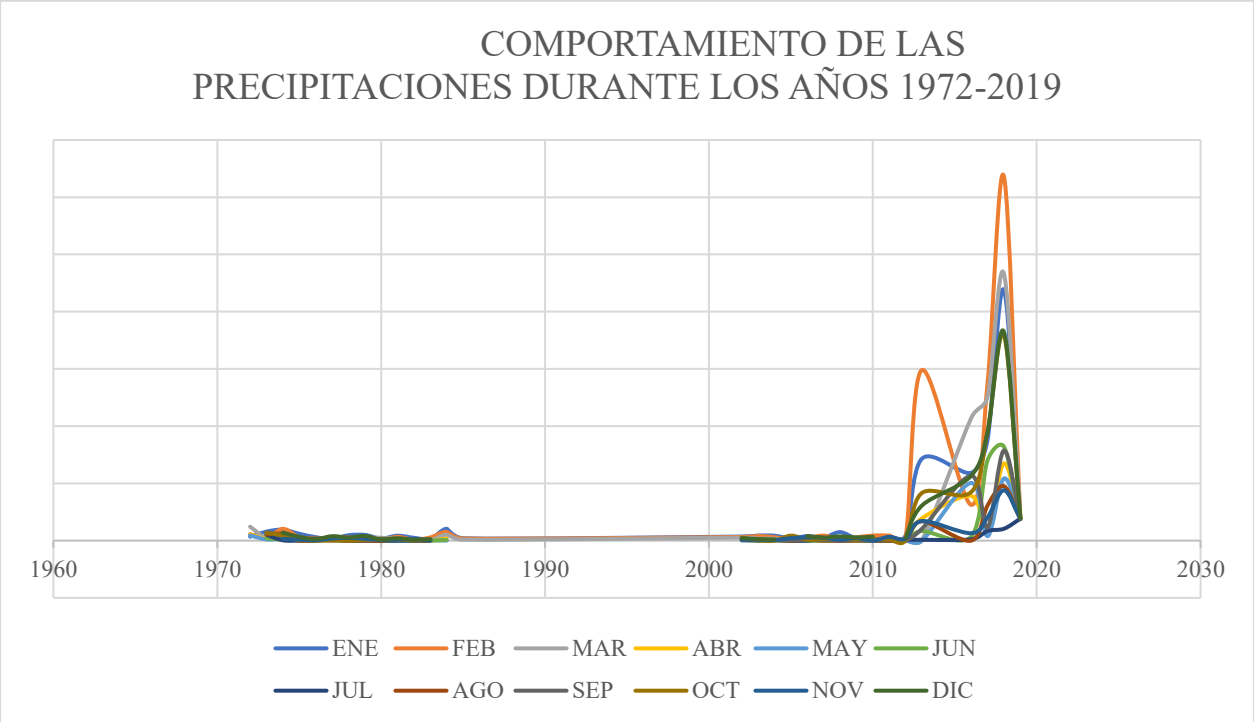


Fig.3. 13 Gráfico de las precipitaciones por año
Fuente. Elaboración propia, adaptada de los datos de la alcaldía de Palca.

Tabla. 3. 8 Datos de la Precipitación para los años 1973-2019

DATOS DE : PRECIPITACIÓN TOTAL (mm)												
AÑO	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**
1972	3,50968	5,71667	12,1806	5,39032	4,54286							
1973	7,87	2,16667	2,38	1,84333	1,09032	1,89355	5,09333	5,37097	7,31333	6,5871		
1974	9,53226	10,3036	5,40645	4,31333	1,3037	1,10333	0,31613	5,80645	4,13	4,74194	1,54483	6,987
1975	6,00323	3,05	2,33871	0,52333	0,33871	0,41667	0	0,0871	1,15	0,50323	0,81333	3,355
1976	3,02581	2,38276	0,56129	0,24333	0,43548	0,31667	0,16774	0,40968	2,12667	0,00968	0,34333	1,313
1977	1,43871	1,88929	2,75484	0,51	0,9129	0	1,15161	0,2129	1,31	0,76452	1,85	3,884
1978	4,73548	2,93571	1,13548	1,77333	0,26129	0	0	0,10323	0,53667	0,12258	2,35667	2,787
1979	5,00645	1,89286	2,31613	0,91333	0,41935	0	0,10968	0,0129	0,18333	0,7129	1,65333	4,132
1980	1,86774	0,86552	2,53548	0,67667	0,01935	0	0	0,0129	1,60333	1,33226	0,74333	0,984
1981	4,32258	3,32857	1,52903	1,28	0	0	0	1,25806	1,18	1,02258	0,89	2,097
1982	2,4871	0,90357	1,19032	0,53667	0,00323	0,30333	0,00645	0,20968	1,06667	0,58387	1,34	0,794
1983	1,54516	2,82143	0,44194	0,27	0,3	0,09	0,04839	0,20968	0,91333	0,55806	0,16333	1,258
1984	10,3742	7,66207	5,1871	1,76	0,06452	0,55806						
1985	2,0871	1,83929	0,84516									
2002	3,60323	3,23214	2,6129	0,95769	0,17097	0,45	0,95806	0,6871	1,19	2,69032	0,64667	2,177
2003	4,43226	4,02857	1,79355	0,21333	0,13871	0,18	0,28333	0,37419	0,94333	0,35484	0,82667	1,345
2004	4,308	3	1,59355	0,26667	0,40323	0,30333	0,69355	0,66452	0,40667	0	0,51667	0,977
2005	1,90323	1,125	0,11613	0,16	0	0,01	0	0	0,11379	4,35455	2,16452	
2006	3,99355	2,35	1,34516	0,31333	0,05484	0	0	0,70323	0,63	0,84194	2,79667	4,061
2007	2,70645	4,4	1,70645	1,17667	0,1871	0	1,40645	0	0,58333	1,40968	2,48	2,687
2008	7,46452	1,47931	1,88387	0,08	0,32667	0,19	0,09677	0,04839	0,40333	1,35161	0,68333	3,681
2009	2,05161	2,89643	1,19677	0,49667	0	0	0,6871	0,05806	0,53333	1,09355	2,3	2,794
2010	3,09032	4,45357	0,94194	0,10333	0,27419	0	0,15161	0,12581	0,27	1,20323	0	3,461
2011	1,90968	4,45357	1,0129	0	0,13871	0	0,20667	0,04194	0,77667	1,03	3,33226	
2012	4,47097	3,32759	1,50645	1,26667	0,03871	0,18	0,70323	0,13226	0	0,23548	1,68667	2,481
2013	71,6	149,1	0,5	19,5	0,0	8,4	0,7	16,9	10,4	41,7	17,1	30,7
2016	59,2	31,3	107,0	39,1	50,4	3,5	1,2	0,0	56,7	42,4	6,5	56,7
2017	88,1	137,7	125,8	8,9	3,9	70,2	8,5	30,7	11,6	95,4	20,4	95,0
2018	218,9	318,1	233,3	67,5	54,3	82,1	10,4	47,6	78,7	179,5	44,0	182,4
2019	19,1139	19,4308	21,7375	18,9174	19,6231	18,5589	19,1378	18,8784	19,2984	20,0097	19,0881	19,55

Fuente. Elaboración propia.

En general, el maíz necesita por lo menos de 100 a 150 mm de precipitación bien distribuida durante el ciclo del cultivo y crecimiento. El maíz es muy sensible también al aniego o encharcamiento; es decir, a los suelos saturados y sobresaturados. Desde la siembra, hasta aproximadamente los 15-20 días, el aniego por más de 24 horas puede dañar el cultivo (especialmente si las temperaturas son altas) porque el meristemo está debajo de la superficie del

suelo en esos momentos. Más tarde, en el ciclo de cultivo, el aniego puede ser tolerado durante períodos de hasta una semana, pero se reduce considerablemente el rendimiento. (Deras, 2018).

Los datos pronosticados para 5 años son los siguientes:

Tabla. 3. 9 DATOS PRONOSTICADOS PARA LAS TEMPERATURAS Y PRECIPITACIÓN

PRONÓSTICO DEL CLIMA PARA EL AÑO 2019												
VARIABLE	ENE.	FEBR.	MAR	AB.	MA	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
TEMP.MIN	6,04	5,92	5,84	6,05	5,94	5,86	6,07	5,95	5,87	6,08	5,96	5,88
TEMP.MAX	21,71	22,06	21,01	20,88	20,62	20,99	20,76	21,34	22,04	21,95	21,00	19,46
PRECI.	19,11	19,43	21,74	18,92	19,62	18,56	19,14	18,88	19,30	20,01	19,09	19,55
PRONÓSTICO DEL CLIMA PARA EL AÑO 2020												
VARIABLE	ENE.	FEBR.	MAR	AB.	MA	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
TEMP.MIN	5,97	5,59	6,02	6,96	7,07	6,73	6,62	4,04	2,68	2,90	2,54	5,44
TEMP.MAX	19,22	19,30	19,16	19,30	19,66	19,92	19,92	20,07	20,41	20,18	20,01	20,45
PRECI.	32,80	31,91	32,51	31,80	32,20	32,28	33,43	32,73	34,20	33,75	33,17	33,32
PRONÓSTICO DEL CLIMA PARA EL AÑO 2021												
VARIABLE	ENE.	FEBR.	MAR	AB.	MA	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
TEMP.MIN	6,01	7,04	5,93	7,72	6,33	5,84	5,68	5,86	3,24	3,78	3,16	4,46
TEMP.MAX	21,7069	22,0624	21,0098	20,8755	20,6225	20,9918	20,7553	21,3432	22,0424	21,9542	21,0017	19,4562
PRECI.	39,6102	31,3241	22,6092	11,7175	4,6064	4,9451	10,6644	16,763	23,6109	29,3864	25,2571	24,1063
PRONÓSTICO DEL CLIMA PARA EL AÑO 2022												
VARIABLE	ENE.	FEBR.	MAR	AB.	MA	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
TEMP.MIN	5,73	6,41	7,32	5,15	5,35	6,68	7,43	7,38	6,13	7,65	7,93	7,26
TEMP.MAX	21,93	22,25	21,82	20,34	20,89	21,34	20,11	23,12	23,45	22,12	21,02	21,34
PRECI.	35,15	32,13	31,20	11,30	4,73	3,73	10,32	17,40	24,12	30,11	24,34	24,11
PRONÓSTICO DEL CLIMA PARA EL AÑO 2023												
VARIABLE	ENE.	FEBR.	MAR	AB.	MA	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
TEMP.MIN	6,42	7,60	8,02	5,96	6,41	7,88	6,91	6,37	6,56	7,60	7,40	5,60
TEMP.MAX	23,59	22,78	21,97	21,16	20,35	19,54	18,73	17,92	17,11	16,30	15,49	14,68
PRECI.	36,21	39,43	33,45	15,30	6.78	8,75	11,23	10,23	20,12	18,12	18,23	28,23

Fuente. Elaboración propia, 2020

Con esta información se analizó lo siguiente:

Durante los años transcurridos entre 1972 hasta el año 2012 las precipitaciones existentes en la localidad de Palca se mantuvieron constantes, con pequeños cambios graduales, pero a partir del año 2013 el nivel de precipitaciones a aumentado considerablemente y es donde los comunarios empezaron a notar mucho más el cambio de temperatura y las perdidas en sus cosechas según la encuesta realizada.

En el año 2016 el mes de febrero tuvo mayor precipitación que ningún otro mes con 149,1 mm, en enero, octubre y diciembre se tuvo una precipitación mensual entre 71 mm y 30 mm y los demás meses hubo precipitación mínima o nula en la localidad de Palca, oscilando entre 0 mm y 19 mm, dándose este caso en los meses de siembra y posterior crecimiento y cosecha del maíz. Sumando entre todo el ciclo de siembra, crecimiento y cosecha 208.6 mm, sobrepasando los limites mensuales para los requerimientos básicos para una buena cosecha de maíz

En el año 2017 el mes de marzo tuvo mayor precipitación que ningún otro mes con 107 mm, en enero, abril, septiembre y diciembre se tuvo una precipitación mensual entre 50 mm y 30 mm y los demás meses hubo precipitación mínima o nula en la localidad de Palca, oscilando entre 0 mm y 6 mm, dándose este caso en los meses de siembra y posterior crecimiento y cosecha del maíz. Sumando entre todo el ciclo de siembra, crecimiento y cosecha 268.8 mm, sobrepasando los límites para los requerimientos básicos para una buena cosecha de maíz. (Infoagro,2019)

En el año 2018 en los meses de febrero y marzo se tuvieron las mayores precipitaciones del año con 137.7 mm y 125,8 mm, en los meses de enero, octubre, julio y diciembre se tuvo una precipitación mensual entre 88 mm y 95 mm y los demás meses hubo precipitación mínima oscilante entre 8 mm y 30 mm en la localidad de Palca, dándose este caso en los meses de siembra y posterior crecimiento y cosecha del maíz se contaron con precipitaciones. Sumando entre todo el ciclo de siembra, crecimiento y cosecha 267.1 mm, sobrepasando los límites para los requerimientos básicos para una buena cosecha de maíz según las recomendaciones de Infoagro que es un lugar virtual en España donde se imparten cursos sobre agricultura.

En el año 2019 no existieron mayores precipitaciones, se mantuvo un nivel promedio de con 19 mm mensuales, dándose este caso en los meses de siembra y posterior crecimiento y cosecha del maíz. Sumando entre todo el ciclo de siembra, crecimiento y cosecha 155 mm, sobrepasando los límites para los requerimientos básicos para una buena cosecha de maíz.

Con este análisis se puede concluir que la disminución de producción en la cosecha de maíz se debe en parte al efecto del cambio climático en la localidad de Palca ya que en dicha localidad pese a haber incrementado la cantidad de superficie de cultivo del maíz la cosecha anual a mermado demostrando una relación inversamente proporcional entre el cambio climático y la cosecha de maíz.

$$\textbf{Cambio Climático } \alpha \ \frac{\textbf{1}}{\textbf{Cosecha de Maíz}}$$

También vale la pena tomar en cuenta los estudios realizados por el programa papa financiado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua y el Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras, respecto a la influencia del cambio climático en los cultivos de papa de Bolivia, donde se concluye que, en los municipios de la Paz, las áreas priorizadas en el programa papa estarán parcialmente afectadas por la incidencia del tiempo atmosférico, es decir que existen otros factores que afectan el normal desarrollo o la eficiencia de la producción. Esto a razón que en la localidad de Palca también se siembra papa pero en menor cantidad que el maíz, aun así la incidencia del tiempo atmosférico es el mismo para ambos cultivos. (Marín & Flores, 2017)

Existe un aumento lento pero constante en la temperatura lo cual también influye en los cultivos de maíz de esta localidad ya que esta planta requiere entre 20 °C y 30 °C para su apto desarrollo. (Agroinfo, 2019).

Con todo esto se procedio al diseño e implementación del modelo de simulación utilizando la información obtenida y aplicando el software de matlab, Simulink y el software AquaCrop para este cometido.

3.4 MODELO DE SIMULACIÓN PARA LA COSECHA DEL MAÍZ

3.4.1 MODELO ESTÁTICO

Se emplearon dos metodologías principales para estudiar la relación entre el clima y rendimiento de los cultivos de maíz en la localidad de Palca:

- Un modelo de crecimiento de cultivos
- Un análisis de la función de producción.

Modelado de crecimiento de cultivos: es un enfoque de simulación basado en computadora con una integración matemática de las características del crecimiento y desarrollo de un cultivo, un modelo incorpora información meteorológica de temperaturas máximas, mínimas y precipitación, para simular el rendimiento de los cultivos.

Función de producción: se requiere determinar el conjunto apropiado de clima que son los factores que afectan el crecimiento y el rendimiento de los cultivos. La temperatura y la precipitación son las variables principales que afectan el rendimiento de los cultivos.

En este estudio, se desarrolla un modelo de regresión de estos factores principales de rendimiento de clima-cultivo para estudiar la respuesta de los rendimientos de los cultivos a los cambios climáticos.

La siguiente es una expresión generalizada del modelo de regresión del rendimiento de los cultivos. Es una función estadística que demuestra la relación histórica entre las variables climáticas y el rendimiento de los cultivos la ecuación estima las conexiones entre el rendimiento del cultivo y las condiciones climáticas:

$$y = X\beta + \epsilon \tag{1}$$

X = Matriz de dimensión (n x p)

p = Indicadores meteorológicos. (Datos históricos de las observaciones, temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones fluviales)

n = Número real constante igual a número de indicadores meteorológicos existentes

β = Vector de coeficientes de regresión de los indicadores meteorológicos de p

ϵ = Vector de términos de error (Coeficientes de corrección de error).

y = Rendimiento del cultivo de maíz

Donde X es una matriz de p variables aleatorias de indicadores meteorológicos con dimensión (n x p), **y**, es un vector de rendimiento de cultivos con datos de las observaciones, β es un vector de p coeficientes de regresión, y ϵ es un vector de términos de error. Los vectores meteorológicos dentro de la matriz X incluyen las temperaturas máximas y mínimas medias mensuales, un término cuadrado de las temperaturas medias mensuales, precipitación mensual total, término cuadrado del total precipitación mensual, y la diferencia entre la media máxima y mínima mensual de temperaturas.

El modelo utiliza componentes principales de indicadores meteorológicos como variables. El primer paso del modelo es generar estas componentes principales de las variables originales para esto se uso el, PCA (Principal Component Análisis) el cual deriva el mismo número de componentes principales que las variables originales. Estos están clasificados por la magnitud de sus variaciones. La primera componente principal de indicador meteorológico con la mayor variación podría representarse como una combinación lineal de variables originales:

(1) $$Xa_1 = x_1 a_{11} + x_2 a_{12} + \ldots + x_p a_{1p} = \sum_{j=1}^{p} . a_{1j} x_j$$

donde Xa_1 es (nx1)

a_1 = Es un número real propio de la matriz X, que cuando se resta de cada una de las entradas diagonales de X, se convierte a X en una matriz singular

Dónde a_i es un eigenvector o vector propio de matriz $\sum$ de X covarianza, correspondiente a su primer eigenvalor o mayor valor propio. El segundo componente principal y los siguientes podrían generarse de manera similar. Una lista de los componentes principales de los indicadores meteorológicos es:

(2) $$Z=X \qquad A=[Xa_1, Xa_2 \ldots\ldots Xa_p],$$

A = Nueva matriz de componentes principales elaborado con los datos meteorológicos históricos.

Donde cualquier componente principal no está correlacionado con el resto de las componentes. Como es la ecuación (1) es ortogonal podemos reescribir la ecuación como:

(3) $$y=X\beta+\in =XAA'\beta+ \in =Z\,Y\in ; \qquad \text{donde } y, \text{esta en la forma } (n \times 1)$$
$$\text{y } Z \text{ en } (n \times p) y\,, Y \text{ en } (p \times 1)$$

Esta última ecuación es una expresión general del modelo. La matriz Z de componentes principales reemplaza la matriz X original de variables meteorológicas. Z tiene exactamente la misma dimensión (n x p) de X.

Para pronosticar la cosecha de maíz con el modelo estimado se propone transformar variables meteorológicas en componentes principales utilizando datos climáticos históricos y futuros antes calculados y cambiar los datos simultáneamente. Con base en esto se modifica la ecuación (3), para que sea un modelo aplicable al propósito deseado.

Entonces se tiene tres conjuntos de datos históricos sobre el cambio climático (temperatura máxima, mínima y precipitaciones) $\boldsymbol{\emptyset_1}$**,** $\boldsymbol{\emptyset_2}$ **y** $\boldsymbol{\emptyset_3}$ cada uno con una dimensión de (m x 1). Cada uno

de ellos se combina con datos futuros para generar tres conjuntos de datos meteorológicos nuevos $\boldsymbol{\Psi_1}$, $\boldsymbol{\Psi_2}$, **y** $\boldsymbol{\Psi_3}$, como sigue a continuación:

Donde:

$\boldsymbol{\emptyset_1}$, $\boldsymbol{\emptyset_2}$ **y** $\boldsymbol{\emptyset_3}$ = Matrices de dimensión (m x 1) de datos meteorológicos históricos

Ψ_1, Ψ_2, ***y*** Ψ_3, = Matrices de datos meteorológicos nuevos de dimensión (n x m)

m = Número de datos históricos meteorológicos

(4) $$\Psi_1 = \left|X', \emptyset_1'\right|'$$

(5) $$\Psi_2 = \left|X', \emptyset_2'\right|'$$

(6) $$\Psi_3 = \left|X', \emptyset_3'\right|'$$

Se obtiene así, Ψ_1, Ψ_2, y Ψ_3, luego se transforman en matrices de primeros componentes Z_1, Z_2 y Z_3 :

(4a) $$Z_1 = \Psi_1 \qquad A_2 = \left[\Psi_1 a_{11}, \Psi_1 a_{12} \ldots, \Psi_1 a_{1p}\right]$$

(5a) $$Z_2 = \Psi_2 A_2 = \left[\Psi_2 a_{21}, \Psi_2 a_{22}, \ldots \Psi_2 a_{2p}\right] = [Z'_2', Z''_2']'$$

(6a) $$Z_3 = \Psi_3 A_3 = \left[\Psi_3 a_{31}, \Psi_3 a_{32}, \ldots \Psi_3 a_{3p}\right] = [Z'_3', Z''_3']'$$

Donde:

Z_1 = Es una matriz de datos resultantes de dimensiones ((n + m) x p)

Ψ_1 = Es una matriz de dimensiones ((n + m) x p)

A_2 = Es una matriz de (p x p)

El modelo dá como resultado las siguientes ecuaciones donde cada ecuación tiene un componente principal de matriz Z'_1, Z'_2 y Z'_3 , que dependerán de los datos climáticos utilizados.

Pronóstico:

(4b) $y = Z'_1 \gamma_1 + \epsilon$

(5b) $y = Z'_2 \gamma_2 + \epsilon$

(6b) $y = Z'_3 \gamma_3 + \epsilon$

y = Matriz de la forma (n x 1)

Z'_1 = Matriz de la forma (n x p)

γ_1 = Matriz de la forma (p x 1)

Aunque los componentes principales utilizados en el modelo todavía se basan en datos meteorológicos históricos, son diferentes ya que los datos meteorológicos futuros se combinan para generar estos componentes principales. Estos datos se utilizaron para pronosticar el rendimiento del cultivo de maíz en base al cambio climatológico. Las proyecciones de cambio climático de estos tres modelos climáticos proporcionan Proyección mensual de temperaturas y precipitación hasta el año 2023

El modelo de simulación generado es estático de tipo determinístico basado en el análisis de los componentes principales para estimar relaciones entre el cambio climático y el rendimiento de los cultivos de maíz en la localidad de Palca ya que los datos de entrada y las relaciones existentes en el sistema son especificados al inicio, es decir, no influye el azar en los resultados obtenidos.

Una vez obtenidos los datos del clima se procedio a implementar el modelo de simulación para la cosecha de maíz utilizando la ecuación resultante. Para esto se uso el Simulink, parte del software Matlab donde se ingresa la superficie en m2 que se pretende sembrar y da como resultado la cantidad de producción de maíz, con los siguientes resultados.

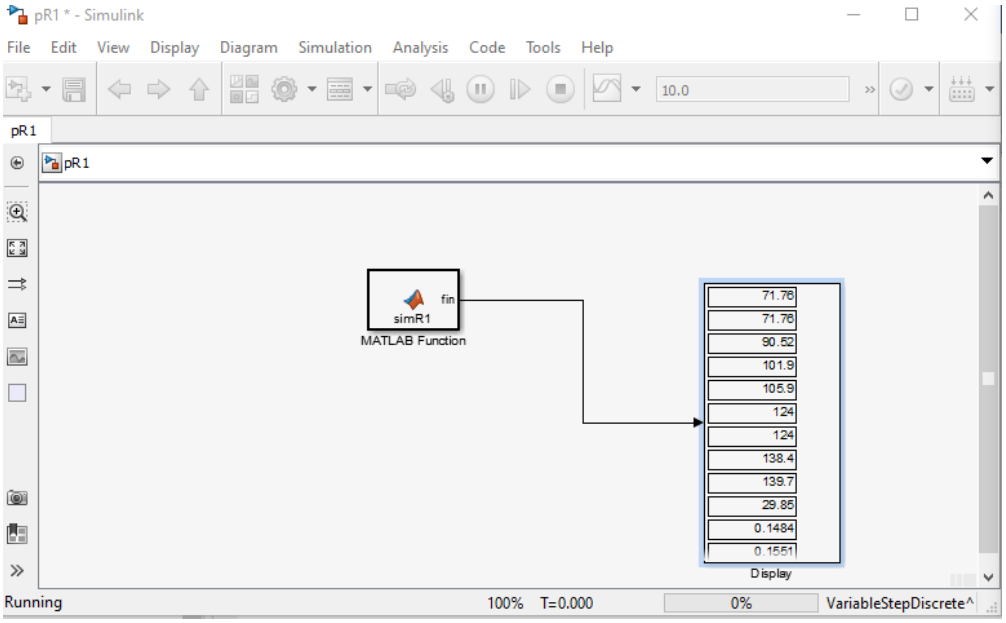


Fig.3. 14 Modelo de simulación de la producción de maíz

Fuente. Elaboracion propia hecha en Simulink de Matlab

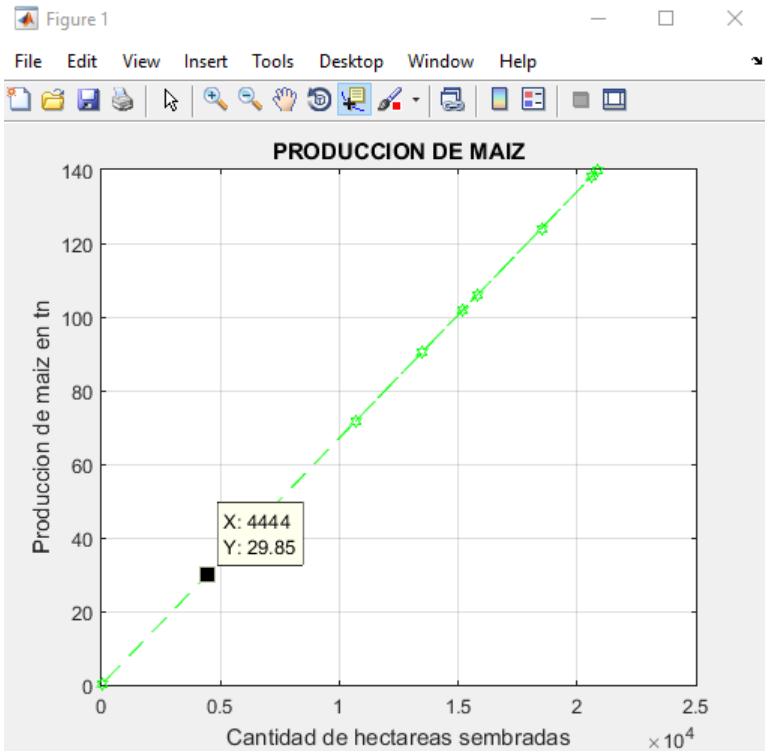


Fig.3. 15 Gráfica generada por el modelo de simulación

Fuente. Elaboración propia usando Simulink de Matlab

3.4.2 MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA

Se desarrolló un modelo de optimización dinámica para simular como responde el rendimiento de la producción de los cultivos de maíz por el cambio climático.

El modelo AquaCrop requiere la siguiente información meteorológica mensual: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación (Pp) y evapotranspiración de referencia *(ETo);* además, considera una concentración media anual de CO_2 en la atmósfera de 352.24 ppm para el año 2000, según datos del Senamhi. Los valores de la concentración de este gas pueden substituirse con las de las emisiones actuales (Raes *et al.,* 2009b). La producción de biomasa y de grano depende de los parámetros del cultivo. La ecuación general para estimar el rendimiento del cultivo *(Y*) es la ecuación:

$$Y = HI * Bi$$

Donde:

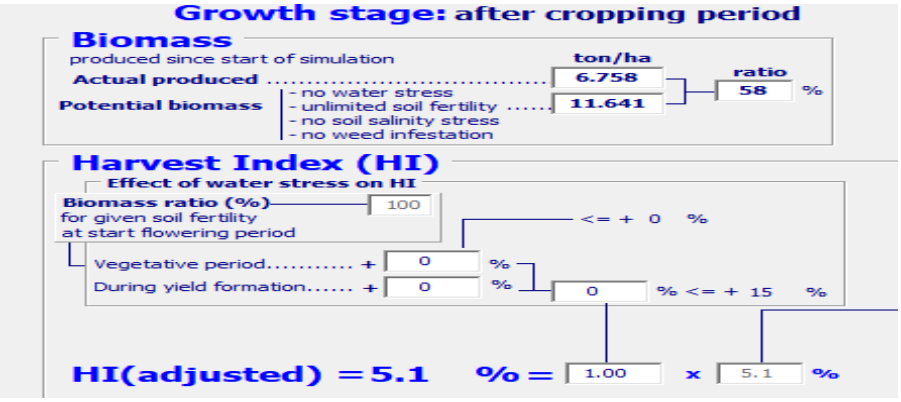
Y= Es el rendimiento de la cosecha

Bi = Es la biomasa del cultivo de maíz.

HI = Datos índice de la cosecha de la cosecha.

El modelo calcula la transpiración diaria de los cultivos de maíz, posteriormente el modelo estima el rendimiento en función de la transpiración diaria del cultivo

Tabla 3. 1 Resultado de la simulación de la cosecha de maíz



Fuente. Elaboración propia usando el software de AquaCrop

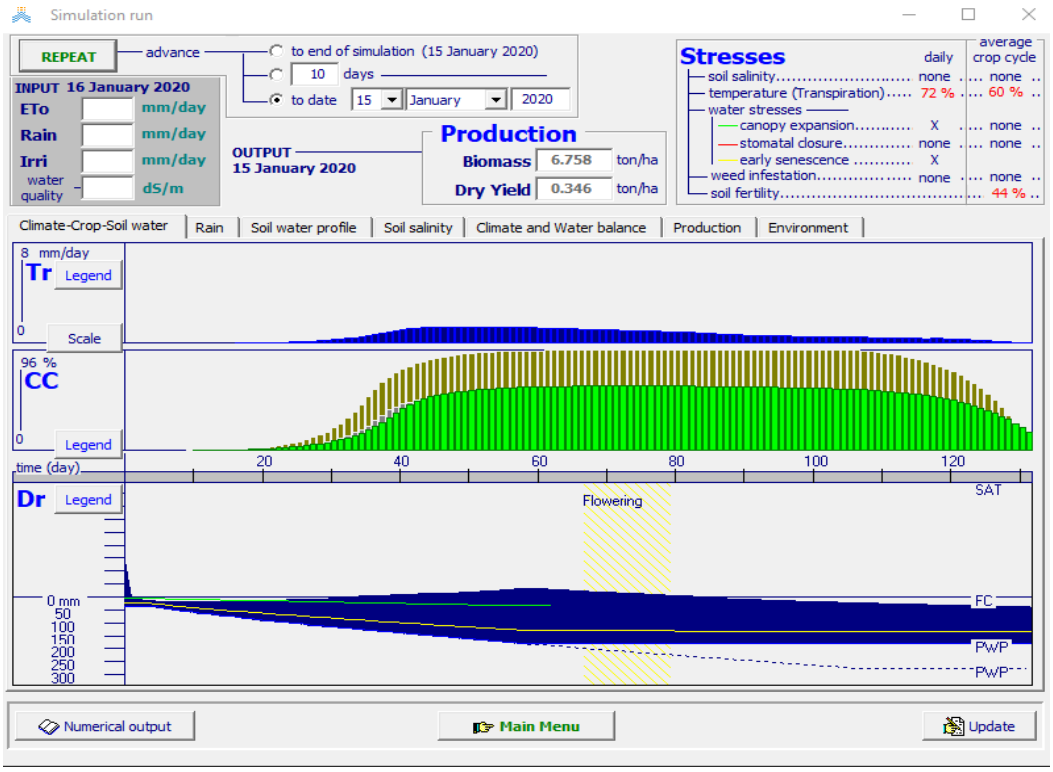


Fig.3. 16 Resultado del modelo de simulación de la producción de maíz
Fuente. Elaboracion propia. Software AquaCrop

Donde el resultado de la simulación indica que:

Existe una cantidad de producción de maíz en la localidad de Palca por año de 6.758 Tn/h. Resultado que coincide con el modelo de simulación estático y las ecuaciones encontradas que dan el mismo resultado final.

Se pudo validar este modelo comparando con otro modelo realizado llamado el choklito predictor y el modelo de simulación en Simulink, usando la ecuación encontrada donde calcula los valores iguales en su producción variando en un margen de error menor al 1%.

Para la realización de este modelo primeramente se hizo los respectivos análisis de variabilidad los cuales fueron los siguientes:

3.4.3 PRUEBA DE LA CORRELACIÓN DE SPEARMAN

Para analizar la asociación entre los datos de la producción de maíz y los datos del clima entre los años 2006-2019

Tabla. 3. 10 Datos reales obtenidos del Senamhi y datos pronosticados del año 2019

AÑOS	PRECIPITACIONES	TEMP.MAX	TEMP.MIN	RENDIMIENTO
2016	69,85	19,76	5,77	75
2017	107,11	20,33	5,64	74
2018	233,35	21,15	6,08	74
2019	19,45	18,43	5,95	72

Fuente. Elaboración propia, 2020

Se obtuvo el promedio medio de las variables del clima de 4 años para poder compararlo con el rendimiento en la cosecha del maíz por año realizando el cálculo de la correlación de Spearman. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Rho de Spearman: rendimiento; PRECIPITACIONES

Correlaciones:

Rho de Spearman	-0,642
Valor p	0,365

Esto nos indica que existe una correlación fuerte negativa por lo tanto existe influencia entre los datos de la precipitación y el rendimiento del maíz

Rho de Spearman: rendimiento; TEMP.MAX

Correlaciones:

Rho de Spearman	0,315
Valor p	0,679

Esto nos indica que existe una correlación positiva fuerte, por lo tanto, existe una fuerte influencia entre los datos de la temperatura máxima y el rendimiento del maíz

Rho de Spearman: rendimiento; TEMP.MIN

Correlaciones:

Rho de Spearman	0,302
Valor p	0,536

Esto nos indica que existe una correlación positiva fuerte, por lo tanto, existe una débil influencia entre los datos de la temperatura mínima y el rendimiento del maíz

3.4.2.2 VALIDACION DEL MODELO DE SIMULACION

Se puede concluir entonces en base a los resultados obtenidos de los análisis de la correlación de Spearman, que existe una relación entre los cambios del clima y el rendimiento en la cosecha del maíz en la localidad de Palca. Esto se demuestra en los resultados que se obtienen del modelo de simulación estático y el dinámico.

CAPÍTULO IV

4. VALIDACIÓN DE LOS DATOS DEL CLIMA PRONOSTICADOS

En las pruebas del modelo de simulación tomadas con números aleatorios al azar según el rango que se obtuvo del pronóstico realizado, se obtuvieron resultados favorables.

Se realizo el pronóstico en el modelo de simulación para la temperatura mínima de la localidad de palca para el año 2018, utilizando datos anteriores del 2016 y 2017 y datos aleatorios pronosticados mediante la ecuación resultante del modelo de simulación que es:

$$P = \frac{\sum_{n=1}^{12} d_a}{12}$$

Donde d_a= Números aleatorios generados

Tabla.4. 1 Pronóstico generado por el modelo de simulación

Meses	Datos de la temperatura minima en Palca 2016-2017
ene-16	8.0
feb-16	8.1
mar-16	7.7
abr-16	6.4
may-16	3.1
jun-16	1.6
jul-16	1.8
ago-16	2.3
sep-16	0.0
oct-16	6.3
nov-16	6.8
dic-16	8.0
ene-17	8.0
feb-17	8.0
mar-17	7.6
abr-17	6.8
may-17	4.8
jun-17	2.5
jul-17	1.0
ago-17	3.1
sep-17	5.1
oct-17	6.2
nov-17	8.0
dic-17	8.1

Fuente. Elaboracion propia adaptada usando el modelo de simulación de Matlab

El resultado del pronóstico fue el siguiente:

Tabla.4. 2 Datos reales y pronosticados sobre la Temperatura Mínima en Palca

TABLA DE DATOS DE LA TEMPERATURA MINIMA EN PALCA			
MESES	DATOS REALES	DATOS PRONOSTICADOS	
ene-18	8,4573	8,5274	
feb-18	7,4170	7,6330	
mar-18	5,7901	6,0385	
abr-18	4,0427	4,2130	
may-18	2,6750	2,6932	
jun-18	2,0785	1,9253	
jul-18	2,4239	2,1345	
ago-18	3,6119	3,2583	
sep-18	5,3021	4,9658	
oct-18	7,0106	6,7546	
nov-18	8,2481	8,0991	
dic-18	8,6605	8,6045	

Fuente. Elaboracion propia usando el modelo de simulación de matlab

El gráfico de la dispersión de datos y el resultante final del coeficiente de correlación R^2 es:

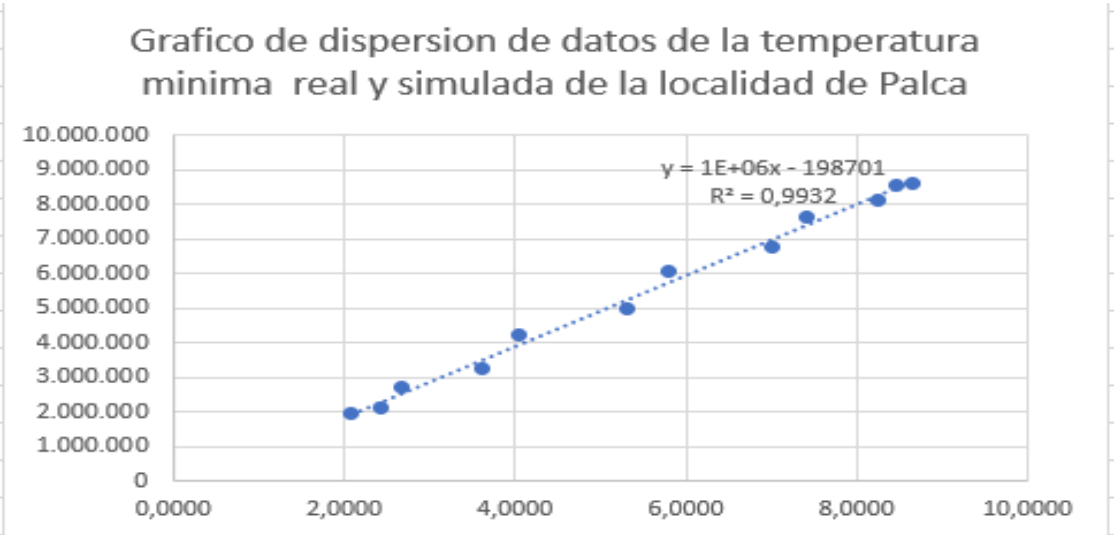


Fig.4. 1 Dispersión de datos ente la temperatura mínima real y la pronosticada
Fuente. Excel usando el modelo de regresión lineal, 2019

R^2 = 0,9932

R^2 Es el Coeficiente de correlación **y** nos dice qué porcentaje de la variabilidad total en una de las series de tiempo puede ser explicada por la variable regresora o la serie de tiempo pronosticada, en consecuencia, es una medida de la capacidad de pronóstico del modelo.

.

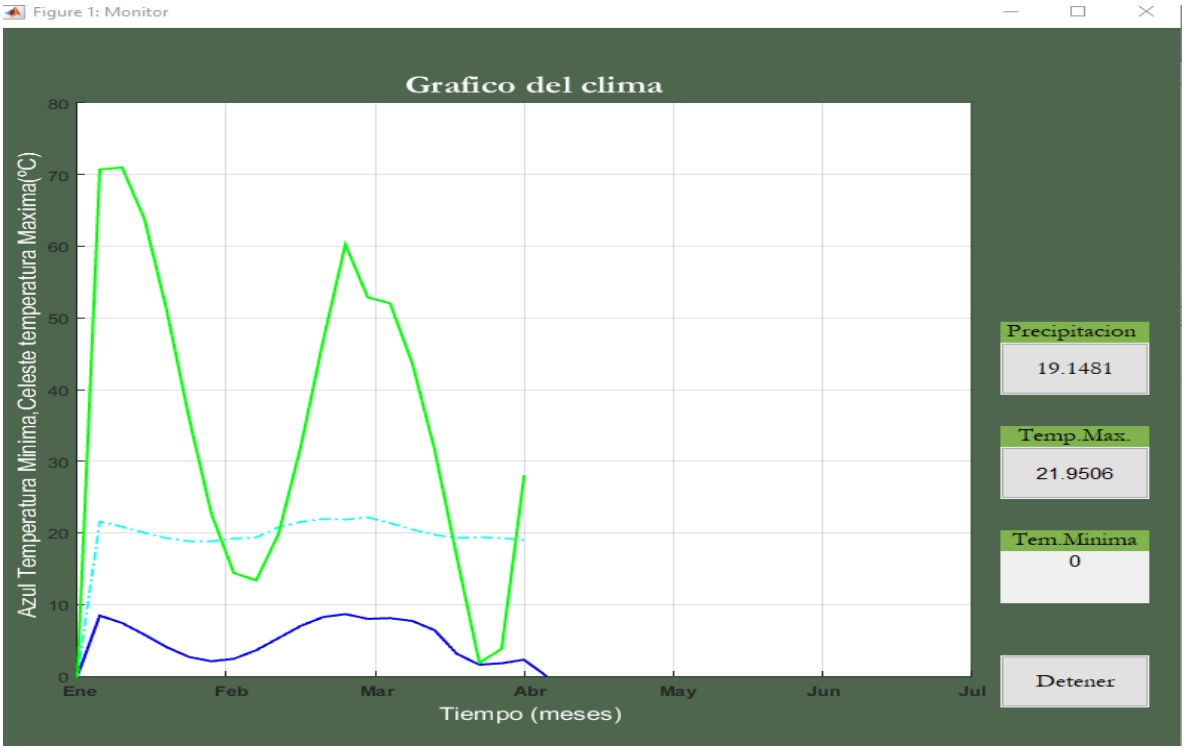


Fig.4. 2 Gráfico de la simulación del pronóstico del clima
Fuente. Resultado del análisis y pronostico realizado en matlab, 2019

4.1 VALIDACIÓN DEL PRONÓSTICO DE LOS DATOS DEL CLIMA

Para la validación del pronóstico realizado se usa la prueba de Kolmogorov-Smirnov de la siguiente manera:

4.1.1 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS

H_0 : El cambio climático tiene efecto en los cultivos de maíz y por lo tanto en los resultados en la cosecha en la localidad de Palca en el departamento de La Paz, Bolivia en un 95%.

$\mathbf{H_1}$: El cambio climático no tiene efecto en los cultivos de maíz y por lo tanto en los resultados en la cosecha en la localidad de Palca en el departamento de La Paz, Bolivia en un 95%.

4.1.2 NIVEL DE SIGNIFICANCIA

El grado de confianza tomado para la aceptación de la Hipótesis Nula es del 95%. Por lo tanto, el nivel de significancia es:

$$\alpha = 0{,}05$$

Estos valores son altos debido a que se trabaja con datos recolectados por el Senamhi y de la alcaldía en la localidad de Palca.

4.2. ESTADÍSTICO DE PRUEBA

Para realizar la prueba de hipótesis se toma como muestras los datos de series de tiempo meteorológicas obtenidas del Senamhi sobre las temperaturas máximas y mínimas y precipitación de la localidad de Palca y el pronóstico de 1 año.

4.3. PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

Esta prueba sirve para verificar o negar la hipótesis que un conjunto de observaciones proviene de una distribución.

A continuación, se establecen los datos para realizar la prueba en la serie de tiempo pronosticada para la temperatura mínima.

Nivel de significancia=0,05

Tamaño de muestra: n=28

Estadistico Kolmogorov-Smirnov:

$$\mathrm{KS} = \max_x |\mathrm{Fe}(x) - \mathrm{F}(x)|, -\infty < x < \infty$$

Donde $\mathrm{Fe}(x) - \mathrm{F}(x)$ son las frecuencias.

.

Para utilizar la variable de la temperatura mínima se tuvo que realizar previamente un ajuste de datos mediante una transformación de Box Cox luego se usó la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Con los siguientes resultados.

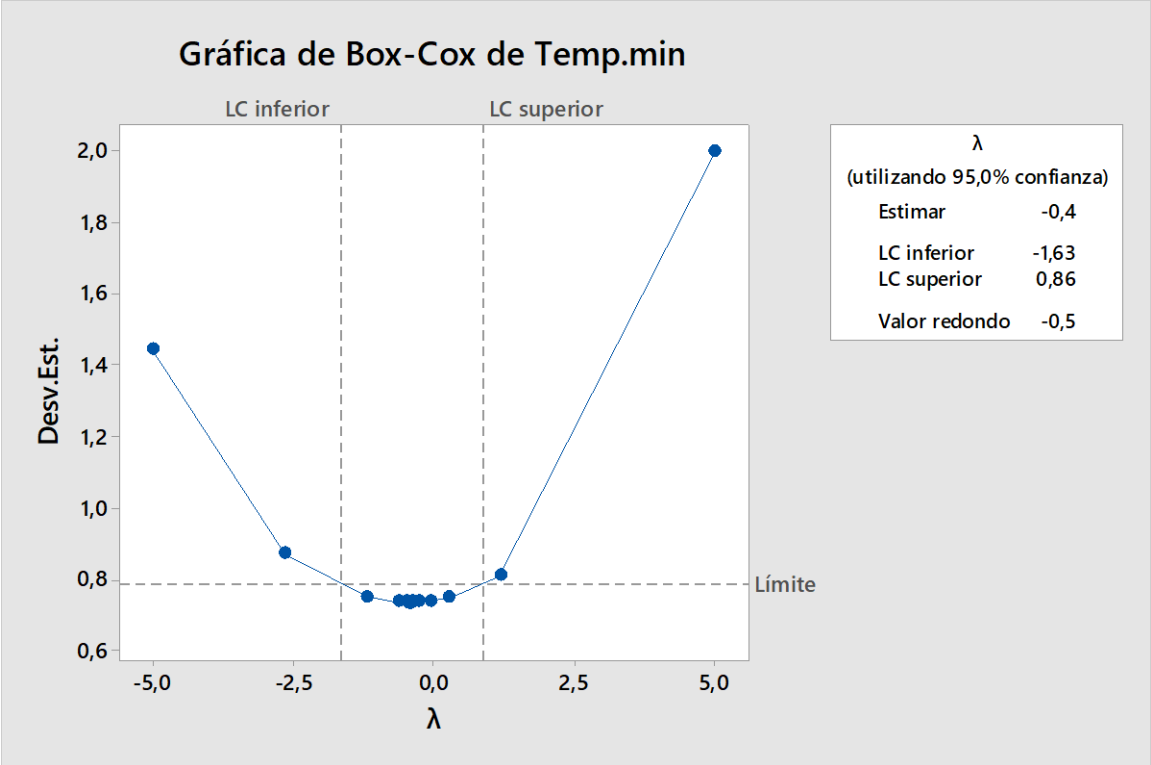


Fig.4. 3 Resultados de la aplicación del ajuste de datos
Fuente. Elaboracion propia

Las transformaciones de Box y Cox son una familia de transformaciones potenciales usadas en estadística para corregir sesgos en la distribución de errores, para corregir varianzas desiguales (para diferentes valores de la variable predictora) y principalmente para corregir la no linealidad en la relación (mejorar correlación entre las variables),

Posteriormente se realizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov con el siguiente resultado:

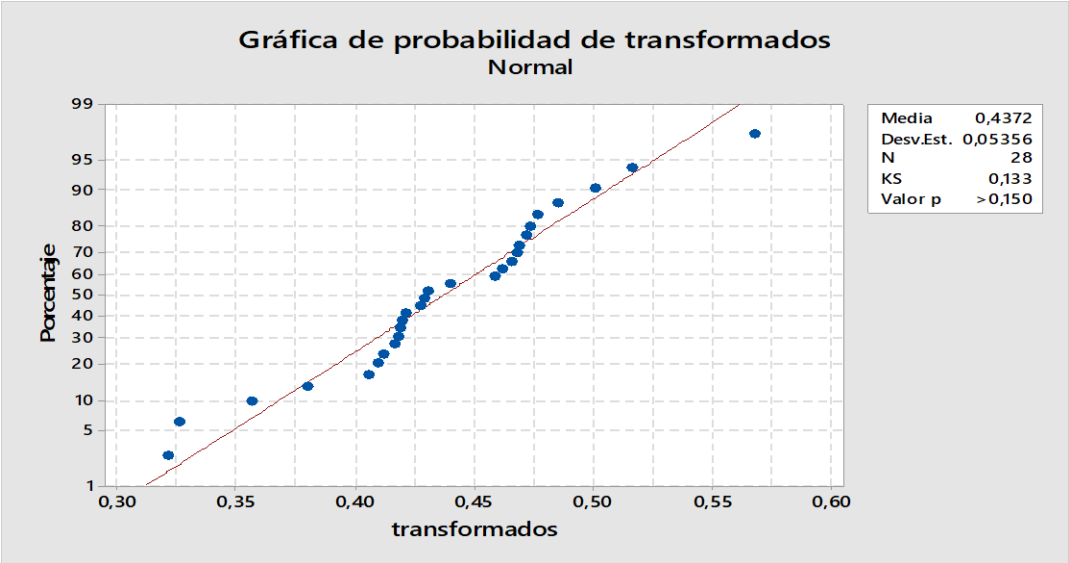


Fig.4. 4 Resultados de la aplicación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov
Fuente. Elaboracion propia

El valor p del test KS es 0.150 mayor al valor de significancia del 0,05 por lo tanto se acepte la hipótesis nula Ho.

Prueba para la temperatura máxima:

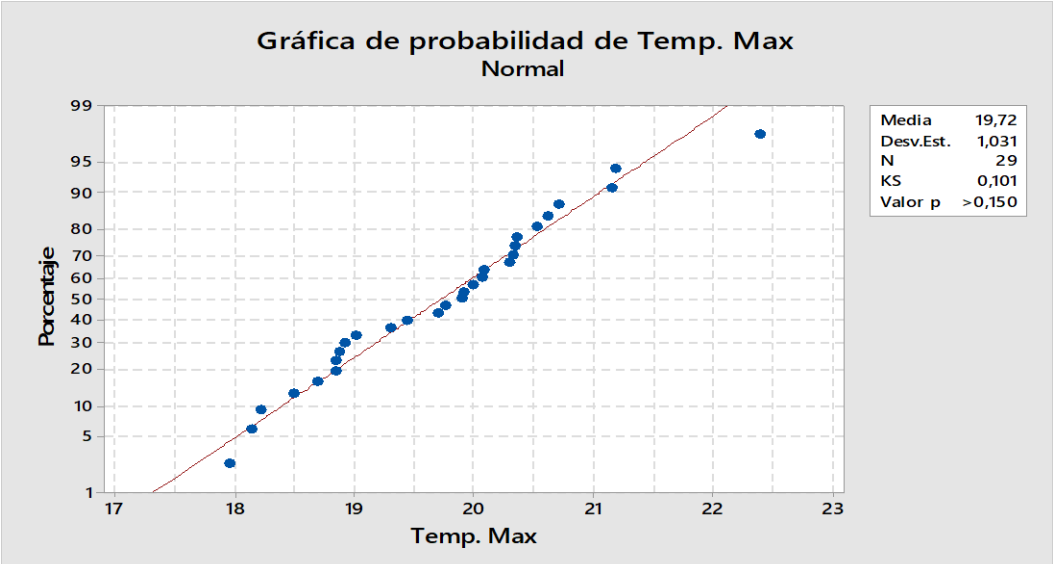


Fig.4. 5 Resultados de la aplicación de Kolmogorov-Smirnov a la temp. máxima

Fuente. Elaboracion propia

El valor p del test KS es 0.150 mayor al valor de significancia del 0,05 por lo tanto se acepta la hipótesis nula Ho.

Posteriormente se procedio a realizar la prueba de Kolmogórov-Smirnov a la variable de Precipitaciones con el siguiente resultado:

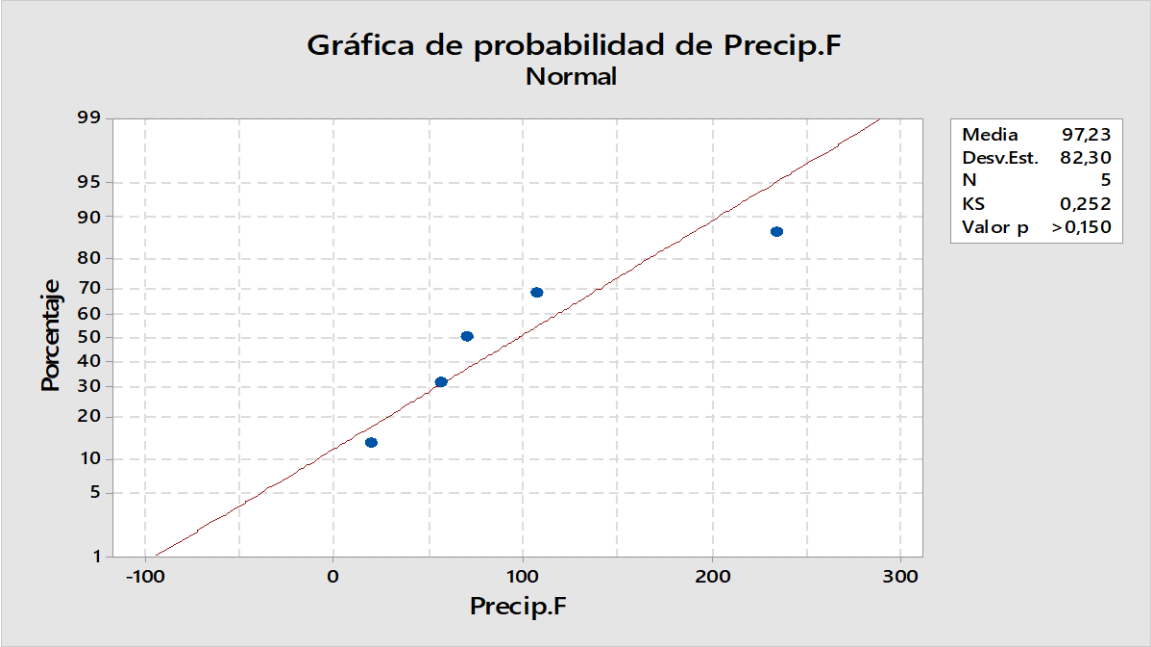


Fig.4. 6 Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov en las precipitaciones
Fuente. Elaboracion propia

El valor p del test KS es 0.150 mayor al valor de significancia del 0,05 por lo tanto se acepte la hipótesis nula Ho.

4.4 VALIDACIÓN DEL PRONÓSTICO DE LA COSECHA DEL MAÍZ

Para el análisis de los datos obtenidos para el pronóstico de la cosecha del maíz en relación a los años se tiene:

Variable 1= datos de la cosecha de maíz por año.

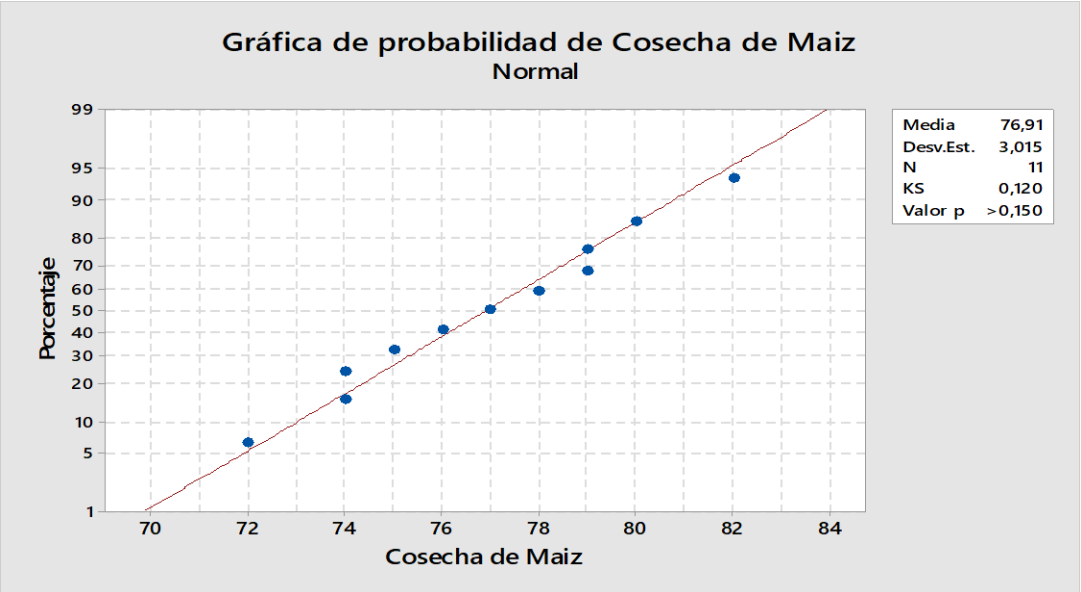


Fig.4. 7 Gráfico del análisis de los datos del pronóstico de la cosecha de maíz
Fuente. Resultado del análisis y pronóstico realizado en minitab, 2019

Prueba	
Hipótesis nula	H_0: 95%
Hipótesis alterna	H_1: $\neq$ 95%

Valor α	Valor p
0,18	0,150

En este estudio, el propósito principal de la función de producción es investigar el relación entre el rendimiento de los cultivos y el cambio climático.

Está considerado como una pérdida de cosecha un resultado contable negativo por lo que el productor o técnico debe reducirlas al mínimo de tal manera que no sobrepasen los niveles de tolerancia de pérdidas establecidas para el cultivo. Estos valores van a depender del rendimiento promedio obtenido.

Teniendo en cuenta esto se tiene que las cosechas de maíz durante los siguientes años por hectáreas son:

Tabla.4. 3 Relación de hectáreas y producción

AÑOS	SUPERFICIE(m2)	CANTIDAD (qq/ha)
2011	10700	72
2012	10700	71
2013	13500	91
2014	15200	102
2015	15800	106
2016	18500	125
2017	18500	123
2018	20639	139
2019	20639	137

Fuente. Elaboración propia

Por una regla de 3 simple se tiene que:

Si en 10700 he, sembradas se cosecharon en el año 2011 73 Tn. de maíz. Y el año 2012 en una superficie igual se cosecharon 71 Tn. de maíz, verificando en los datos, esto se repite entre los años 2016 y 2017 y los años 2018 y 2019 se tiene:

$$72 \underset{es\ a}{\longrightarrow} 100$$

$$71 \overset{es\ a}{\longleftarrow} X$$

X = 97.26%

Entonces p= Perdida en la cosecha

$$p = 100 - X$$

En todos los casos tendríamos lo siguiente:

Tabla.4. 4 Resultado del análisis

AÑOS	PÉRDIDAS EN %
2011 - 2012	1.388
2016- 2017	1.600
2018 -2019	1.438
TOTAL PROMEDIO	**1.47**

En un promedio del 1.47% se encuentran las perdidas por año en la cosecha de maíz de la localidad de Palca.

El valor p del test KS para este caso es de 0.150 mayor al valor de significancia del 0,05 por lo tanto se acepta la hipótesis nula Ho.

4.5 TOMA DE DECISIÓN

Teniendo en cuento los resultados de los análisis de la correlación de Spearman que indican que existe una relación entre el cambio climático y la cosecha de maíz más los resultados de KS se puede afirmar que:

Se acepta la hipótesis nula Ho que indica: El cambio climático en la localidad de Palca disminuye la producción de maíz en un 1% anuales.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En las conclusiones y recomendaciones se tienen:

5.1 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente tesis cumplen con los objetivos planteados, ya que se ha analizado y verificado el efecto del cambio climático en los cultivos de maíz y su influencia sobre la cosecha en la localidad de Palca en base a metodologías comprobadas y análisis estadísticos-matemáticos, de esta forma se verifico que SI existe un efecto del cambio climático sobre los cultivos de maíz los cuales influyen en su producción final en la cosecha y con esta información se desarrolló el modelo de simulación para el pronóstico de la cosecha de maíz .

Se pudo estudiar los efectos del cambio climático en los cultivos de maíz de la localidad de Palca satisfactoriamente., así como también el impacto que estos cambios ejercen sobre el objetivo de estudio.

.

Se realizo el prototipo de software para un modelo de simulación para el pronóstico de la cosecha del maíz en la localidad de palca teniendo en cuenta el cambio climático a futuro en la localidad de Palca.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda tomar en cuenta las diferentes variables y variantes extrañas, que influyen en el clima local, así como también los recientes incendios de la Chiquitanía, los cuales son elementos externos que influirán en los próximos años debido al cambio en los movimientos de los vientos Alisios que influyen significativamente en la atmosfera y en los cambios de temperaturas y estos a su vez en los resultados del pronóstico.

Para futuras investigaciones en la misma línea, a continuación, se presentan algunas ideas:

- Realizar mapas interactivos meteorológicos con los resultados obtenidos.
- Incluir en los estudios y análisis la teoría del caos ya que el clima tiene un comportamiento caótico e impredecible.
- Se recomienda ampliar la manera de representar los resultados del pronóstico de la simulación usando SIG para su mejor comprensión.
- Se recomienda tomar en cuenta los aspectos, políticos, sociales, económicos, costos, ataques de plagas existentes a los cultivos de maíz y problemas de salud ocurridos dentro de la población de la localidad de Palca, para tener una visión más completa al respecto, ya que estos aspectos influyen en la siembra, desarrollo y cosecha final del maíz, puesto que estos aspectos no están siendo analizados en este estudio debido a que no es el propósito de este proyecto averiguar el por qué ha disminuido la cosecha de maíz en la localidad de Palca sino ver si esta disminución en la cosecha tiene relación con el cambio climático en los cultivos de maíz y si influye en el desarrollo y en su cosecha final.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Andrade, M. F., & Blacutt, L. A. (2010). Evaluación del modelo climático regional PRECIS para el área de Bolivia: comparación con datos de superficie. Revista Boliviana de Física, 17(17), 1-12.

Aldanalisis. (2020). Recuperado 9 de julio de 2019, de aldanasis website: <http://aldanalisis.blogspot.com/2012/04/pronosticos-en-investigacion-clinica.html>

Agulló Tomás, Esteban (1997). Jóvenes, Trabajo e Identidad (en español). Universidad de Oviedo, pp. 77. ISBN 8474689821.

Achacollo, N,. Vásquez, G., Quispe, R., Murillo, M. (2012). Compendio Agropecuario: Observatorio Agroambiental y Productivo (p. 488).

Bernuez (2012). Recuperado 26 de junio de 2018, de Gaceta website: < http://gaceta.rsme.es/abrir.php?id=1063>

Bijari(2019). Recuperado 15 de junio de 2018, de wikipedia website: <https://es.wikipedia.org/wiki/Simulación#:~:text=La%20experimentación%20puede%20ser%20un,teoría%20o%20en%20una%20ley>

Blog, L. C. (2020). Maíz Forrajero. Recuperado 26 de junio de 2018, de La Cobacha website:< https://www.lacobacha.com.ec/producto/maiz-forrajero-bolsa-4-5-kg/>

Canastuf.(2020). Recuperado 26 de junio de 2018, de Calameo website: <https://es.calameo.com/read/005964459d1ae1e194412>

Camacho, E. (2017). Revista de la Carrera de Ingeniería Agronómica – UMSA. ISSN: 2519-9382. p.562.

Dagsa, B. (2017). El grano de maiz. Recuperado 11 de abril de 2018, de Dacsa group website: <https://www.dacsa.com/es/grano-maiz/#:~:text=Composición%20del%20grano&text=Pericarpio%3A%20Capa%20exterior%20de%20cubierta,ingreso%20de%20hongos%20y%20bacterias>.

Dakos, (2018). CSIC. Estación Biológica de Dodaña. Recuperado 18 de Mayo, de OEI website:<https://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/?Un-modelo-matematico-permitira>.

De la Fuente. (2019). U.A.M. Universidad Autónoma de Madrid. Recuperado 5 de junio, de estadística.net website: <http://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/SERIESTEMPORALES/modelo-arima.pdf>

Deras,H. (2018) Guía técnica del cultivo de maíz. Pg.11,12. Recuperado 18 de mayo de 2018 de repiica website:< http://repiica.iica.int/docs/b3469e/b3469e.pdf>

ET. (2016). Estrategias de Trading. Recuperado 5 de junio, de estrategiastrading website: <https://estrategiastrading.com/series-estacionarias/>

EC2C. (2019). Plataforma A.I. que permite apoyar el proceso de toma de decisiones. Recuperado 12 de mayo de 2018, de ec2ce website: <https://www.ec2ce.com/>

F.A.O.(2007). I N F O R M E E S P E C I A L MISIÓN FAO/PMA DE EVALUACIÓN DE CULTIVOS Y SUMINISTROS DE ALIMENTOS EN BOLIVIA. Recuperado 8 de julio de 2020, defao.org website: http://www.fao.org/3/ah867s/ah867s00.htm

Fernández.(2009) Recuperado 23 de Mayo del 2018, de modelos website:<https://modelo-determinisco.webnode.com.ve/news/modelo-deterministico/>

Flores et al (2014). Recuperado el 25 de agosto de 2020 de la website: < http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014001402007&lng=pt&nrm=iso&tlng=es>

García, Delfín & Azero (2017) Recuperado el 25 de agosto de 2020 de la website: < http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892017000200003>

Gallardo Vargas, M. F. (2014). Evaluación agronómica de variedades de maíz (Zea mays), bajo el efecto de niveles de estiércol porcino, valle de Zongo (Doctoral dissertation).

Gardez.(2018) Recuperado 18 de julio de 2018, de agronómica website:<https://fch.cl/wp-content/uploads/2013/06/Manualmaiz_baja.pdf>

Gutiérrez.(2010). Un deber de todos: Apoyar los procesos de adaptación al cambio climático. Capítulo 2 de la revista Nº 3 Agua Ambiente. Editorial Garza Azul. La Paz- Bolivia. 35,36, 40 págs.

Hernández, Paniagua E, (2017). CLIMÁTICO EN EL DEPARTAMENTO DE L A PERSPECTIVA DEL CAMBIO ANTIOQUIA. Revista Trilogía. Pag.115,130. Recuperado 30 de marzo de 2019, de Dialnet website: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4521402&info=r>

Hyndman.(2011). Análisis de la estacionariedad de la serie. Recuperado 8 de Junio de 2019, de Estadistical ecology website: <https://statisticalecology-st.blogspot.com/2011/01/analisis-de-la-estacionariedad-de-la.html>

Instituto Nacional de Estadística. (2019). Recuperado 18 de Mayo de 2019, de website:<https://www.google.com/search?q=GRAFICOS+ESTADISTICOS+SOBRE+LOS+CULTIVOS+DE+MAIZ+EN+BOLIVIA&tbm=isch&source=hp&sa=X&ved=2ahUKEwj1ma3_JTkAhUxrVkKHaliAxoQsAR6BAgJEAE#imgrc=GBnFPkrgcEvmjM>.

Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Recursos Naturales UMSA. (2018) < estrategia_adaptacion_sajhuaya_illimani.pdf>

Infoagro (2019). Recuperado el 5 de julio del 2019 del website: <https://www.infoagro.com/herbaceos/cereales/maiz.asp#:~:text=El%20ma%C3%ADz%20llega%20a%20soportar,temperaturas%20de%2020%20a%2032%C2%BAC.>

Khashei.(2011). Recuperado 3 de Agosto, de Stanford website:<https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/soco/projects/neural-networks/Neuron/index.html>.

Leandro.(2009). Recuperado 4 de Agosto de 2018, de vim videos website:https://www.bing.com/videos/search?q=determinar+si+una+serie+es+estacionaria+en+el+metodo+de+box+y+jenkins&&view=detail&mid=FCB949DD86A7739C667DFCB949DD86A7739C667D&&FORM=VRDGAR.

Makridakis, Spyros,Wheelwright, S. Hyndman, Rob(1994.Forecasting: Methods and Applications pg.35 IBS10.2307/2581936.The Journal of the Operational Research Society

Marin, S. A. C., Flores, R., & Ch, F. C. (2017). Comportamiento climático e incidencia en las regiones priorizadas en el programa papa. Recuperado de senamhi website: <https://www.senamhi.gob.bo/agromet/investigaciones/analisis_programa_papa_2017.pdf>

Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. Revista Habanera de Ciencias Médicas, 8(2), 0-0.

Meza. (2013). Recuperado 3 de Mayo de 2018, de upcmodelos website:<https://upcmodelos.blogspot.com/2013/03/modelos-estocasticos-y-deterministas.html>.

Meza T, Vivaz. (2013). Paragon. Recuperado 19 de Mayo de 2019, de Paragon website:< https://www.paragon.com.br/es/academico-2/que-es-simulacion>.

Ministerio de Comunicación. (2018). El principal cultivo agrícola de Palca es el maíz. Recuperado 17 de Mayo de 2019, ministerio de comunicaciones website:<http://enlace.comunicacion.gob.bo/index.php/2018/01/08/el-principal-cultivo-agricola-de-palca-es-el-maiz/>

Molano (2011) EFECTO DEL RIEGO DEFICITARIO EN DOS VARIEDADES DE MAÍZ, COMO ESTRATEGIA DE ADAPTACION AL CAMBIO CLIMATICO, EN LA COMUNIDAD LA GRANJA, MUNICIPIO DE PALCA, DEPARTAMENTO DE LA PAZ. Tesis de grado. Recuperado el 13 de abril de 2018. Repositorios Umsa. Website: <http://repositorios.umsa.bo>

MDRyT (2010) “Afectación del sector agropecuario por el cambio climático”, Informe técnico Unidad de Contingencia Rural UCR-MDRyT, La Paz Bolivia.

Morales. (2017). Recuperado 18 de Mayo de 2019, de Gráficos de cambio climático dewebsite:<https://www.google.com/search?q=GRAFICOS+ESTADISTICOS+SOBRE+EL+CAMBIO+CLIMATICO++LOS+CULTIVOS+DE+MAIZ+EN+BOLIVIA&tbm=isch&tbs=rimg:CVsGkhY7QRWoIghbBpIWO0EVqCoSCVsGkhY7QRWoEbuA-K5UPgQN&tbo=u&ved=2ahUKEwij-

Oe5_5TkAhWGv1kKHdrVDMUQiRx6BAgBEA4&ictx=1&uact=3#imgrc=WpS83vUTWQtLUM:>

Nelson et al (2009). Cambio Climático el impacto en la agricultura y cambios en la adaptación, pg. 27.Recuperado el 12 de Agosto de 2019 de: <http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/costo%20adaptacion.pdf>

NCL.(2018). Recuperado 12 de Mayo, de INIs website:<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/106/38106925.pdf>

ONU. (2019). Cumbre sobre el clima Portal de las Naciones Unidas. Recuperado 5 de Mayo de 2019, de un.org website:<https://www.un.org/es/climatechange/un-climate-summit-2019.shtml>.

Pascuzzo. (2012). Pronósticos en Investigación Clínica. Recuperado 26 de junio de 2018, de Aldanalisis website:< http://aldanalisis.blogspot.com/2012/04/pronosticos-en-investigacion-clinica.html>

Pegger. (1998). Recuperado 26 de junio de 2018, de fao website: <http://www.fao.org/statistics/es/>

PNUD. (2011). Tras las huellas del cambio climático en Bolivia Estado. Programa de Las Naciones Unidas Para El Desarrollo, 144. Retrieved from. Recuperado 26 de junio de 2018, de undp.org website:< http://www.bo.undp.org/content/dam/bolivia/docs/Tras-las-huellas-del-Cambio-Climatico-en-Bolivia.pdf>

Quintanilla.(2018). Recuperado 27 de julio de 2018, de Scribd website: <https://es.scribd.com/document/377898908/Metodo-de-Descomposicion-Aplicado-Para-Un-Pronostico-de-Demanda-1>

Raffino. (2019). Recuperado 6 de mayo de 2018, de Metodología website: < https://concepto.de/metodologia/#ixzz67qWoUT95>.

SEDALP(2020). Recuperado 6 de julio de 2020, de autonomías,gobernacionlapaz website: <http://autonomias.gobernacionlapaz.com/sedalp/>

Senamhi.(2019). Recuperado 2 de junio de 2018, de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología website: <https://senamhi.gob.bo/index.php/inicio#tab3primary>

Scribd.(2020). Recuperado 8 de julio de 2020, de Scribd website: <https://es.scribd.com/document/136499044/EL-MAIZ>

Soto (2017). Impactos del cambio climático en comunidades andinas bolivianas dependientes de glaciares tropicales.). Recuperado 26 de junio de 2018, de weadapt website: https://www.weadapt.org/sites/weadapt.org/files/2017/november/anexo_27._cartilla_cc_espanol_0.pdf.

Tellería (2015), Repositorio Universidad Mayor de San Andrés. Recuperado el 18 de julio del 2018 de:< https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/7068>

TechFood. (2018). Inteligencia artificial y big data. Revista sobre tendencias alimenticias. Recuperado 7 de noviembre de 2019, de techfood website: <https://www.techfoodmag.com/ec2ce-inteligencia-artificial-y-big-data-agtech/>

U.M.S.A. (2015). Facultad de Agronomía Instituto de Investigaciones Agropecuarias y de Recursos Naturales. Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en comunidades

de Sajhuaya. Recuperado 8 de mayo de 2018, de weadapt website: <https://www.weadapt.org/sites/...org/.../anexo_9._vulnerabilidad_y_adaptacion_0.pdf>

U.M.S.A.(2015).Recuperado 17 de noviembre de 2018, de scielo website: <http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232014000200001>

Universidad Simón Bolívar(2009). Recuperado 5 de junio de 2018, de Slides website: https://es.slideshare.net/laniluiki90/pronosticos-16767106

U.S.O.N.(2017).). Recuperado 3 de noviembre de 2019, de Estadísticas matemáticas website: <http://www.estadistica.mat.uson.mx/Material/seriesdetiem..pdf>.

Viñas Rubio, J. M. (2013). Origen y desarrollos actuales de la predicción meteorológica. Encuentros Multidisciplinares.

Villareal, F. (2016). Introducción a los Modelos de Pronósticos). Recuperado 2 de junio de 2018, de matemática website: <http://www. matematica. uns. edu.ar/uma2016/material/Introducción_a_los_Modelos_de_Pronosticos. pdf.>

Wiki (2020). Recuperado 6 de julio de 2020, de wikipedia website: <https://es.wikipedia.org/wiki/Palca_(La_Paz)>

APENDICE A

JUNTA DE VECINOS APAÑA ORIGINARIA AFILIADO A LA FEDERACION DE JUNTAS VECINALES FEJUVE "PALCA" EL 28 DE FEBRERO DE 2016 PROVINCIA MURILLO

La Paz, 2 de Julio 2020

Señorita:

GIOVANKA OLIVER FERRUFINO

REF. INFORMES SOBRE SIEMBRA Y COSECHA DEL MAIZ BLANCO EN LA LOCALIDAD Y CERTIFICACION DE QUE NO TENEMOS ESTUDIOS SOBRE ESO

De nuestra consideración:

A tiempo de saludarla a UD. Le remitimos los datos que tenemos respecto a las cosechas de maíz blanco de los años que se tienen registrados en nuestros libros de actas como constan en los mismos.

2009 en 10.580 m2 se recogieron 82 quintales por hectárea

2010 en 10.700 m2 se recogieron 80 quintales por hectárea

2011 en 13.500 m2 se recogieron 79 quintales por hectárea

2012 en 15.200 m2 se recogieron 79 quintales por hectárea

2013 en 15.800 m2 se recogieron 78 quintales por hectárea

2014 en 18.500 m2 se recogieron 77 quintales por hectárea

2015 en 19.548 m2 se recogieron 76 quintales por hectárea

Al mismo tiempo tenemos a bien certificarle que no existe ningún proyecto planteado a la comunidad, ni conocemos ningún estudio que haya sido realizado sobre el clima y cómo influye este clima en los cultivos de maíz de esta localidad hasta el momento.

Eso es todo lo que tenemos a bien informarle a solicitud suya y esperamos sirva para realizar su Tesis en bien de la comunidad

Atte.:

ORGANIZACION SOCIAL
REP SERVICIOS BASICOS
Parte Alta Apaña Originaria
FEJUVE-PALCA
La Paz, Bolivia

Esteban Juan Limachi
1er. REPRESENTANTE
Parte Alta Apaña Originaria

Percy Johni Chambilla Peña
2do. REP. SERVICIOS BASICOS PARTE ALTA
APAÑA ORIGINARIO

Escaneado con CamScanner

APENDICE B

a Paz 2 de julio de 2020

JUNTA DE VECINOS APAÑA ORIGINARIA AFILIADO A LA FEDERACION DE JUNTAS VECINALES FEJUVE "PALCA" EL 28 DE FEBRERO DE 2016 PROVINCIA MURILLO

Señorita

GIOVANNKA OLIVER FERRUFINO

REF. INFORMES SOBRE SIMBRA Y COSECHA DE MAIZ BLANCO EN LA LOCALIDAD

De nuestra consideración:

A tiempo de saludarla a ud. Y desearle éxito en la elaboración de su tesis que coadyuvara a toda la comunidad de nombre MODELO DE SIMULACION PARA EL PRONOSTICO DEL EFCTO DEL CAMBIO CLIMATICO EN LOS CULTIVOS DE MAIZ DE LA LOCALIDAD DE PALCA, nosotros las autoridades de las juntas vecinales FEJUVE-PALCA tenemos a bien informarle sobre el estado de la siembra y cosecha del maíz de los años 2016-2017-2018, estos resultados son los que se encuentran registrados en nuestros libros por familias y recolección de las mismas en la alcaldía central.

2016 20639 m2 sembrados en la localidad y 80 quintales recolectados por hectárea sembrada.

2017 20837 m2 sembrados en la localidad y 76 quintales recolectados por hectárea sembrada.

2018 30526 m2 sembrados en la localidad y 64 quintales recolectados por hectárea sembrada.

Eso es lo que tenemos a bien informarle en respuesta a su solicitud y agradecerle por su trabajo.

Atte,

ORGANIZACION SOCIAL SERVICIOS BASICOS Parte Alta Apaña Originaria FEJUVE-PALCA La Paz Bolivia

Esteban Juan Limachi
1er. REPRESENTANTE
Parte Alt originaria

Percy Johni Chambilla Perca
2do. REP. SERVICIOS BÁSICOS PARTE ALTA APAÑA ORIGINARIO

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO A – ÁRBOL DE PROBLEMAS

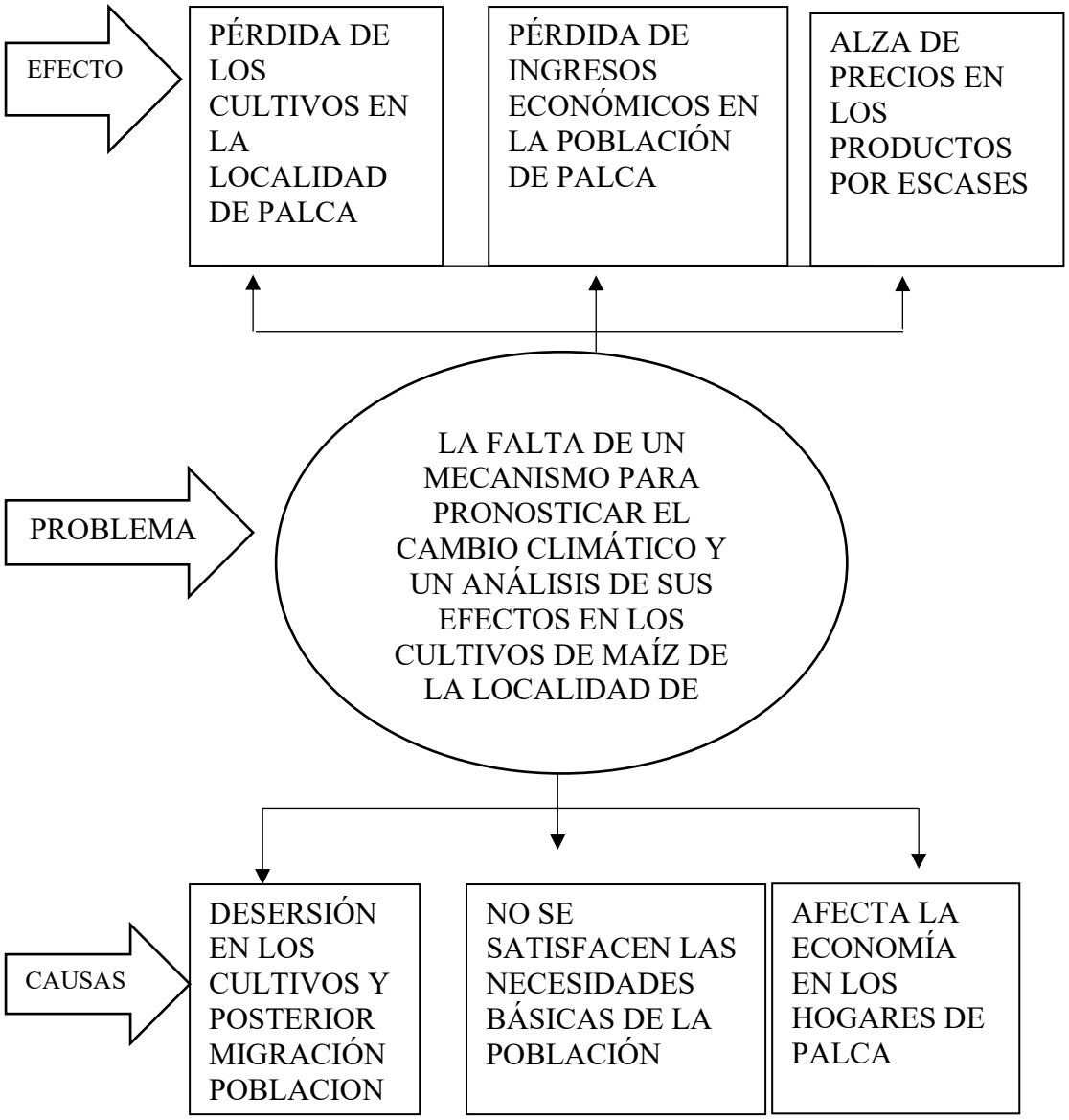


Fig. A.1. Árbol de Problemas
Fuente: Creación propia

ANEXO B - ÁRBOL DE OBJETIVOS

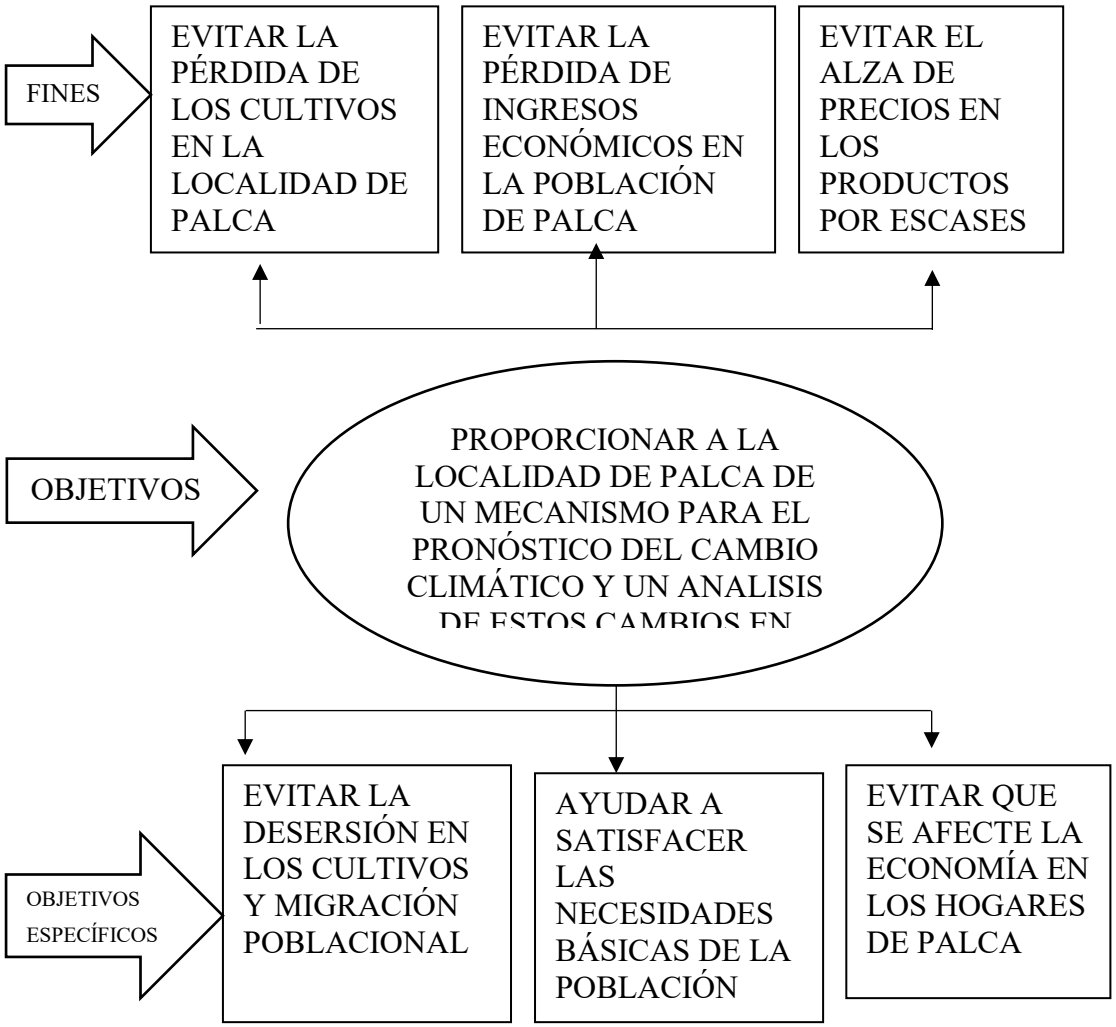


Fig. A.2. Árbol de Objetivos

Fuente: Creación propia

ANEXO C – MARCO LÓGICO

Tabla A.1. Marco Lógico.

Resumen narrativo del Proyecto	**Indicadores Objetivamente Verificables**	**Medios de Verificación**	**Supuestos**
Fin: Proponer un modelo matemático para el análisis del efecto del cambio climático en los cultivos de maíz para la localidad de Palca y el diseño de un prototipo de modelo de simulación para el pronóstico de los cultivos de maíz.	Análisis del efecto del cambio climático en los cultivos en la localidad de Palca	Se valida el modelo de simulación, mediante la comprobación de resultados del pronóstico utilizados con el t de Student y la correlación de Spearman.	Los pobladores de la localidad de Palca se verán beneficiados
Propósito: Otorgar una herramienta tecnológica que sirva para que los pobladores del Municipio de Palca puedan minimizar pérdidas en sus cultivos a futuro.	Porcentajes de la variabilidad de las temperaturas y precipitaciones de la localidad de Palca	La efectividad dependerá de los datos históricos obtenidos del Senamhi para el pronóstico del clima y de los datos de producción anual de maíz de la alcaldía de Palca.	Se alcanza una correlación del modelo matemático de $R^2 = 98{,}01\%$

Actividades: Las necesarias para producir la simulación del modelo de para pronóstico.	No se cuenta con ningún presupuesto establecido porque será un aporte a la localidad de Palca.	El presente modelo de simulación para pronóstico es de elaboración propia	El modelo se implementará en la localidad de Palca

Fuente: Creación propia

ANEXO D

Código empleado en matlab para la realización del modelo de simulación del pronóstico del clima.

```
function varargout=simulacionConResultados2(varargin)
  parar=false;fun=false;

  %crea una figura
  fig(1)=figure('name','Monitor','menubar','none','position',[200 200
800 700],'color',[0.3 0.4 0.3])
  movegui(fig(1),'center');
  axe(1)=axes('parent',fig(1),'units','pixels','position',[60 80 600
550],'ylim',[0 80],'ygrid','on', 'xgrid', 'on')
  set(gca,'XTickLabel',{'\bf Ene',' \bf Feb','\bf Mar',' \bf Abr', '
\bf May', '\bf Jun', '\bf Jul', '\bf Ago', '\bf Sep', '\bf Oct', '\bf
Nov', '\bf Dic'})

  %axe(2)=axes('parent',fig(1),'units','pixels','position',[60 80 600
550], 'xlim', [0 10],'xgrid','on', 'ygrid', 'on')
  %Modifica las etiquetas del eje x y y de el AXE
  title(['\bf \fontname{Garamond} \fontsize{18} \color{white} Grafico
del clima '])
  xlabel('\fontsize{13} \color{white} Tiempo (meses)')
  a=set(get(axe(1),'YLabel'),'String','\fontsize{13} \color{white}
Azul Temperatura Minima,Celeste temperatura Maxima(°C)')

  %Crea las lineas que se van a graficar en el axe, con su color y
grosor
  %correspondientes

lin(1)=line('parent',axe(1),'xdata',[],'ydata',[],'Color','b','LineWid
th',1.5);

lin(2)=line('parent',axe(1),'xdata',[],'ydata',[],'Color','c','LineWid
th',1.3, 'LineStyle','-.');

lin(3)=line('parent',axe(1),'xdata',[],'ydata',[],'Color','g','LineWid
th',1.5);

txbx(1)=uicontrol('parent',fig(1),'style','text','string','Tem.Minima'
,'position',[680 170 100 50],'background',[0.5 0.7
0.3],'callback',@texto,'fontsize',13, 'fontname', 'Garamond')
  txbx(2)=uicontrol('parent',fig(1),'style','text','string','
2019','position',[680 150 100 50],'callback',@texto,'fontsize',11)

txbx(3)=uicontrol('parent',fig(1),'style','text','string','Temp.Max.',
'position',[680 270 100 50],'background',[0.5 0.7
0.3],'callback',@texto,'fontsize',13, 'fontname', 'Garamond')

txbx(4)=uicontrol('parent',fig(1),'style','text','string','Precipitaci
on ','position',[680 370 100 50],'background',[0.5 0.7
0.3],'callback',@texto,'fontsize',13, 'fontname', 'Garamond')

  %Crea botones y cuadros de texto dentro de la figura.
```

```
bot(1)=uicontrol('parent',fig(1),'style','pushbutton','string','Detene
r','position',[680 50 100 50],'callback',@stop,'fontsize',13,
'fontname', 'Garamond')

bot(2)=uicontrol('parent',fig(1),'style','pushbutton','string','Datos[
°C]','position',[680 250 100 50],'callback',@ecuacion,'fontsize',11)

bot(3)=uicontrol('parent',fig(1),'style','pushbutton','string','Preci.
[mm]','position',[680 350 100 50],'callback',@ecuacion,'fontsize',13,
'fontname', 'Garamond')

  %%Funcion PARAR
  function varargout=stop(hObject,eventdata)
    parar=true;
  end

  %%Funcion Graficar  Ecuacion temperatura maxima
  function varargout=ecuacion(hObject,eventdata)
    fun=true;
  end

  %%funcion graficar
  % function varargout=grafique(hObject,evendata)
  tiempo=[0];
  salida=[0];
  salida2=[0];
  salida3=[0];

  %Cada cuanto se va graficando en el axe
  dt=0.3;

  %Limites iniciales en el AXE
  limx=[0 12];
  set(axe(1),'xlim',limx);

  %% Grafico
  k=1;nit = 300;

  while(~parar)
    dato=[8.4573 7.4170 5.7901 4.0427 2.6750 2.0785 2.4239 3.6119
5.3021 7.0106 8.2481 8.6605 8.0000 8.1000 7.7000 6.4000 3.1000 1.6000
1.8000 2.3000 0 6.3000 6.8000 8.0000  8.0000 7.3213 7.7000 6.4000
2.1621 1.6000 1.8000 1.1538 0 6.3000 6.8000 8.0000  7.6028 6.8393
7.7000 6.4000 2.1342 1.6000 1.8000 1.1538 0 6.3000 6.8000 7.6028
7.6028 6.8393 7.7000 6.8902 3.1342 1.6000 1.8000 1.1538 0.06 6.3000
6.8000 8.0028];
    dato2=[21.5865 20.8501 19.9908 19.2552 18.8314 18.8177 19.2164
19.341 20.7875 21.5335 21.9376 21.8647 22.1831 21.3617 20.4686 19.7117
19.302 19.3761 19.2822 19.0019 21.9506 20.9241 24.1459 23.136 22.8011
22.0474 21.1658 20.4084 19.9668 19.9508 20.2623 21.0207 21.9277
22.7243 23.1608 23.0893 23.4664 22.6089 21.6693 20.8687 20.4306
20.5005 20.4423 20.1375 23.2501 22.1507 25.549 24.4745];
    dato3=[70.712800 71.000290 63.811500 51.041540 36.023140 22.656970
14.398600 13.365200 19.792920 31.983880 46.754560 60.267020 52.8723
```

```
52.0367 43.6291 31.5604 16.4866 1.8698  3.8105  27.9144 19.1481
63.8791 15.8149 57.8279 39.6102 31.3241 22.6092 11.7175 4.6064 4.9451
10.6644 16.763 23.6109 29.3864 25.2571 24.1063 26.3474 17.0573 7.4381
3.3853  10.6357 10.4683 22.6823 1.6542 6.5563 38.6944 9.231 31.9658];

    for i=1:length(dato)
     datos=(dato(i))
     datos2=(dato2(i))
     datos3=(dato3(i))
     Y=datos;
     Z=datos2;
     X=datos3;

     if fun == true
      set(bot(2),'string',Z);
      set(bot(3),'string',X);
     end

     set(txbx(2),'string',Y);

     %Actualiza las variables del grafico
     tiempo=[tiempo tiempo(end)+dt];
     salida=[salida Y];
     salida2=[salida2 Z];
     salida3=[salida3 X];

     %Grafico con las lineas creadas anteriormente
     set(lin(1),'xdata',tiempo,'ydata',salida);
     pause(dt); %% espera 0.1 seg para cada interaciï¿½n

     if fun == true
       set(lin(2),'xdata',tiempo,'ydata',salida2);
     end

     if fun==true
         set(lin(3),'xdata',tiempo,'ydata',salida3);
     end

     if tiempo(end)>=limx % actualizo grafica cuando llega a su limite
en tiempo real
       limx=[1 limx(2)+12]
       set(axe(1),'xlim',limx)
     end
     k=k+1;

     if(k==nit)
      parar=true;
     end

     %funcion agregada que termina la ejecucion------
     if(parar==true)
         %fprintf("\n terminado")
         break
     end
```

```
      %-----------------------------------------------

      %mensajes de depuracion
      %fprintf("valor de parar=%s.\n",mat2str(parar))
      %fprintf("in for")

     end%end for

     %fprintf("\nno for")
   end%end while

parar=false;

end%end
```

ANEXO E

Código empleado para el modelo de simulación en Simulink

```
function fin = simR1()
coder.extrinsic('input');

%hold on
prompt = 'Introduzca la cantidad de hectáreas de siembra';
v = input(prompt);
X=1:20;

%X=[10700 10700 13500 15200 15800 18500 18500 20639 20837];
i=1;
    X(i)=10700;
    X(i+1)=10700;
    X(i+2)=13500;
    X(i+3)=15200;
    X(i+4)=15800;
    X(i+5)=18500;
    X(i+6)=18500;
    X(i+7)=20639;
    X(i+8)=20837;
t=10;
     X(t)=v;
     %t=t+1;

%plot(X,Y, 'dk');xlabel('Cantidad de hectareas
sembradas'),ylabel('Produccion de maiz en tn'), title('PRODUCCION DE
MAIZ')

a1=0.0067;
a0=0.0747;
%ecuacion de estado
fin=a0+a1*X;
plot(X,fin,'g--h');xlabel('Cantidad de hectareas
sembradas'),ylabel('Produccion de maiz en tn'), title('PRODUCCION DE
MAIZ')


grid
end
```

DOCUMENTOS