



**UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR  
SEDE CENTRAL  
Sucre – Bolivia**

**MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE  
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA CON EL DESARROLLO DE  
UN SOFTWARE BASADO EN INFORMACIÓN GEOESPACIAL  
EN EL DEPARTAMENTO DE CHUQUISACA**

**Tesis presentada para optar al Grado  
Académico de Magíster en  
Teledetección y Sistemas de  
Información Geográfica**

**MAESTRANTE: JAMIL SERGIO LENZ SALOMÓN**

**Sucre – Bolivia**

**2024**



**UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR  
SEDE CENTRAL  
Sucre – Bolivia**

**MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE  
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA CON EL DESARROLLO DE  
UN SOFTWARE BASADO EN INFORMACIÓN GEOESPACIAL  
EN EL DEPARTAMENTO DE CHUQUISACA**

**Tesis presentada para optar al Grado  
Académico de Magíster en  
Teledetección y Sistemas de  
Información Geográfica**

**MAESTRANTE: JAMIL SERGIO LENZ SALOMÓN**

**TUTOR: MSc. GUSTAVO AYALA TICONA**

**Sucre – Bolivia**

**2024**

## **DEDICATORIA**

Dedicatoria especial para mi padre (Ramón Lenz) y madre (Elsa Salomón) que ya están a lado del creador, a mi esposa Shirley, a mi suegra Josefina e hijos Joaquín y Emilio Alejandro, por todo el apoyo y amor incondicional recibidos durante mi formación en la Maestría.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres por su guía a lo largo de mi vida y el amor incondicional que me brindaron, a mi papá Ramón Lenz, que me apoyo en todo aspecto al cursar esta maestría y se preocupó hasta su último suspiro por mí y su familia, a mi querida mamá Elsa Salomón que me guio desde el cielo, como siempre lo hizo en vida, con mucho amor y comprensión.

A mi esposa e Hijos por los ánimos que me brindaron cuando quería rendirme, en los momentos duros que pasamos durante la elaboración de mi tesis y pandemia.

A mi amigo y asesor MSc. Gustavo Ayala, por su infinita paciencia, por su apoyo, orientación y sugerencias con las que pude concluir este trabajo.

A todos los docentes de la Maestría que nos brindaron los conocimientos sin egoísmo; a los amigos con los que compartimos largas horas de estudio para poder comprender las enseñanzas de nuestros queridos docentes.

## LISTADO DE ACRÓNIMOS

- **AI (Aridity Index)** - Índice de aridez.
- **BIAS(ESGO)** – Error Estadístico que muestra la realidad.
- **EDI (Effective Drought Index)** - Índice de sequía efectiva Precipitación y Evapotranspiración.
- **ESI (Evaporative Stress Index)** - Índice dFAPAR Anomaly (Anomalía de la fracción de radiación activa absorbida fotosintéticamente) y estrés evaporativo.
- **ETP / PET** - EvapoTranspiración Potencial.
- **FAPAR Anomaly** (Anomalía de la fracción de radiación activa absorbida fotosintéticamente).
- **GMET (Gridded Meteorological Ensemble Tool)** - Herramienta de ensamble meteorológico de cuadrícula.
- **LFI (Low Flow Index)** - Índice de bajo flujo.
- **MDRyT** - Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras.
- **MMAyA** - Ministerio de Medio Ambiente y Agua.
- **MODIS** - Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada.
- **NDVI** - Índice Diferencial Normalizado de la Vegetación.
- **NetCDF** - formulario de datos comunes en red.
- **PDSI (Palmer Drought Severity Index)** - Índice de severidad de sequía de Palmer.
- **PPCR** - Programa Piloto de Resiliencia Climática.
- **RDI (Reservoir Drought Index)** - Índice de sequía de embalse.
- **SENAMHI** - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- **SIG** - Sistema de Información Geográfica.
- **SMI (Soil Moisture Index)** - Índice de humedad del suelo.
- **SPEI (Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index)** - Índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración.
- **SPI** (Standard Precipitation Index) - Índice Estandarizado de Precipitación.
- **SSCI (Standardized Snow Cover Index)** - Índice de manto de nieve.
- **SSMI (Standardized Soil Moisture Index)** - Índice de humedad del suelo.

- **SSPI (Standardized SnowPack Index)** - Índice estandarizado de la capa de nieve.
- **VHI (Vegetation Health Index)** - Índice de salud de la vegetación.
- **VIDECI** - Viceministerio de Defensa Civil.
- **VRHR** - Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego.

## RESUMEN

El trabajo consiste en la caracterización de la amenaza de sequías en el departamento de Chuquisaca-Bolivia, que es muy azotado por este fenómeno climatológico, según VIDECI es el departamento más afectado anualmente con una 30 al 46% de afectación en los municipios, con información climática en el periodo 1980 a 2016. El propósito fue trabajar con información climática confiable y calibrada con datos tierra que represente realmente a los datos observados (estaciones), para ello se analizó datos de la rejilla del GMET (MMyA, 2017) generada para Bolivia y se recopiló información de estaciones fuera y alrededor de Chuquisaca del SENAMHI (111 estaciones) de las que quedaron 26 estaciones seleccionadas por la cantidad de datos útiles.

En el análisis de datos GMET vs. SENAMHI se concluye que se tienen muy buena correlación (0.97) pero hay un sesgo de -19 que nos quiere decir que el GMET está subestimando la precipitación; por lo que se generó una rejilla propia para el departamento de Chuquisaca, corrigiendo precipitaciones con las 26 estaciones seleccionadas en base a una interpolación que incorpora una Regresión Lineal Múltiple (MLR) en el proceso a partir de variables de terreno como la elevación, la pendiente y el aspecto(orientación de la pendiente del plano en relación con los puntos cardinales) desde 1980 a 2016.

En base a esta información generada y en base al software de apoyo realizado, se van comparando eventos de sequía a 1, 3, 6 y 9 meses de escala del SPI en los años que VIDECI informa SEQUIAS es los municipios de Chuquisaca.

Realizando el análisis estadístico se puede decir que el SPI a 3 meses de escala, es el que mejor representa las sequías en Chuquisaca al 99%(ver tabla 8), siendo este índice el más conveniente para el monitoreo para la sequía del mencionado departamento.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3.1 Situación Problémica .....	3
1.3.2 Formulación del problema .....	5
1.4 DELIMITACIÓN .....	6
1.4.1 Objeto de estudio .....	6
1.4.2 Campo de acción.....	6
1.5 OBJETIVOS .....	6
1.5.1 Objetivo General.....	6
1.5.2 Objetivos Específicos .....	6
1.6 HIPÓTESIS .....	7
1.6.1 Análisis de indicadores .....	7
1.7 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.7.1 Obtención de información climática y Selección de estaciones Meteorológicas.....	9
1.7.2 Datos de Precipitación GMET .....	10
1.7.3 Cálculo del índice de sequía SPI (Índice Estandarizado de Precipitación) .....	10
1.7.4 Información de Eventos de Sequia del Viceministerio de Defensa Civil (VIDECI) .....	13
1.7.5 Desarrollo Del Script SPI .....	14
1.7.6 Límites y alcance de la investigación.....	14
1.7.7 Métodos e instrumentos para la indagación empírica .....	15

<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>16</b>
2.1 MARCO TEÓRICO .....	16
2.1.1 La sequía y sus causas.....	16
2.1.2 La sequía y sus efectos.....	17
2.1.3 Marco Conceptual sobre la Sequía. ....	18
2.1.4 Métodos para la evaluación de la sequía .....	25
2.1.5 Índices hidrológicos para el monitoreo de sequias (MMAyA, 2020) ...	26
2.1.5.1 EDI (Effective Drought Index) - Índice de sequía efectiva Precipitación y Evapotranspiración .....	26
2.1.5.2 SPEI (Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index)- Índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración .....	26
2.1.5.3 AI (Aridity Index) - Índice de aridez .....	27
2.1.5.4 LFI (Low Flow Index) - Índice de bajo flujo.....	27
2.1.5.5 RDI (Reservoir Drought Index) - Índice de sequía de embalse.....	27
2.1.5.6 SSMI (Standardized Soil Moisture Index) - Índice de humedad del suelo. 27	
2.1.5.7 SSPI (Standardized SnowPack Index) - Índice estandarizado de la capa de nieve.....	27
2.1.5.8 SSCI (Standardized Snow Cover Index) - Índice de manto de nieve.. .....	28
2.1.5.9 RDI (Reservoir Drought Index) - Índice de sequía de embalse.....	28
2.1.5.10 PDSI (Palmer Drought Severity Index) - Índice de severidad de sequía de Palmer. ....	28
2.1.5.11 SMI (Soil Moisture Index) - Índice de humedad del suelo.....	28
2.1.5.12 ESI (Evaporative Stress Index) - Índice dFAPAR Anomaly (Anomalía de la fracción de radiación activa absorbida fotosintéticamente) y estrés evaporativo .....	28

2.1.5.13	FAPAR Anomaly (Anomalía de la fracción de radiación activa absorbida fotosintéticamente).....	29
2.1.5.14	VHI (Vegetation Health Index) - Índice de salud de la vegetación ..	29
2.1.5.15	Índice Normalizado de Precipitación .....	29
2.1.6	2.1.6. Rejilla de Precipitación y Temperatura .....	30
2.1.7	Archivos netCDF .....	32
2.1.8	Python .....	33
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>34</b>
3.1	MARCO CONTEXTUAL .....	34
3.1.1	Ubicación Geográfica .....	34
3.1.2	División política administrativa.....	35
3.1.3	Principales Características Bio-físicas.....	36
3.1.3.1	Fisiografía .....	38
3.1.3.2	Hidrografía del Departamento de Chuquisaca .....	50
3.1.3.3	Climatología del Departamento de Chuquisaca.....	50
3.1.3.4	Clasificación Climática .....	52
3.1.3.5	Precipitación Pluvial.....	59
3.1.3.6	Situación Infraestructura para Riego en el Contexto Departamental .. .....	61
3.1.3.7	Condiciones socioeconómicas.....	63
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>65</b>
4.1	. RESULTADOS Y DISCUSIONES DE LA INVESTIGACION .....	65
4.1.1	Recopilación de información y Selección de estaciones .....	65
4.1.2	Pruebas para verificar la calidad de la información .....	68
4.1.3	Análisis de homogeneidad y rellenado de datos faltantes y consistencia a las series de precipitación.....	68

4.1.4	Análisis de la Rejilla GMET para su uso.....	77
4.1.5	Calibración de datos GMET.....	84
4.1.6	Generación de la Rejilla de Precipitación para Chuquisaca .....	86
4.1.7	Análisis y caracterización de la sequía a corto, mediano y largo plazo .. .....	87
4.1.8	Eventos de Sequía 2009 y Valor SPI para su Caracterización de Sequía .....	88
4.1.9	Eventos de Sequía 2010 y Valor SPI para su Caracterización de Sequía .....	89
4.1.10	Eventos de Sequía 2012 y Valor SPI para su Caracterización de Sequía .....	90
4.1.11	Eventos de Sequía 2013 y Valor SPI para su Caracterización de Sequía .....	90
4.1.12	Desarrollo del software aplicativo de apoyo SPI.....	91
4.1.13	Análisis estadístico VIDECI vs. SPI.....	93
<b>CAPÍTULO V .....</b>		<b>97</b>
5.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
5.1.1	Conclusiones .....	97
5.1.2	Recomendaciones.....	98
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>99</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>104</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación del SPI .....	11
Tabla 2: Creación de Provincias y Municipios de Chuquisaca. DS – 23/01/1826 .....	35
Tabla 3: Clasificación Climática .....	52
Tabla 4: Superficie Bajo Riego y a Secano en el Departamento .....	62
Tabla 5: Estaciones del Balance Hídrico y no Usadas en el BH.....	65
Tabla 6: Estaciones Seleccionadas .....	67
Tabla 7: Formato Ingreso de Datos de Estaciones, CLIMATOL .....	69
Tabla 8: Formato Ingreso de Datos de Precipitación, CLIMATOL .....	69
Tabla 9: Anomalías en la precipitación .....	76
Tabla 10: Correlaciones y Sesgos de Estaciones vs GMET .....	79
Tabla 11: Rango error BIAS.....	83
Tabla 12: Clasificación del SPI .....	88
Tabla 13: Eventos de Sequia 2009 y su índice SPI .....	89
Tabla 14: Eventos de Sequia 2010 y su índice SPI .....	89
Tabla 15: Eventos de Sequia 2012 y su índice SPI .....	90
Tabla 16: Eventos de Sequia 2013 y su índice SPI .....	90
Tabla 17: Análisis de Varianza (ANOVA).....	94
Tabla 18: Análisis TUKEY .....	96

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Variabilidad Natural del Clima .....	25
Ilustración 2. Estaciones Tierra Usadas para calibrar GMET .....	31
Ilustración 3: Ubicación Estudio .....	34
Ilustración 4: Estaciones seleccionadas .....	66
Ilustración 5: Datos de precipitación habilitados por estación.....	70
Ilustración 6: Información disponible de precipitación en las estaciones .....	71
Ilustración 7: Diagrama de cajas.....	71
Ilustración 8: Histograma de todos los datos de precipitación .....	72
Ilustración 9: Correlograma de las diferentes series de precipitaciones de estaciones.....	73
Ilustración 10: Histograma de máximos SNHT .....	74
Ilustración 11: Anomalías de precipitación.....	74
Ilustración 12: Histograma de anomalías normalizada .....	75
Ilustración 13: Histograma corregido .....	77
Ilustración 14: Estaciones Meteorológicas Seleccionadas SENAMHI .....	78
Ilustración 15: Correlación Datos Tierra vs GMET SESGO =-19.....	84
Ilustración 16: Datos observados de anomalías .....	85
Ilustración 17: Histograma de anomalías normalizadas.....	85
Ilustración 18: Eventos de Sequia VIDECI.....	87
Ilustración 19: Pantalla Principal Aplicativo SPI.....	92
Ilustración 20: Resultado del Aplicativo SPI.....	92
Ilustración 21: Valores medios por Municipio.....	93
Ilustración 22: Caja de Bigotes Mostrando Medias de cada Escala SPI.....	94
Ilustración 23: Tendencias VIDECI vs SPI(1,3,6 y 9).....	95

## **CAPÍTULO I**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

“La sequía es uno de los fenómenos climáticos más complejos que afectan a la sociedad y el medio ambiente” (Wilhite, 1993).

Esta complejidad se debe a la dificultad de cuantificar la severidad de una sequía, pues habitualmente identificamos una sequía por sus efectos sobre diferentes sistemas (agricultura, recursos hídricos, ecología, incendios forestales, pérdidas económicas, etc.), pero no existe una variable física determinada que nos permita medir la severidad de la sequía. Por ello, las sequías son difíciles de identificar en el tiempo y el espacio, siendo muy complejo determinar el momento en que una sequía comienza y termina, además de cuantificar su duración, magnitud y extensión superficial (Burton et al., 1978; Wilhite, 2000).

Estas características explican el enorme esfuerzo científico dedicado a desarrollar herramientas que proporcionen una evaluación objetiva y cuantitativa de la gravedad de la sequía. La sequía se cuantifica habitualmente mediante los llamados índices de sequía, que son indicadores indirectos basados en información climática. Diferentes estudios han mostrado la relación existente entre la variabilidad de los índices de sequía y diferentes variables ambientales e hidrológicas (Pasho et al., 2011).

Los resultados obtenidos en estudios de hidrología dependen en gran medida de los datos con los que se realice, es por esto, que seleccionar de buena manera las estaciones que se aplicarán para algún tipo de estudio es de suma importancia ya que si estas cuentan con registros buenos los resultados obtenidos serán mejores. Previo a realizar cualquier estudio, se debe realizar un análisis de la información brindada por las estaciones para verificar la calidad de sus registros, es decir, identificar, evaluar y eliminar los posibles errores sistemáticos que hubieron podido ocurrir sea por causas naturales u ocasionadas por la intervención del hombre (Portal & Esther, 2009).

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

En numerosos foros sobre la sequía, nacionales e internacionales, se aboga en sus conclusiones por "cambiar la percepción" de las administraciones y de la sociedad sobre la sequía para anticiparse, adaptarse y actuar antes de que ocurra en vez de limitarse a luchar contra ella una vez declarada. (GARCÍA MARÍN, 2008).

El avance en las investigaciones referidas al estudio del fenómeno de sequía: causas, consecuencias, estrategias de evaluación y mitigación, entre otros temas, resulta insuficiente para encontrar los mecanismos adecuados para prevenir, planear y mitigar los efectos de ésta. Dada su variabilidad en el espacio y tiempo con un impacto diferencial sobre el tipo de ecosistemas (Crespo Pichardo, 1979).

Instituciones internacionales, nacionales y regionales, universidades e instituciones de investigación abordan el estudio de este fenómeno. El avance es desigual entre países, regiones y en muchos lugares incipiente o prácticamente nulo como es en el caso de países subdesarrollados. Por lo que planear estrategias de evaluación de la sequía no es fácil. Requiere que las políticas, quienes las hacen y la población en general entiendan este fenómeno natural (Crespo Pichardo, 1979).

Además, no se cuenta con una economía suficiente, para poder financiar e investigar los efectos de la sequía; no se tiene acciones en el país para poder mejorar la resiliencia a estos fenómenos debido a un estado pobre y sin políticas que ataquen los problemas de sequía. En varios países incluyendo al nuestro no se tiene aún un plan de manejo y conservación de recursos naturales, incluyendo el agua.

Con base en lo anterior, el presente trabajo se pretende desarrollar en la línea de investigación de evaluación de una metodología para evaluar y analizará sequía en el departamento de Chuquisaca.

## **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.3.1 Situación Problemática**

Según la Organización Meteorológica Mundial, la sequía es un peligro natural insidioso resultante de unos niveles de precipitaciones por debajo de lo que se considera normal. Cuando este fenómeno se prolonga durante una estación o por un período de tiempo mayor, la precipitación es insuficiente para responder a las demandas de la sociedad y del ambiente (OMM, 2012).

El análisis Meteorológico Mundial, ha concluido que el cambio climático es uno de los impulsores de la reducción de las precipitaciones. Demostrado que el cambio climático ha producido un aumento de las temperaturas en Sud América, lo que probablemente ha reducido la disponibilidad de agua y empeorado los impactos de la sequía en la última década (Naciones Unidas, 2023).

Según el Fondo de Población de las Naciones Unidas, en Bolivia, durante el periodo 2002 a 2012 se produjeron 5.770 eventos adversos, un promedio de 433 eventos por año (alrededor de 1.19 eventos por día), y en ese periodo también se vivieron tres eventos de El Niño y tres eventos de La Niña. La frecuencia y el impacto de estos eventos tienen fuertes repercusiones sobre el desarrollo económico y social, al destruir o dañar los medios de vida de la población que habita las regiones afectadas por desastres, lo que evidencia la necesidad de analizar la información existente para configurar los perfiles de vulnerabilidad regional ante las diferentes amenazas en Bolivia, así como la vulnerabilidad multiamenaza. En este sentido, los resultados de análisis de este trabajo contribuirán a definir con más precisión las políticas y estrategias de desarrollo, debido a que permitirán, por una parte enfocar las políticas orientadas a la reducción sostenida de la vulnerabilidad y por otra, evaluar el resultado de estas políticas, contribuyendo así a generar metodologías y guías de planes de emergencia, asignación de recursos y estrategias de transferencia del riesgo. (UNFPA, 2015).

Por un lado, la escasa cantidad de agua almacenadas, así como los elevados y normales índices de evaporación y transpiración, tendrán un efecto negativo reduciendo la productividad agrícola, pecuaria, forestal y poniendo en riesgo la

salud de los pobladores; causadas por incrementos de temperatura, contaminación atmosférica, deforestaciones y sobre explotación de los recursos naturales (Giner & Fierro, 2011).

Las escasas lluvias registradas en el mes de noviembre alargaron la duración del periodo seco en Bolivia, lo que retrasó de forma significativa el inicio del calendario agrícola para la siembra de verano. Si diciembre presenta lluvias tardías o irregulares, los riesgos agrícolas y alimentarios podrían crecer rápidamente, en especial en el sector de la agricultura mecanizada y la pequeña producción campesina (Tierra, 2022).

Desde el año 1980, Bolivia ha atravesado distintos cambios en el clima. Según los análisis realizados por FAN, entre 1980 y 2020 la temperatura media anual ha subido 0.5 grados centígrados en algunas regiones del país y en otras por encima de 1 grado centígrado. El régimen de lluvias también está cambiando. Con información de Senamhi, Quintanilla destaca que desde 1980 el patrón de lluvias ha disminuido en 11 % en muchas regiones del país y, en los meses más secos —agosto, septiembre y octubre— la lluvia se ha reducido hasta 36 % (LaRegión, 2023).

Según el Centro de Investigación y Promoción del Campesinado, en la gestión 2022, la escasez de lluvia afectó a más del 65% del territorio nacional, en regiones el Chaco Chuquisaqueño, sufre la falta de agua de manera habitual. En el Chaco las sequías son un gran problema para la agricultura y ganadería, también para el medio ambiente y para la salud de sus habitantes. La falta de lluvias provoca pérdidas de cultivos, animales y pone en riesgo los acuíferos y áreas de recarga hídrica (CICAP, 2023).

Actualmente debido a los cambios climáticos, desde hace varios años, el sector agropecuario es el que más sufre por la sequía, en el chaco de Chuquisaca el debate en torno a la escasez y acceso al agua, siempre ha estado presente en la agenda política local regional y nacional. Las particularidades del clima en el Chaco de Chuquisaca, unidas a la deforestación y actividades extractivas están provocando déficit hídrico críticos, durante la última década (2013 – 2022), las precipitaciones han disminuido un 16% comparando los últimos 40 años. En el

Chaco Chuquisaqueño el pequeño productor y las familias guaraníes, cultivan principalmente maíz, kumanda, zapallo, maní y algunas hortalizas, esta actividad agrícola solo se desarrolla en la época de lluvias, donde la producción es a secano o temporal, aprovechando la disponibilidad de humedad en el suelo luego de las lluvias, esta actividad que iniciaba normalmente en los meses de noviembre o diciembre, cabe resaltar que desde hace aproximadamente 10 años el calendario agrícola se ha modificado, hoy en día este calendario inicia los primeros meses del año; en los últimos 3 años la actividad agrícola inicia a fines de febrero ya que las lluvias más constantes sucedieron en este mes, pero estos cultivos corren el peligro de no completar su ciclo debido a las heladas de mayo (CICAP, 2023).

En el caso de la sequía, en Chuquisaca en general existen variabilidad de amenazas en los municipios, existiendo algunos municipios con mejor posibilidad de adaptación por sus mejores condiciones socio-económicas y otros con bajas posibilidades de resiliencia y más todavía en los municipios de Chuquisaca, donde las condiciones de vida son precarias e insuficientes y con la afectación de cualquier desastre la pobreza incrementa a niveles inhumanos de supervivencia (UNFPA, 2015).

Debido a que existen pocas estaciones meteorológicas activas, las principales mediciones están concentradas en torno a la ciudad de Sucre. Estos reportes muestran que en lo que va del año, las lluvias alcanzaron un acumulado de 332 mm, siendo la cifra más baja del periodo 2011-2022. Sucre sufre bajas precipitaciones pluviales desde hace tres años y con tendencia decreciente, comparadas con el promedio de 570 mm de los últimos doce años, las lluvias de diciembre están lejos de lograr una mejora significativa de la aguda situación de esta región chuquisaqueña (Tierra, 2022).

En promedio, las lluvias de diciembre alcanzan 106 mm, lo que, si ocurre, sería insuficiente para acercarse a los promedios históricos (Tierra, 2022).

### **1.3.2 Formulación del problema**

¿De qué manera la caracterización de la sequía en base al análisis y estimación de un índice de sequía (1,3,6 y 9 meses) en el departamento de Chuquisaca

podría mejorar el monitoreo de esta amenaza en la gestión de riesgos del departamento?

## **1.4 DELIMITACIÓN**

### **1.4.1 Objeto de estudio**

Monitoreo y caracterización de la sequía.

### **1.4.2 Campo de acción**

Monitoreo y caracterización de la sequía en periodo de corto (1,3 mes), Mediano ( 6 meses) y largo plazo (9 meses) en el Departamento de Chuquisaca.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo General**

Caracterizar la sequía en el Departamento de Chuquisaca con el apoyo y desarrollo de un software basado en información geoespacial.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Conseguir información homogenizada y no homogenizada de precipitación regionalizada de Chuquisaca.
- ✓ Construir un análisis estadístico de calidad de datos de precipitación para una mejor representación de la sequía.
- ✓ Administrar los datos de precipitación en formato liviano y de fácil manejo matricial.
- ✓ Desarrollar un software aplicativo de apoyo, en base a Python 3.x y archivos NetCDF para el cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado de Mckee (SPI) (B. McKee, J. Doesken, & Kleist, 1993).
- ✓ Analizar y caracterizar la sequía a corto (1 a 3 meses), mediano (6 meses) y largo(9 meses) plazo, comparando con la base a datos de ocurrencia de eventos de sequía del Viceministerio de Defensa Civil (VIDECI) para el departamento de Chuquisaca y reportados en una base de datos estandarizada.

## 1.6 HIPÓTESIS

¿Los datos de la Rejilla GMET(Centro Nacional de Investigación Atmosférica, 2017) tienen una correlación lineal alta y un sesgo bajo para poder utilizarlo en el análisis de sequía en el Departamento de Chuquisaca?

¿Los SPI a escalas 1, 3, 6 y 9 NO representan la distribución espacial de la sequía en el departamento de Chuquisaca de acuerdo con información VIDECI?.

**Variable Independiente.** Registros de ocurrencia y severidad de sequias en el departamento de Chuquisaca [Datos VIDECI]

**Variable Dependiente.** Índice de sequía SPI (1 mes, 3 meses, 6 meses y 9 meses)

### Dimensión

SPI (1 mes, 3 meses, 6 meses y 9 meses)

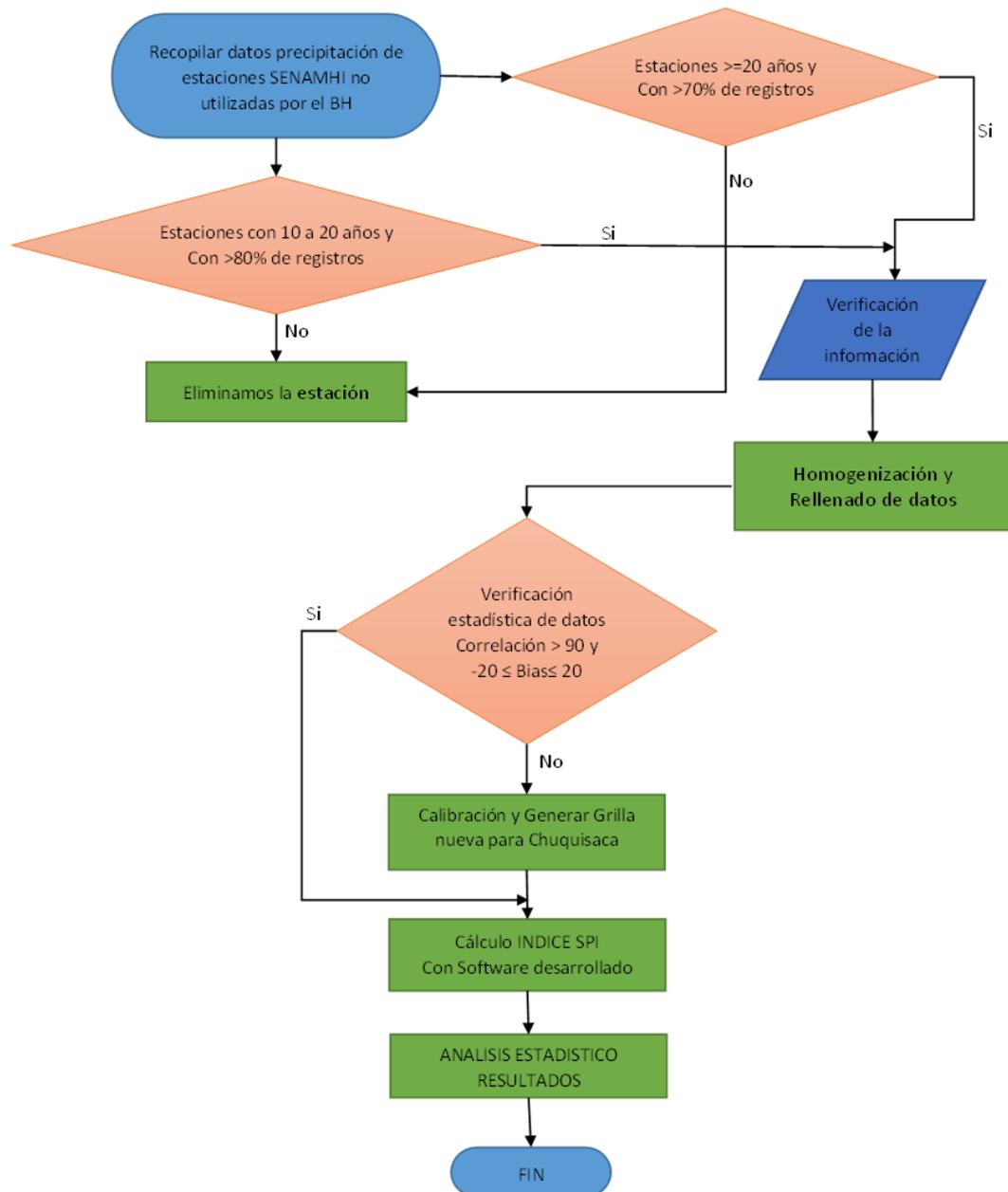
#### 1.6.1 Análisis de indicadores

SPI	Categoría
2.0 y más	Extremadamente Húmedo
1,5 a 1,99	Muy Húmedo
1,0 a 1,49	Moderadamente Húmedo
-0.5 a 0.99	Normal
-0,51 a -0,99	Condición Anormal Seca
-1,0 a -1,49	Moderadamente Seco
-1.5 a -1,99	Severamente Seco
-2 y menos	Extremadamente Seco

*Fuente: Adaptado del Global Drought Monitor (2002)*

## 1.7 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo analítico conteniendo una variable independiente y variable dependiente. En la Siguiete Figura se presenta un resumen de la metodología del trabajo.



El trabajo de investigación pretende usar datos procesados y corregidos con estaciones meteorológicas terrestres y usadas actualmente por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua en los Balances Hídricos y Planes de Aprovechamiento Hídricos en Bolivia (GMET), pero previa comparación con estaciones

meteorológicas de tierra que no fueron tomadas en cuenta en el GMET y si se tendría baja correlación y un sesgo alto se calibrara usando esas otras estaciones.

Para poder hacer las comparaciones, se trabajó con estaciones que no utilizó el GMET y que podrían hacer que esta Rejilla no sea representativa en algunas regiones de Chuquisaca.

### **1.7.1 Obtención de información climática y Selección de estaciones Meteorológicas**

Se obtuvo información climática del SENAMHI, de las estaciones que no se tomaron en cuenta en la generación de la Rejilla de GMET, en base a estas se hizo una selección de acuerdo a la ubicación y al número de datos registrados.

Posteriormente se verificó la calidad de la información de precipitaciones conseguidas. Para trabajar con este problema se han especificado desde hace varios años metodologías de homogeneización para eliminar y reducir en lo posible estas variaciones indeseadas.

Inicialmente consistían en comparar una serie problema con otra supuestamente homogénea, pero como esta suposición es muy arriesgada, se pasó a construir series de referencia a partir del promedio de otras seleccionadas por su proximidad o elevada correlación, diluyendo así sus posibles inhomogeneidades (Gujarro, 2023).

Una vez ya homogenizado los datos de precipitación se comparó con los Datos de GMET mediante una correlación y Sesgo para aceptar o rechazar el uso de los datos de precipitación del GMET.

En caso de que no se acepten los datos de precipitación de GMET con el Análisis Estadístico de Correlaciones y Sesgo, se debería Generar una Rejilla propia de Precipitaciones tomando en cuenta la mayoría de las estaciones. La Generación de la Rejilla de precipitación se debe realizó mediante la interpolación que incorpora una Regresión Lineal Múltiple.

### 1.7.2 Datos de Precipitación GMET

Los datos o Rejillas con las que se trabajó, son las precipitaciones del PRODUCTO GMET (*Gridded Meteorological Ensemble Tool*) desarrollado por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) para precipitación y temperaturas, que es el producto de interpolación de precipitación debido a los pocos datos de observaciones presentes, representatividad de las observaciones y errores de medición. Aceptando esta incertidumbre, el método produce un ensamble de precipitación en base a las observaciones existentes.

Después de la depuración y análisis de las series de las estaciones individuales de precipitación fueron consideradas para la interpolación. Los datos de estas estaciones fueron tratados y rellenados. GMET fue corrido para el territorio de Bolivia usando dichas estaciones para obtener un producto final con una resolución espacial de  $0.05^\circ$  (celda) a escala de tiempo diario para el periodo hidrológico 1980-2016 lo cual implica que se inicia en enero de 1980 y termina en agosto 2016. El método siguió la guía de Clark and Slater (2006).

La Rejilla del GMET se encuentra en un formato netCDF, que contiene información multidimensional (6 dimensiones), la primera contiene información del tiempo, en la segunda Temperatura, tercer rango, cuarta altitud, quinta latitud y en la sexta longitud. En las variables tenemos la precipitación, temperatura media, el rango de temperatura; de la cual nos interesa la variable precipitación y en base a la cual se trabajará.

### 1.7.3 Cálculo del índice de sequía SPI (Índice Estandarizado de Precipitación)

Es una de las metodologías más usada y de aplicación extendida en todo el mundo, mide el déficit de precipitación para **múltiples escalas temporales**, es importante contar con 30 años de datos de precipitación para que los resultados puedan ser confiables (B. McKee, J. Doesken, & Kleist, 1993).

El SPI, se basa en estandarizar la precipitación, es decir, la diferencia entre la media, menos una precipitación para un período específico de tiempo, sobre la desviación estándar, donde la media y la desviación estándar son obtenidas de un registro de precipitación, y se define como, el número de desviaciones

estándar que la precipitación acumulada se desvía de las condiciones promedio (B. McKee, J. Doesken, & Kleist, 1993).

Para categorizar los niveles de sequía se utilizará los siguientes rangos:

**Tabla 1: Clasificación del SPI**

SPI	Categoría
2.0 y más	Extremadamente Húmedo
1,5 a 1,99	Muy Húmedo
1,0 a 1,49	Moderadamente Húmedo
-0.5 a 0.99	Normal
-0,51 a -0,99	Condición Anormal Seca
-1,0 a -1,49	Moderadamente Seco
-1.5 a -1,99	Severamente Seco
-2 y menos	Extremadamente Seco

*Fuente: (B. McKee, J. Doesken, & Kleist, 1993).*

Como se dijo, para su cálculo se utilizó los datos de una serie de precipitación convirtiéndolas a probabilidades en 1, 3, 6 y 9 meses, ajustando la función de distribución a una función adecuada.

Posteriormente se obtiene la precipitación mensual ( $x_{mean}$ ) promedio y se agrupa en escala de tiempo, en este caso 1, 3, 6 y 9 meses de acuerdo al mes, calculando  $A$ ,  $\alpha'$  y  $\beta'$ , de acuerdo a las fórmulas 1, 2 y 3 (Morales Saldivar, 2005).

$$(1) \quad A = \ln(x) - [\sum \ln(x)]/n$$

$$(2) \quad \alpha' = x_{mean}/\beta$$

$$(3) \quad \beta' = 1/(4A)[1 + (1 + \frac{4A}{3})^{1/2}]$$

Donde:

$x$  = es la precipitación mensual

$n$  = número de años de información

$x_{\text{mean}}$  = Precipitación Media Mensual

La función de distribución de probabilidad de tres parámetros es la mejor que ajusta para el cálculo del SPI, por tanto, en nuestro análisis utilizaremos la función Gamma de dos parámetros, obteniendo los parámetros por máxima verosimilitud, ya que es la función que más se utiliza a nivel mundial para estimar el SPI (Morales Saldivar, 2005).

Gamma está definida por:

$$g(x) = \frac{x^{-1}e^{-x/a}}{\tau(\beta)} \quad (4)$$

Para  $x > 0$

Donde  $\alpha$  es el parámetro de escala ( $\alpha > 0$ ) y  $\beta$  es el parámetro de forma ( $\beta > 0$ ),  $x$  es la precipitación acumulada ( $x > 0$ ). Y

$$\tau(\beta) = \int_0^{\infty} y^{-1}e^{-y} dy \quad (5)$$

Donde  $\tau(\beta)$  es la función Gamma completa.

Los parámetros se estiman de acuerdo escala, la estimación de los parámetros por máxima verosimilitud es por:

Luego procedemos a obtener con los parámetros estimados, la distribución acumulada de un evento observado de precipitación para un mes y para la escala trabajada para cada pixel (Morales Saldivar, 2005).

La probabilidad acumulada se obtiene con:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (6)$$

Donde  $q$  es la probabilidad asociada al número de ceros y  $G(x)$  es la función Gamma incompleta,  $q = m/n$ , si  $m$  es el número de ceros en la serie y  $n$  es el total de valores registrados.

Ya teniendo las probabilidades acumuladas, se procede a transformar mediante la aproximación (3.6) a variables normales estandarizadas, la cual será el SPI (Morales Saldivar, 2005).

Para una probabilidad acumulada  $0 < H(x) \leq 0.5$

$$SPI \approx v - (b_0 + b_1v + b_2v^2)/(1 + b_3v + b_4v^2 + b_5v^3) \quad (7)$$

Donde:

b0=2.515517	b3=2.515517
b1=0.802853	b4=0.189269
b2=0.010328	b5=0.001308

$$v = \left[ \ln \left\{ \frac{1}{H^2(x)} \right\} \right]^{1/2} \quad (8)$$

Para una probabilidad acumulada de  $0.5 < H(x) \leq 1$  se cambia  $H(x)$  por  $[1-H(x)]$  en (8) y se le cambia el signo al valor del SPI obtenido con la ecuación (7) (L.Giddings, 2005).

#### **1.7.4 Información de Eventos de Sequia del Viceministerio de Defensa Civil (VIDECI)**

Recopilando y revisando información de una serie de registros históricos sobre eventos de sequía en los periodos 2002 a 2020. La base de registros histórica de sequias se ha obtenido de:

- ✓ Base de Registros sobre desastres Defensa Civil 2002-2020.

En base a esta fuente, se construye una base de registros históricos con información a nivel municipal de Chuquisaca, debido a la existencia de dichos datos donde se clasifico el nivel de sequía presentado en cada municipio, esta información será base para la comparación de los mapas generados de Sequia por el SPI generado. La base de datos de información se presenta en el Anexo 1.

### 1.7.5 Desarrollo Del Script SPI

El desarrollo del Script SPI, será realizada en función a la metodología del cálculo ya descrita y con el lenguaje de programación PYTHON 3.X por tener librerías que ayudarían el desarrollo de la aplicación.

Estas librerías son tkinter para desarrollar fácilmente una interface amigable para obtener las variables de entrada y salida, la librería math para cálculo de logaritmos y otros, calendar para el fácil manejo de fechas, netCDF4 para el manejo de archivos netCDF, xr.Array y numpy para el fácil manejo y manipuleo de matrices multidimensionales (el código fuente se presente en anexos).

El manejo del software aplicativo, es muy sencillo e intuitivo y se basa en dos partes, los **datos de entrada** y los **datos de salida**.

Como se dijo anteriormente, se tiene una interface para facilitar el manejo del Software aplicativo, siendo la interface siguiente:

**Datos de Entrada.** - Se solicita incluir el archivo netCDF, donde está la información de precipitaciones, se debe también ingresar el mes que se calculara el SPI(1 al 9), seleccionar la escala temporal (1, 3, 6 o 9 meses).

**Datos de Salida.** -

Los datos de salida, es la dirección donde se guarda el archivo geoTiff con los resultados del SPI de interés.

### 1.7.6 Límites y alcance de la investigación

El trabajo abarca el departamento de Chuquisaca, donde se realizó el análisis y caracterización de la sequía comparando con información de afectaciones de eventos de sequía del Viceministerio de Defensa Civil (VIDECI), en base al SPI generado por mes y año del Software desarrollado.

El Software puede generar el SPI para escalas de 1, 3, 6 y 9 meses que nos da información de la sequía meteorológica y agrícola, el software trabaja con archivos netCDF para Generar también geoinformación en formato geoTiff para cualquier lugar del mundo, en base a coordenadas de dos puntos que forma un polígono en coordenadas geográficas.

El trabajo de acuerdo a recomendaciones del método SPI trabaja con información de 37 años, para obtener resultados válidos.

### **1.7.7 Métodos e instrumentos para la indagación empírica**

#### **Análisis Estadístico a aplicar**

Para la utilización de la rejilla GMET:

1. Controlar la calidad de las series de precipitación y separar aquellas anomalías que superen un umbral prefijado.
2. Comprobar su homogeneidad mediante la aplicación del Standard Normal Homogeneity Test (SNHT; Alexandersson, 1986).
3. Correlación GMET vs SENAMHI debe ser alta
4. Sesgo o error GMET vs SENAMHI debe estar entre -20 a 20

Para caracterizar la sequía:

1. Análisis de Varianza
2. Tendencias
3. Prueba de Tukey

## **CAPÍTULO II**

### **2.1 MARCO TEÓRICO**

En las últimas décadas este tópico ha cobrado una importancia cada vez más relevante en el ámbito técnico-científico, debido a los estragos que ha causado el fenómeno en diferentes partes del mundo. Por ello, se ha generado una impresionante producción científica sobre el tema, aunque la mayor parte de la literatura se encuentra escrita en idioma inglés.

En este contexto, se presentan a continuación los aspectos teóricos y conceptuales más importantes relacionados con el fenómeno de la sequía: definiciones, tipos, causas y consecuencias, así como una descripción de los métodos de análisis y evaluación de las sequías a usarse.

#### **2.1.1 La sequía y sus causas.**

Entre las causas más relevantes, para que se produzca la sequía Magaña et al (1997), Estrada (2001) y Contreras (2003), mencionan las siguientes: “Las manchas solares que alteran la cantidad de energía que llega a la superficie de la Tierra; las alteraciones en la circulación de los vientos generados por modificación en el albedo superficial o por cambios en la temperatura superficial de los océanos”.

Se ha dado particular énfasis al denominado fenómeno de “El niño”, caracterizado por debilitamiento a gran escala de los vientos Alisios y por el calentamiento de las capas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial en sus porciones Este (frente a las costas de América) y central. Los eventos “El Niño” ocurren irregularmente a intervalos de 2 a 7 años, aunque en promedio puede presentarse uno cada 3 ó 4 años. Duran entre 12 y 18 meses y son acompañados por cambios en el Índice de Oscilación del Sur (ENOS); este índice refleja una variación interanual de la presión atmosférica al nivel del mar en el Océano Pacífico entre su lado oriental y occidental (CICESE, 1999).

Durante el verano de “El Niño”, las lluvias en la mayor parte de México disminuyen, por lo que la sequía comienza aparecer. En este periodo, la zona intertropical de convergencia, donde existe gran cantidad de nubes profundas y

lluvia, tiende a permanecer más cercana del ecuador, por lo que la fuente de humedad para las lluvias en la costa oeste de México, durante los meses de junio, julio y agosto, permanece alejada y con ello las lluvias de verano son bajas. Por el contrario, en años con presencia de “La Niña”, las lluvias parecen estar por encima de lo normal en la mayor parte de México, pero especialmente en la costa del Pacífico (Magaña et al., 1997). Jáuregui (1979), explica la presencia de sequías en el mundo y en México particularmente, a partir de la influencia del movimiento de los anticiclones tanto del pacífico como del atlántico.

Se sabe ahora la correspondencia entre las lluvias deficitarias de finales del siglo XIX y principios del XX con posiciones australes extremas de los anticiclones; a medida que éstos se desplazan hacia el Norte, las precipitaciones tienden a aumentar y viceversa. El anticiclón de los Azores alcanzó su posición más al norte en los años 1935-45 y a partir de ahí inicio su movimiento hacia el sureste, tal movimiento fue relacionado con la sequía al Sur del Sahara; para México los movimientos de los anticiclones Bermuda-Azores y Azores son determinantes para el comportamiento de la precipitación, ya que se ubica en medio de tales; el movimiento de las azores hacia el Sur ha significado menores posibilidades de tormentas, debido a la escasa formación de ciclones en el atlántico, en tanto que el movimiento hacia el Norte propicia el corrimiento de la Zona Intertropical de Convergencia, dando como resultado mayor actividad ciclónica en Centroamérica y las costas del Pacífico. (Pichardo, 1989).

### **2.1.2 La sequía y sus efectos.**

“Si bien la sequía tiene un desarrollo no tan rápido y dramático que otros desastres naturales como los huracanes, sus efectos suelen ser de mayor amplitud y más devastadores. Sus efectos directos e indirectos están fuertemente relacionados con la producción de alimentos, la reserva de agua en el suelo, la manutención de ganado, la vida silvestre y en general con la posibilidad de cualquier forma de vida en un lugar determinado” (National Drought Policy Commission, 2000).

El National Drought Mitigation Center, de los Estados Unidos (1996), considera que los efectos de la sequía pueden ser analizados desde diferentes perspectivas, a saber:

En lo económico, la sequía se relaciona con pérdidas en la producción de alimentos, pérdidas en la producción ganadera, en la producción de maderables y no maderables, repercute en el incremento de costos de energía, pérdidas en actividades industriales y la consecuente alza de precios en el mercado, incremento de los costos de suministro de agua, entre otros.

En lo ambiental, se presentan daños, frecuentemente irreversible en la flora y fauna silvestre, se incrementa la vulnerabilidad de los ecosistemas, se intensifican los procesos de erosión hídrica y eólica, se reduce la calidad del agua, se promueve la contaminación del aire, se afecta el ciclo hidrológico en general, entre otros.

En lo social, hay escasez de alimentos, malnutrición, disminución del nivel de vida, conflictos sociales por el uso del agua o de mejores tierras, incremento de la pobreza, migración, hacinamiento en las ciudades, abandono de tierras agrícolas. (Pichardo, 1989)

### **2.1.3 Marco Conceptual sobre la Sequía.**

Definir la sequía no es fácil, numerosos estudios científicos han sido desarrollados tratando de definir, pero la diversidad de tipologías climáticas existentes sobre nuestro planeta hace casi imposible utilizar el mismo umbral de déficit pluviométrico en dos lugares diferentes (Valiente, 2001).

La definición de sequía puede parecer sencilla, y si consultamos un buen número de diccionarios o enciclopedias, encontraremos que en casi todos ellos se nos dice algo parecido a “deficiencia de precipitaciones durante un período de tiempo relativamente prolongado”, pero realizar la cuantificación de la deficiencia y el tiempo expresados en la definición varía notablemente según el espacio geográfico sobre el que deba aplicarse. A este tipo de definiciones, donde no se establecen umbrales de referencia y no tienen en cuenta la realidad climática del área afectada por el déficit pluviométrico, se les denomina conceptuales y no

operacionales donde se precisa el momento de inicio y de finalización (Valiente, 2001).

Hasta el año de 1985 se habían identificado más de 150 definiciones de sequía publicadas en la literatura (Wilhite y Glantz, 1985), y actualmente existen muchas más. Dichas definiciones son un reflejo de las diferencias existente entre las regiones de origen, las necesidades que motivaron su elaboración y los enfoques disciplinarios adoptados en cada caso.

Sin Embargo, en los últimos años ha existido un consenso tácito generalizado entre los diferentes autores (Wilhite y Glantz, 1985; Bootsma et al., 1996; Barakat y Handoufe, 1998; Wilhite, 2011; etc), quienes aceptan que las definiciones de sequía pueden agruparse en cuatro tipos básicos con base en características de los impactos que trae como consecuencia el fenómeno.

A continuación, se describe cada uno de los tipos de sequía.

#### **A. Sequia Meteorológica**

Palmer (1965) define sequía meteorológica como el “intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar cae consistentemente por debajo de lo climatológicamente esperado o del aporte de humedad climatológicamente apropiado”, mientras que Russell et al. (1970) son más concisos: «Falta prolongada de precipitación, inferior a la media».

Ausencia prolongada, un déficit marcado o una débil distribución de precipitaciones con relación a la considerada como normal, y puede producir serios desbalances hidrológicos (NDMC, 2002).

De acuerdo a (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2015), se dice “que se está en sequía meteorológica cuando se produce una escasez continuada de las precipitaciones. Es la sequía que da origen a los restantes tipos de sequía y normalmente suele afectar a zonas de gran extensión. El origen de la escasez de precipitaciones está relacionado con el comportamiento global del sistema océano-atmósfera, donde influyen tanto factores naturales como factores

antrópicos, como la deforestación o el incremento de los gases de efecto invernadero”.

La definición de sequía meteorológica está vinculada a una región específica, ya que las condiciones atmosféricas que producen déficit de precipitación son muy variables de una región a otra. Además, este tipo de sequía también puede implicar temperaturas más altas, vientos de fuerte intensidad, humedad relativa baja, incremento de la evapotranspiración, menor cobertura de nubes y mayor insolación; todo ello puede traducirse finalmente en reducciones en las tasas de infiltración, menor escorrentía, reducción en la percolación profunda y menor recarga de las aguas subterráneas. En muchos casos el indicador primario de disponibilidad de agua es la precipitación (AClimate, 2015).

## **B. Sequia Agrícola**

Según (Valiente, 2001), por ser el primer sector económico que resulta afectado por la escasez de precipitaciones, la agricultura adquiere una especial relevancia en relación con la sequía.

Así, se produce una sequía agrícola cuando no hay suficiente humedad en el suelo para permitir el desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento (Valiente, 2001).

Dado que la cantidad de agua es diferente para cada cultivo, e incluso puede variar a lo largo del crecimiento de una misma planta, no es posible establecer umbrales de sequía agrícola válidos ni tan siquiera para una única área geográfica. Aun así, Kulik (1962) se arriesga a ello, definiendo sequía agrícola como el «período durante el cual sólo hay 19 mm de agua disponible en los primeros 20 cm de suelo».

Este tipo de sequía, por depender no sólo de las condiciones meteorológicas, sino también de las características biológicas del cultivo y las propiedades del suelo, no es equivalente a la sequía meteorológica. Si los niveles de humedad en el subsuelo son suficientes para proporcionar agua a un determinado tipo de cultivo durante el período que dure la sequía meteorológica, no llegará a producirse una sequía agrícola (BATRES & LEMUS, 2017).

De acuerdo a (FAO, 2010) puede definirse como déficit de humedad en la zona radicular para satisfacer las necesidades de un cultivo en un lugar en una época determinada. Dado que la cantidad de agua es diferente para cada cultivo, e incluso puede variar a lo largo del crecimiento de una misma planta, no es posible establecer umbrales de sequía agrícola válidos ni tan siquiera para un área geográfica.

En zonas de cultivos de secano va ligada a la sequía meteorológica con un pequeño desfase temporal dependiente de la capacidad de retención de humedad del suelo edáfico. En zonas irrigadas la sequía agrícola está más vinculada a la sequía hidrológica (MITECO, s.f.).

### **Sequia Hidrológica**

(Valiente, 2001), hace referencia a una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, embalses, lagos, etc.).

Al producirse un desfase entre la escasez de lluvias o nieves y la reducción del caudal de ríos o el nivel de lagos y embalses, las mediciones hidrológicas no pueden ser utilizadas como un indicador del inicio de la sequía, pero sí de su intensidad (Valiente, 2001).

A diferencia de la sequía agrícola, que tiene lugar poco tiempo después de la meteorológica, la sequía hidrológica puede demorarse durante meses desde el inicio de la escasez pluviométrica (véase la figura nº 1) o, si las lluvias retornan en poco tiempo, no llegar a manifestarse. Por tanto, la secuencia temporal es: sequía meteorológica, a continuación, sequía agrícola y en último lugar, sequía hidrológica (Valiente, 2001).

La capacidad de gestionar los recursos hídricos hace que la sequía hidrológica no dependa exclusivamente del volumen de agua existente en los depósitos naturales o artificiales, sino que también es determinante la forma en que se emplea el agua embalsada (Valiente, 2001).

Linsley et al. (1975) toman en consideración estos aspectos, al definir sequía hidrológica como el «período durante el cual los caudales son inadecuados para

satisfacer los usos establecidos bajo un determinado sistema de gestión de aguas».

De acuerdo a (OMM(Organización Meteorológica Mundial), 2006), puede definirse como aquella relacionada con periodos de caudales circulantes por los cursos de agua o de volúmenes embalsados por debajo de lo normal. Una definición más precisa sería la disminución en las disponibilidades de aguas superficiales y subterráneas en un sistema de gestión durante un plazo temporal dado, respecto a los valores medios, que puede impedir cubrir las demandas de agua al cien por cien.

A diferencia de la sequía agrícola, que tiene lugar poco tiempo después de la meteorológica, la sequía hidrológica puede demorarse durante meses o algún año desde el inicio de la escasez pluviométrica o si las lluvias retornan en poco tiempo, no llegar a manifestarse (OMM(Organización Meteorológica Mundial), 2006).

### **C. Sequia Socioeconómica**

De acuerdo a (Gaucin, 2012), se produce cuando “la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños (económicos o personales) a la población de la zona afectada por la escasez de lluvias. Para hablar de sequía socioeconómica no es necesario que se produzca una restricción del suministro de agua, sino que basta con que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica. La pujante presión antrópica sobre el recurso agua hace que cada vez sea mayor la incidencia de la sequía socioeconómica, con pérdidas económicas crecientes, incluso en el caso de una sequía meteorológica leve”.

“En términos generales, la sequía socioeconómica sucede a la agrícola, pero en regiones menos desarrolladas, donde este sector tiene un mayor peso en la economía, y su incidencia es más directa e inmediata que en regiones desarrolladas, la sequía agrícola constituye en sí misma el inicio de la sequía socioeconómica”. (Valiente, 2001)

Entendida como afección de la escasez de agua a las personas y a la actividad económica como consecuencia de la sequía. Para hablar de sequía socioeconómica no es necesario que se produzca una restricción del suministro

de agua, sino que basta con que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica con consecuencias económicas desfavorables (AClimate, 2015).

“La creciente presión de la actividad humana sobre el recurso agua hace que cada vez sea mayor la incidencia de la sequía socioeconómica, con pérdidas económicas crecientes”. (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2015)

En el caso de la sequía socioeconómica, son tan determinantes la magnitud y la duración del evento seco como la forma en que la economía y la sociedad desarrollan sus actividades, ya que determinadas acciones incrementan la vulnerabilidad a la escasez de precipitaciones (Valiente, 2001).

En función de esa vulnerabilidad, los efectos de la sequía sobre la economía y la sociedad, medidos en forma de pérdidas materiales, población afectada o pérdida de vidas humanas, adquirirán mayor o menor relevancia, llegando a configurar situaciones en las que la sequía es considerada una catástrofe.

Las diferentes formas en que la sociedad y la economía de una región pueden verse afectadas por la escasez de precipitaciones quedan reflejadas en las diversas definiciones existentes de este tipo de sequía:

- «Escasez de precipitaciones tan cuantiosa y continuada como para afectar dañinamente a la vida animal y vegetal de un lugar, y para reducir las reservas de agua para usos domésticos y para el funcionamiento de plantas energéticas, especialmente en aquellas regiones donde la lluvia es normalmente suficiente para tales necesidades» (Havens, 1954).
- «Desvío negativo extenso y significativo de la precipitación con relación al régimen alrededor del cual una sociedad se ha establecido» (Rasmussen, 1987).
- «Fenómeno accidental de duración variable, marcado por un déficit anormal de agua, que produce una ruptura del equilibrio natural, una desorganización de la gestión del país, una reducción considerable de la producción, y conflictos sociales que pueden ser irreversibles. Se produce en todos los dominios climáticos, pero afecta más duramente a las

regiones semiáridas marcadas por una fuerte variación interanual de las lluvias» (Toupet, 1989).

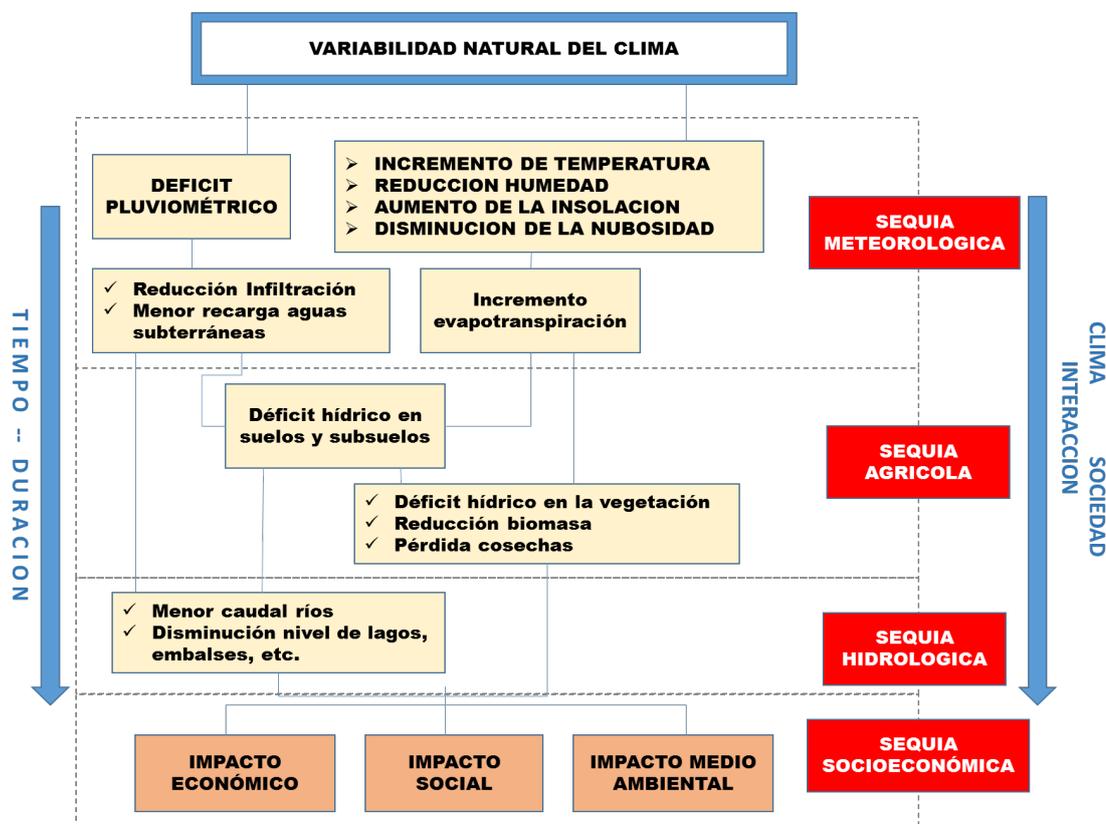
- «Déficit hídrico inusual que genera impactos adversos en la sociedad que la padece, alterando el normal desenvolvimiento de su vida colectiva» (Pita López, 1995).
- «Episodio de baja precipitación y mala distribución de las lluvias, que hace difícil la alimentación de la población y los rebaños, e imposibilita el mantenimiento de las reservas de agua necesarias para el consumo humano y animal» (SUDENE, 1999).

Los cuatro tipos de evento seco analizados reflejan un proceso de evolución de la sequía, determinado tanto por la variabilidad natural del clima, como por la duración del evento, y por la interacción entre clima y sociedad (véase la figura nº 2). “Cada tipo de sequía es cuantificado para poder establecer la magnitud y duración del período de escasez pluviométrica, pero la diversidad de definiciones existentes determina la existencia de numerosos métodos de cuantificación, tal y como se puede observar en el siguiente apartado”. (Valiente, 2001)

“Las sequías agrícola, hidrológica y socioeconómica son menos frecuentes que la meteorológica debido a que en esos sectores los efectos están vinculados a la disponibilidad de agua en la superficie y en el subsuelo” (OMM(Organización Meteorológica Mundial), 2006).

Por lo general, transcurren varias semanas antes de que las deficiencias de precipitación comiencen a producir un déficit de humedad en el suelo que, a su vez, afectará negativamente a los cultivos y a los pastizales. La persistencia de un tiempo seco durante meses reduce el caudal de los ríos y el nivel de los embalses y lagos y, potencialmente, el nivel de las aguas freáticas ( Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (Flacso Paraguay), 2022).

Ilustración 1: Variabilidad Natural del Clima



Fuente: Valiente, 2001

#### 2.1.4 Métodos para la evaluación de la sequía

Las variables que comúnmente están involucradas en los métodos de estimación van desde precipitación, considerando diferentes períodos de tiempo, temperatura, evaporación, evapotranspiración, humedad del suelo, capacidad de almacenamiento del suelo, corrientes superficiales, niveles de agua almacenada, entre otros (Pichardo, 1989).

Se han desarrollado métodos simplificados que emplean una sola variable hasta aquellos que emplean diversos parámetros, dando una mayor confiabilidad en los resultados, pero requieren de complicados cálculos y con frecuencia no se dispone de datos suficientes para tal fin (Pichardo, 1989).

La sequía es un peligro cuya definición y detección es muy compleja. Tiene efectos en múltiples sectores y a varias escalas temporales. Al igual que no existe una única definición de sequía, tampoco existe un único índice que satisfaga todos los requisitos de todas las aplicaciones (OMM, 2012).

Dicho esto, es importante poder calcularse la sequía para muchas escalas temporales, lo que posibilita abordar muchos de los tipos de sequía ya descritos. La posibilidad de calcular en diversas escalas temporales permite tener flexibilidad temporal en la evaluación de las condiciones de precipitación en relación con el abastecimiento de agua (OMM, 2012).

Tal y como ya se ha mencionado, evaluar el déficit de precipitación para múltiples escalas temporales o “ventanas de promedios móviles”. Esas escalas temporales reflejan los efectos de la sequía en distintos recursos hídricos que necesitan conocer las diversas instancias decisorias. Las condiciones meteorológicas y de humedad del suelo (agricultura) responden a anomalías de precipitación en escalas temporales relativamente cortas, por ejemplo, de entre 1 y 6 meses, mientras que los caudales fluviales, el almacenamiento en reservorios y las aguas subterráneas responden a anomalías de precipitación a más largo plazo, del orden de 6 meses y hasta 24 meses o más. Así, por ejemplo, habría que estudiar el índice de sequía 1 ó 3 meses para la sequía meteorológica, de entre 1 y 6 meses para la sequía agrícola, y de entre unos 6 y 24 meses o más para los análisis y aplicaciones de sequía hidrológica (OMM, 2012).

En Bolivia se implementó, además del SPI otros Índices de Monitoreo de la sequía en la página del SENAMHI, estos índices usados son:

### **2.1.5 Índices hidrológicos para el monitoreo de sequias (MMAyA, 2020)**

#### **2.1.5.1 EDI (*Effective Drought Index*) - *Índice de sequía efectiva Precipitación y Evapotranspiración***

El EDI se basa en el concepto de precipitación efectiva (EP). La precipitación efectiva es una función de la lluvia del mes actual y la lluvia ponderada durante un período anterior definido.

#### **2.1.5.2 SPEI (*Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*)- *Índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración***

El procedimiento para calcular el SPEI es similar a lo utilizado para el SPI. Sin embargo, el SPEI considera el "balance climático hídrico", la diferencia entre

precipitación y evapotranspiración de referencia (P - ETP), en lugar de la sola precipitación (P) como entrada.

#### **2.1.5.3 AI (Aridity Index) - Índice de aridez**

El índice de aridez se define como la relación entre precipitación y temperatura media, obtenida mediante normalización restando la media climatológica y dividiendo por la desviación estándar climatológica para cada mes del año por separado.

#### **2.1.5.4 LFI (Low Flow Index) - Índice de bajo flujo**

Los valores diarios de umbral de flujo bajo se definen como los valores de flujo de agua (Q) correspondientes al percentil 95 de la CDF("Q\_95"), es decir, los caudales iguales o excedentes durante el 95% del tiempo.

#### **2.1.5.5 RDI (Reservoir Drought Index) - Índice de sequía de embalse**

El índice de sequía del embalse representa el almacenamiento de agua en un lago (por ejemplo, Poopo), en relación con el máximo valor registrado.

#### **2.1.5.6 SSMI (Standardized Soil Moisture Index) - Índice de humedad del suelo.**

Se basa en reescalar el contenido de humedad del suelo a partir de los valores históricos mínimos y máximos. Esto puede ser una fuerte limitación en caso de registros históricos cortos (por ejemplo, SMAP a partir de 2015). Esta limitación puede superarse utilizando las propiedades hidráulicas del suelo como referencia, como la capacidad de campo y el punto de marchitez.

#### **2.1.5.7 SSPI (Standardized SnowPack Index) - Índice estandarizado de la capa de nieve**

El Índice de la capa de nieve estandarizado (SSPI) se calcula de la misma manera que el SPI (Índice de precipitación estandarizado), excepto por el hecho de estar basado en la serie temporal diaria equivalente de agua de la capa de nieve. El SSPI proporciona información sobre el volumen relativo de la capa de nieve en la cuenca en forma mensual en comparación con el período de referencia.

### **2.1.5.8 SSCI (Standardized Snow Cover Index) - Índice de manto de nieve**

El Índice Estandarizado del manto de nieve es una primera aproximación para el monitoreo del agua acumulada en la superficie en forma de hielo o nieve. Informa sobre la extensión de las áreas cubiertas de nieve, independientemente del espesor de la capa de nieve.

### **2.1.5.9 RDI (Reservoir Drought Index) - Índice de sequía de embalse**

### **2.1.5.10 PDSI (Palmer Drought Severity Index) - Índice de severidad de sequía de Palmer.**

El Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI por sus siglas en inglés) fue un hito en el desarrollo de los índices de sequía (Palmer, 1965). Con la se puede realizar la medición tanto de la humedad (valores positivos) y de la sequedad (valores negativos), en función del concepto de oferta y demanda de la ecuación de equilibrio del agua, y por lo tanto engloba la precipitación previa, el suministro de humedad, la escorrentía y la demanda de evaporación a nivel superficial.

### **2.1.5.11 SMI (Soil Moisture Index) - Índice de humedad del suelo.**

El déficit de volumen de humedad del suelo es un buen índice de la intensidad de la sequía tanto hidrológica como agrícola, en cuanto refleja la escasez de precipitaciones recientes e indica condiciones limitadas para la producción de cultivos. De hecho, la sequía agrícola ocurre cuando no hay suficiente humedad del suelo para sostener la producción de cultivos.

### **2.1.5.12 ESI (Evaporative Stress Index) - Índice dFAPAR Anomaly (Anomalía de la fracción de radiación activa absorbida fotosintéticamente) y estrés evaporativo**

ESI es un indicador de sequía agrícola que describe anomalías en la relación entre los valores de evapotranspiración (ET) “real/referencial”. Se define como anomalía estandarizada de la relación entre la ET real y la ET potencial (PET), donde la PET es la evapotranspiración teórica que ocurriría si el suelo estuviera bien provisto de agua. Al incluir tanto la ET como la PET, el ESI tiene la ventaja de ser sensible a todos los aspectos de suministro y demanda de humedad superficial, y por lo tanto depende de la precipitación, la humedad del suelo, las

características de planta y tierra, la humedad, la velocidad del viento, la temperatura del aire, y la radiación neta.

#### **2.1.5.13 FAPAR Anomaly (Anomalía de la fracción de radiación activa absorbida fotosintéticamente)**

El indicador FAPAR se calcula como desviaciones de la variable biofísica medida por satélite llamada fracción de radiación activa absorbida fotosintéticamente (FAPAR, a veces escrita como fAPAR o FPAR), a partir de sus valores medios a largo plazo. FAPAR es una de las 50 "Variables climáticas esenciales" que han sido definidas por el Sistema Mundial de Observación del Clima, de utilidad para el monitoreo global del clima.

#### **2.1.5.14 VHI (Vegetation Health Index) - Índice de salud de la vegetación**

El VHI consiste en una combinación lineal de dos componentes: el Índice de Condición de Vegetación (VCI), y el Índice de Condición Térmica (TCI). El componente VCI se estima comúnmente utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI) y tiene como objetivo considerar el estrés hídrico de la vegetación; el TCI se utiliza para evaluar el estrés de temperatura de la vegetación y se estima con base en la temperatura de la superficie terrestre (LST).

A continuación, se muestra la revisión bibliográfica hecha para los métodos a usarse en el estudio.

#### **2.1.5.15 Índice Normalizado de Precipitación**

La propuesta del Índice Normalizado de Precipitación surgió de la necesidad de proporcionar a encargado de la toma de decisiones en el estado de Colorado en los Estados Unidos de América, condiciones actuales de sequía en términos de probabilidad, déficits y suministro de agua, como un porcentaje del promedio usando registros históricos de climatología reciente, como base de comparación, ya que no había algún método que lo hiciera.

El Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) fue propuesto por McKee et al. (1993). Este índice consiste en la conversión de los datos de precipitación a probabilidades basadas en registros de precipitación a largo plazo. Las

probabilidades se transforman en series normalizadas con un promedio de 0 y una desviación estándar de 1. La principal ventaja del SPI con relación a los índices del Palmer es que permite el análisis de los impactos de las sequías a distintas escalas temporales (Edwards y McKee, 1997), además de la identificación de diferentes tipos de sequía, ya que diferentes sistemas naturales y sectores económicos pueden responder a las condiciones de sequía en escalas de tiempo muy diferentes (Vicente-Serrano y López-Moreno, 2005; Vicente-Serrano et al., 2011; Vicente-Serrano, 2007; Pasho et al., 2011).

Como se mencionó la sequía por este método está basada en un concepto de precipitación estandarizada, el cual se modifica al utilizar una transformación para convertir la distribución de precipitaciones a una distribución normal. Por otra parte, la definición de sequía propuesta por McKee, que se utiliza para medir la sequía por escalas de tiempo que van desde 3 hasta 48 meses, es la siguiente: se considera un suceso o evento de sequía para cualquier escala, cuando el SPI adopta valores negativos y consecutivos alcanzando una intensidad de -1 o menor, el evento termina cuando el SPI se vuelve positivo los Valores de SPI se encuentran comprendidos entre +3 y -3, correspondiendo los valores positivos a periodos húmedos.

#### **2.1.6 2.1.6. Rejilla de Precipitación y Temperatura**

La Rejilla desarrollada con la metodología de GMET descrita en detalle en (Newman et al., 2015). Reconoce la incertidumbre inherente de los productos de interpolación de precipitación y temperatura debido a las observaciones escasas, representatividad de las observaciones y errores de medición. Reconociendo esta incertidumbre, el método propuesto produce un ensamble de precipitación y temperatura a paso de tiempo diario basado en las observaciones existentes. La generación de ensambles permitió la estimación de una varianza para determinar la incertidumbre, y además durante la validación del producto se realizó una validación cruzada con datos de estaciones observadas. La verificación estadística del ensamble permitió identificar la confiabilidad del ensamble. Aunque el promedio del ensamble es similar a otros sets de datos existentes a nivel global, el producto de GMET es una representación más

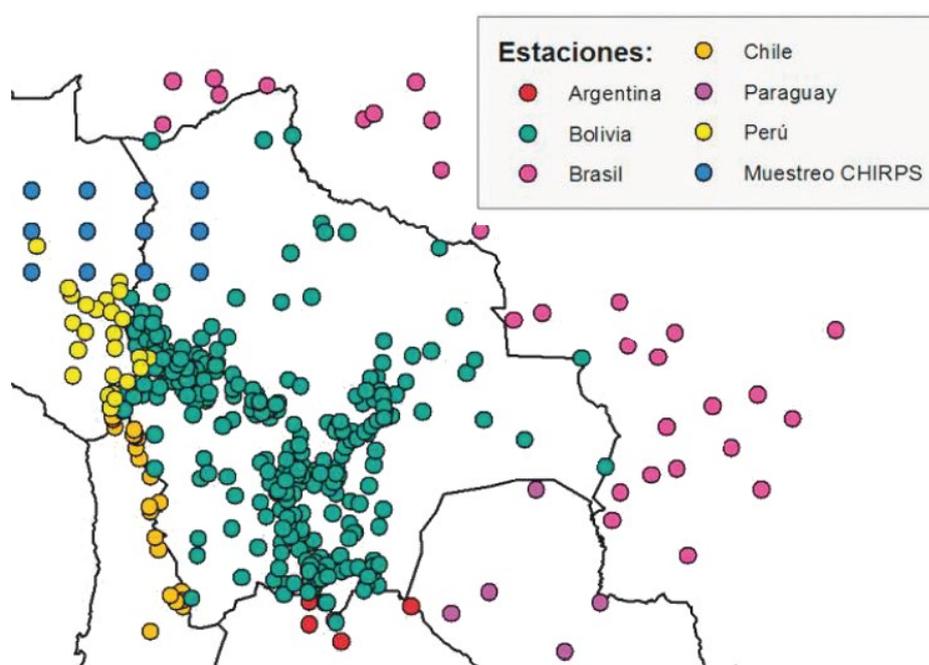
realista de la estadística de la precipitación por considerar parámetros espaciales invariantes en el tiempo y una red de estaciones de medición puntual, lo cual impacta la derivación empírica de otros campos usados en la modelación hidrológica. La habilidad para la modelación hidrológica de la Rejilla fue corroborada durante la ejecución de los balances hídricos.

La interpolación probabilística tiene dos pasos principales:

- ✓ La interpolación espacial, y
- ✓ La generación del ensamble

La interpolación espacial usa series de datos completa de precipitación y temperatura. Este set de datos cubre el territorio de Bolivia. Después de la depuración y análisis de las series, 384 estaciones individuales de temperatura y precipitación fueron consideradas para la interpolación. Los datos de estas estaciones fueron tratados y rellenados. GMET fue corrido para el territorio de Bolivia usando dichas estaciones para obtener un producto final con una resolución espacial de  $0.05^\circ$  (celda) a escala de tiempo diario para el periodo hidrológico 1980-2016 lo cual implica que se inicia en septiembre 1980 y termina en agosto 2016. El método siguió la guía de Clark and Slater (2006).

Ilustración 2. Estaciones Tierra Usadas para calibrar GMET



Fuente: Balance Hídrico de Bolivia

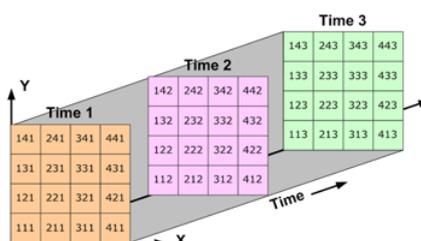
### 2.1.7 Archivos netCDF

El netCDF (formulario de datos comunes en red) es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (variables) como la temperatura, la humedad, la presión, la velocidad del viento y Fecha en formato ISO(ISO 8601) que almacena la fecha AAAA-MM-DD(año, mes y día) (AcademiaLab, 2022).

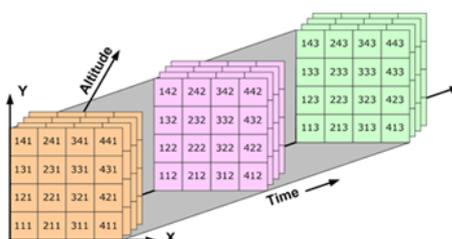
Esta librería permite fácilmente inspeccionar, leer, agregar y escribir archivos netCDF, es el más importante formato para almacenar y compartir datos científicos que conjuntamente pandas es muy fácil acceder a la información (Fundamentos del almacenamiento de datos netCDF, 2020).

Los datos de un archivo netCDF se almacenan en conjuntos. Por ejemplo, la precipitación que varía con el tiempo en una ubicación se almacena como un conjunto unidimensional. La precipitación de un área durante un tiempo determinado se almacena como un conjunto bidimensional (Fundamentos del almacenamiento de datos netCDF, 2020) (ZONISIG, 2000).

Los datos tridimensionales (3D), como p.ej., la precipitación de un área que varía con el tiempo, o los datos tetradimensionales (4D), como p.ej., la temperatura de una zona que varía con el tiempo y la altitud, se almacenan como series de conjuntos bidimensionales (ZONISIG, 2000)



Datos tridimensionales: son los datos de un área que varían con el tiempo.



### 2.1.8 Python

Software libre fue creado por Guido van Rossum, un programador holandés a finales de los 80 y principio de los 90 cuando se encontraba trabajando en el sistema operativo Amoeba. Primariamente se concibe para manejar excepciones y tener interfaces con Amoeba como sucesor del lenguaje ABC. El 16 de octubre del 2000 se lanza Python 2.0 que contenía nuevas características como completa recolección de basura y completo soporte a Unicode. Pero el mayor avance lo constituye que este comenzó a ser verdaderamente desarrollado por la comunidad, bajo la dirección de Guido. El Python 3.0 es una versión mayor e incompatible con las anteriores en muchos aspectos, que llega después de un largo período de pruebas el 3 de diciembre del 2008. Muchas de las características introducidas en la versión 3 han sido compatibilizadas en la versión 2.6 para hacer de forma más sencilla la transición entre estas. A Guido van Rossum le fue otorgado el Free Software Award (Premio del Software Libre) en el 2001, por sus trabajos en la creación y desarrollo del lenguaje Python. En el 2005 fue contratado por Google, donde (Centro de Información y Gestión Tecnológica, 2014) trabaja en la actualidad, aunque sigue liderando los esfuerzos en el desarrollo del Python (Centro de Información y Gestión Tecnológica, 2014).

Python cuenta con facilidades para la programación orientada a objetos, imperativa y funcional, por lo que se considera un lenguaje multi-paradigmas. Fue basado en el lenguaje ABC y se dice que fue influenciado por otros como C, Algol 60, Modula-3 e Icon según su propio autor (Ulchur, 2020).

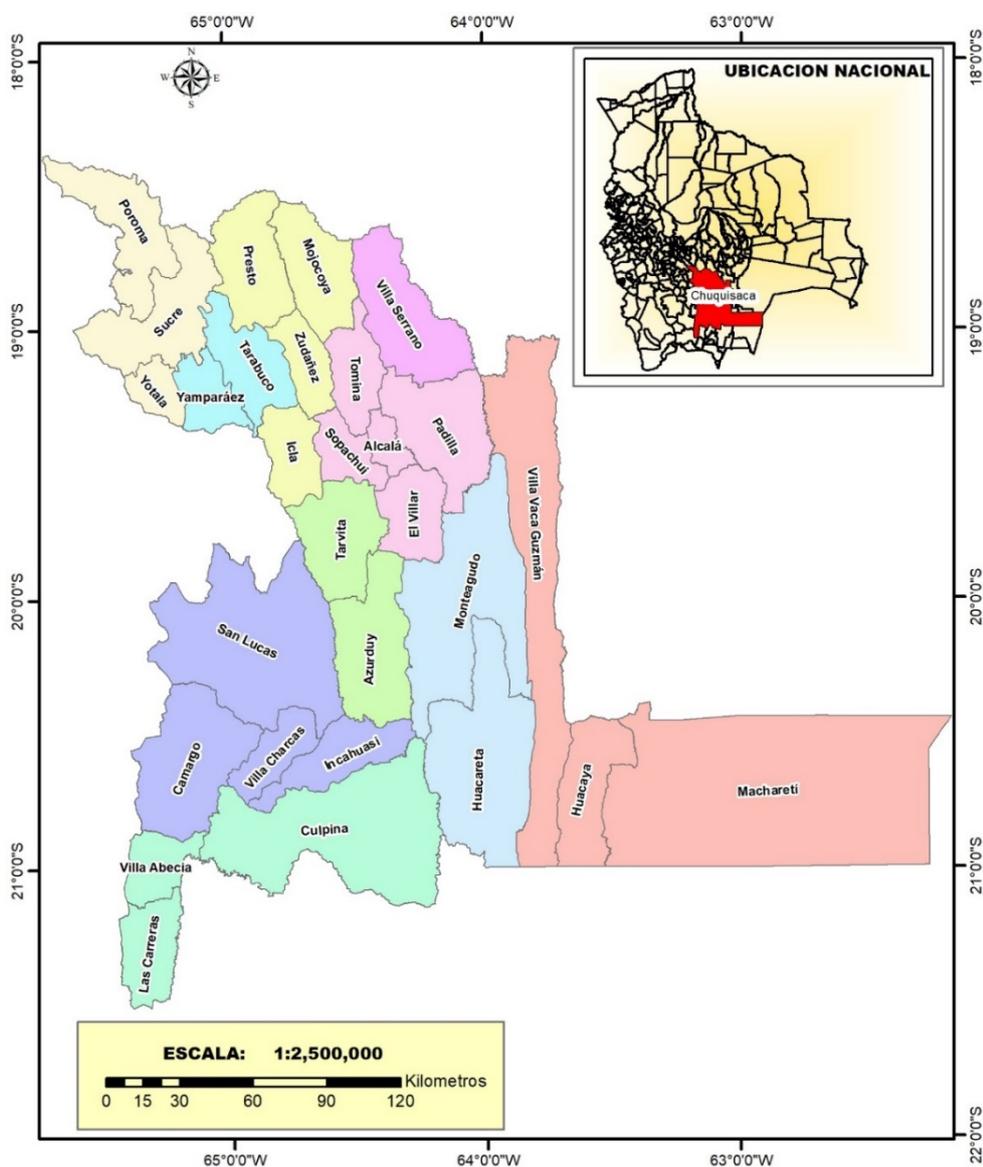
## CAPÍTULO III

### 3.1 MARCO CONTEXTUAL

#### 3.1.1 Ubicación Geográfica

El Departamento de Chuquisaca se encuentra ubicado en el Estado Plurinacional de Bolivia, limita al Norte con los departamentos de Potosí, Departamento de Cochabamba y el Departamento de Santa Cruz; al Sur con el Departamento de Tarija; al Este con el Departamento de Santa Cruz y la República de Paraguay y al Oeste con el departamento de Potosí (ZONISIG, 2000).

**Ilustración 3: Ubicación Estudio**



El Departamento de Chuquisaca se extiende aproximadamente con una superficie de 51.524 km<sup>2</sup> según datos históricos y estudio institucionales como ser Ex CORDECH, ZONISIG – 2.000, PLUS – 2.002, ZAE – 2.000, existiendo otros datos generados por instituciones como INE, IGM, Ministerio de Autonomías, etc. De aplicación específica. Cuenta con una población de 576.153 habitantes (censo 2.012), la mayoría concentrándose en la capital del departamento, Sucre, con sede del Órgano Judicial y capital constitucional del Estado Plurinacional de Bolivia (ZONISIG, 2000).

### 3.1.2 División política administrativa

El Departamento de Chuquisaca, uno de los nueve Departamentos de Bolivia, actualmente cuenta con 10 provincias y 29 municipios creados bajo los Decretos Supremos y Leyes, que se detallan a continuación (ZONISIG, 2000):

**Tabla 2: Creación de Provincias y Municipios de Chuquisaca. DS – 23/01/1826**

Provincia	Sección Municipal	Símbolo	Fecha
Oropeza CL de 18/11/1912	Sucre	ML	31/10/1995
	Yotala	ML	18/11/1912
	Poroma	ML	18/11/1912
Azurduy CL de 05/12/1917	Azurduy	ML	05/12/1917
	Tarvita	MDS	20/11/1879
Zudáñez CL de 05/12/1917	Zudáñez	ML	05/12/1917
	Presto	MDS	20/11/1879
	Mojocoya	MDS	20/11/1879
	Icla	MDS	20/11/1879
Tomina MDS de 20/11/1879	Padilla	ML	03/01/1827
	Tomina	ML	19/12/1888
	Sopachuy	MDS	20/11/1879
	Villa Alcalá	MDS	20/11/1879
	El Villar	MDS	20/11/1879
Hernando Siles MDS de 27/12/1951	Monteagudo	ML	18/10/1893
	Huacareta	ML	24/12/1957
Yamparáez CL de 18/11/1912	Tarabuco	ML	19/01/1900
	Yamparáez	ML	19/01/1900
Nor Cinti CL de 21/03/1944	Camargo	ML	05/11/1886
	San Lucas	MDS	20/11/1879
	Incahuasi	MDS	03/10/1984
	Villa Charcas	LR 4127	04/12/2009
Belisario Boeto CL de 15/10/1943	Villa Serrano	MDS	20/11/1879

Provincia	Sección Municipal	Símbolo	Fecha
Sud Cinti CDS de 21/03/1944	Camataquí	MDS	20/11/1879
	Culpina	ML	20/12/1960
	Las Carreras	ML	15/02/1993
Luís Calvo CL de 14/11/1947	Villa Vaca Guzmán	ML	14/11/1947
	Huacaya	ML	24/11/1909
	Machareti	ML	04/11/1950

Fuente: División Político – Administrativa de la República de Bolivia 1996

### 3.1.3 Principales Características Bio-físicas

Con peculiaridades tectónicas y de relieve propias, la cordillera Oriental está conformada de montañas, serranías, cuevas, colinas, piedemontes, terrazas aluviales, planicies e inversiones de relieve, donde es frecuente encontrar valles localizados en anticlinales. El grado de disección en las montañas es fuerte a muy fuerte, se observa en cuencas altas movimientos en masa en las pendientes escarpadas, debido a procesos erosivos promovidos por el sobrepastoreo. La amplia diversidad litológica permite encontrar areniscas, limolitas, lutitas, arcillitas, cuarcitas, conglomerados y pizarras, de origen sedimentario y metamórfico. La acción glacial en el pasado se manifiesta en las montañas altas como en la Cordillera de Lique y en otras serranías altas como Mandinga – Los Sombreros, con la presencia de depósitos morrénicos y depósitos fluvioglaciares (ZONISIG, 2000).

Las serranías normalmente son de forma alargada con rumbo Norte – Sur, con cimas agudas y aserradas; las pendientes en ellas son muy fuertes, particularmente cuando están conformadas por rocas duras de altos valores de inclinación, acentuadas en otras situaciones, por un activo grado de disección. Las pendientes escarpadas presentan abundantes piedras meteorizadas en superficie y suelos poco profundos con baja disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, en algunas las cimas planas o redondeadas de algunas montañas se observa turberas y suelos negros con abundante materia orgánica (ZONISIG, 2000).

Algunas cimas de las cuencas altas se caracterizan por presentar cimas redondeadas y planas, condición que favorece el desarrollo de la vegetación andina, compuesta de pastos, líquenes y algunas especies herbáceas, lo cual

favorece la infiltración de agua en el suelo y el desarrollo de suelos con abundante materia orgánica. Las pendientes escarpadas presentan suelos pedregosos y superficiales, la reducción del manto herbáceo por la disminución de la humedad y el sobrepastoreo, conforme se va descendiendo, exponen a los suelos a la intensidad de las precipitaciones pluviales, con lo cual se aceleran procesos erosivos producto de la escorrentía superficial (ZONISIG, 2000).

En la cordillera oriental, las temperaturas medias anuales en la zona de pre-puna y puna descienden con la elevación del terreno, encontrándose valores que oscilan entre los 12 y 4° C respectivamente. En la zona de las cabeceras de valle y valles, las temperaturas son más benignas con promedios anuales que varían entre 13 y 17° C y 18 hasta 20° C respectivamente (ZONISIG, 2000).

En las cuencas, subcuencas y microcuencas de región andina el patrón de drenaje por donde se escurre el agua es dendrítico o subdentrítico, característicos de los ríos de la zona montañosa, genéticamente en estado "juvenil", y de "valle" en las partes bajas y planas donde el río ha llegado a su estado de semi-madurez (ZONISIG, 2000).

En estos sistemas la red de drenaje está formada por numerosos cursos de agua primarios o secundarios, que son pequeños, cortos e irregulares, que discurren en todas las direcciones, cubren áreas amplias y confluyen en el río o corriente principal formando cualquier ángulo. En la Cordillera Oriental, la pendiente de los causes es pronunciada, debido a gradiente altitudinal (ZONISIG, 2000).

Los ecosistemas de las cuencas altas de la cordillera oriental albergan importantes recursos de biodiversidad y geo diversidad andina del departamento, así los relictos bosques de Quewiña (*Polylepis* spp.) y Aliso (*Alnus acuminata*) y amplios y diversos pastizales naturales, favorecen la captación y recarga de acuíferos (ZONISIG, 2000).

La importancia de los relictos bosques andinos de Quewiña, además de ser una importante fuente y reserva energética, donde no hay otro árbol que crezca, favorece el mantenimiento de una importante diversidad biológica de aves andinas (ZONISIG, 2000).

### **3.1.3.1 Fisiografía**

**CA) Colina Alta.** Elevaciones que van de 70 u 80 m hasta unos 250 m, con pendientes mayoritarias comprendidas entre 50 y 70%. La litología es variada, de depósitos cuaternarios y de sedimentos terciarios. La erosión puede ser severa incluso bajo el bosque, principalmente por escurrimiento superficial durante las fuertes lluvias. Sin embargo, ante procesos de deforestación las acciones erosivas pasan a una fase más activa de deslizamientos. Por la menor pendiente y menor magnitud de los relieves, las lomadas son por lo general más estables y menos erosivas que las colinas bajas, y estas a su vez menos erosivas que las colinas altas. Sin embargo, este esquema varía según la composición litológica y nivel de intervención antrópica que afrontan. Estos paisajes comprenden aproximadamente 1.409,71 Km<sup>2</sup> en el departamento de Chuquisaca que se encuentran en los municipios de San Lucas, Yamparáez, Camargo, Sucre, Mojocoya, Villa Serrano y Padilla (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**CM) Colina Media.** Forma del relieve de baja elevación, de crestas agudas o redondeadas, cuya altura de la base a la cima debe ser menor de 300 metros. Se reconocen tres tipos principales de colinas: Colinas altas, medias y bajas cuando tienen alturas de 300 a 80, de 80 a 20 y menos de 20 metros respectivamente. En Chuquisaca se tiene aproximadamente una superficie de 1.358,53 Km<sup>2</sup> distribuidas en los municipios de Culpina, Machareti, Muyupampa, Monteagudo y Huacareta (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**CB) Colina Baja.** Elevaciones que no pasan de 70 u 80 m, con pendientes que van de 20 a 50%, con frecuentes sectores de mayor pendiente. Los materiales que las conforman son algo más variados, que incluyen acumulaciones de material aluvial antiguo y sedimentos terciarios. La erosión, es débil, excepto cuando estos espacios han sido deforestados. En el departamento de Chuquisaca ocupa aproximadamente una superficie de 3.071,98 Km<sup>2</sup> distribuido en los municipios de Villa Charcas, Culpina, Machareti, Huacaya, Huacareta,

Villa serrano, Padilla, Villa Alcalá y Sopachuy. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**LP) Llanura de piedemonte.** Es una zona de transición de las últimas estribaciones del subandino hacia la llanura chaqueña. Las características físico-climáticas tienen estrecha relación con los contrafuertes del subandino. Abarca una superficie estimada en 268,52 Km<sup>2</sup> y están distribuidas en los municipios de Machareti, Tomina, Mojocoya, Villa Alcalá, etc. La llanura piedemonte tiene una topografía casi plana, interrumpida por la presencia de dunas estabilizadas por la vegetación y por zonas depresivas, conocidas como bañados. Tiene una altura que disminuye de oeste a este de características agropecuarias intensivas en generalidad. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**LA) Llanura Aluvial.** Una llanura aluvial, llanura de inundación, o valle de inundación, es la parte orográfica que contiene un cauce y que puede ser inundada ante una eventual crecida de las aguas de ríos o fuentes. Muchas veces la topografía de las llanuras de los ríos está en forma de conos, llamado cono de deyección, lo que significa que el lecho del río podría desplazarse con bastante facilidad, inundando zonas alejadas del lecho principal actual. Dichas zonas constituyen zonas interesantes para el desarrollo del riego, debido a la topografía favorable como para desviar agua del río hacia cualquier punto de su zona aluvial. Se trata entonces de zonas vulnerables (ZONISIG, 2000).

Los ríos están generalmente encauzados, protegiendo así las zonas agrícolas tal como las zonas urbanas.

Además, para tener acceso más fácil al agua, las ciudades fueron, muchas veces, construidas muy cerca de los ríos, lo que las torna más vulnerables. Para reducir los riesgos de cambio importante de lecho durante crecidas fuertes, se debe tomar en cuenta la dinámica fluvial de los ríos asociada con el transporte de sedimentos, controlando la evolución de los cauces y evitando errores graves tales como puntos de reducción excesivos de la sección del río (con presas derivadoras, bocatomas, puentes, etc.) (ZONISIG, 2000).

En Chuquisaca, bajo el término de llanura aluvial se hace especial alusión a las áreas, más bien pequeñas y de suelos blandos y fértiles, que en zonas áridas

contornean arroyos o sólo se muestran en algunos de sus recodos. Pueden ser en manantiales de montaña (como en los Andes) o en sectores desérticos de baja altitud, los cuales, al estar siempre bien regados, generalmente son las únicas áreas de la región que disponen de pastos tiernos; por ello son fundamentales para la biodiversidad y la ganadería. Este paisaje comprende una superficie aproximada de 4008,6 Km<sup>2</sup> distribuidos en los municipios de Machareti, Muyupampa, Huacareta, Monteagudo, Yamparáez, etc. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**LE) Llanura Eólica.** Una llanura eólica es un espacio geográfico con poca o ninguna variación en la altura de la superficie o terreno con respecto al nivel del mar. Llanura Eólica es una planicie de la superficie terrestre del departamento y es una extensión plana aproximada de 632,45 Km<sup>2</sup> o con ligeras ondulaciones generalmente debajo de los 200 metros o más sobre el nivel del mar que hay en la tierra. Las llanuras eólicas ocupan, principalmente, las áreas centrales del municipio de Machareti (ZONISIG, 2000).

Se formaron por acumulación de sedimentos traídos por el viento, los ríos, que depositaron en zonas bajas aprovechadas, por ejemplo, para la práctica de la agricultura. Conocidos como superficies de erosión o de planación, son resultado del desgaste de las rocas sobre la superficie terrestre. El término superficie de planeación es más preciso porque muchas de las superficies podrían denominarse superficies de erosión. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**LFL) Llanura Fluvio – Lacustre.** Extensión plana que resulta del relleno progresivo de ciénagas o depresiones internas, caracterizada por una red de cauces divergentes o anastomosados bordeados por diques que separan bajos pantanosos. Son suelos que se caracterizan por terrazas estabilizadas que no reciben en la actualidad aporte de materiales; de ellas se distinguen cuatro niveles que corresponden a diferentes depósitos, los cuales contrastan en edad, características físico - químicos y procesos geomorfológicos actuantes, son superficies planas, ligeramente planas y ligeramente onduladas, con ligera disección provocadas por el escurrimiento difuso (ZONISIG, 2000).

Son suelos poco evolucionados, presentan en el perfil un decrecimiento irregular de carbono orgánico, además hay presencia de grietas y superficies de deslizamiento; encontramos entre otros, el de los municipios Culpina, Mojocoya. Con una extensión aproximada de 91,1 Km<sup>2</sup> en el departamento. También pertenecen a esta posición superficies planas a ligeramente onduladas que conforman la parte más alta de la terraza fluvio lacustre, las cuales han sufrido procesos de escurrimiento difuso en las partes planas que han dejado huellas de erosión ligera a moderada, la altura no excede a los 40 m.s.n.m. Son suelos superficiales a moderadamente profundos, limitados por arcillas abigarradas, muy compactadas y de depósitos de arena cuarzosa y son excesivamente drenados. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**LP) Llanura de Piedemonte.** Este microambiente está delimitado hacia su parte Oeste por el río San Lucas. Presenta áreas de piedemonte de poca extensión que, en muchos sectores, dan lugar a pendientes fuertes, mayores a 45°. Estas áreas dan paso a una serranía que alcanza una elevación promedio de 3.300 m.s.n.m. En esta zona una serie de quebradas que corren en dirección Sureste-Noroeste dan lugar a ríos estacionales. Existen afloramientos de cuarcita así como de minerales y cobre y otros que han sido explotados desde tiempos prehispánicos dando lugar a la existencia de varias minas. La vegetación está compuesta por arbustos xerofíticos, molle, cactáceas y gramíneas. Muchos sectores del piedemonte fueron empleados para tareas agrícolas donde se cultivó con canales de irrigación y sistemas a secano, existiendo restos de terrazas prehispánicas y coloniales en áreas aptas y abrigadas. Sin embargo, hoy en día estas terrazas a secano han sido abandonadas por falta de agua (ZONISIG, 2000).

En el pasado los sectores de piedemonte fueron aprovechados para establecer asentamientos humanos.

En el departamento existe una superficie aproximada de 1.375,78 Km<sup>2</sup> y está distribuida en los municipios de Machareti, Tomina, Villa Alcalá, el Villar Sopachuy, Mojocoya. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico (ZONISIG, 2000)).

**MA) Montaña Alta. Montaña.** Elevación natural mayor de 500 – 700 m. de la superficie terrestre con respecto a las porciones contiguas. Una montaña Alta puede tener una forma aislada o constituir conjuntos mayores con varias alineadas o unidas. Por lo general, presenta formas con pendientes moderadas a bajas en las partes bajas, moderadas a fuertes en las medias y fuertes a escarpadas en las partes altas. El origen de las montañas está en fuerzas endógenas (orogénesis: oro = montaña, génesis = origen), posteriormente modificadas por factores exógenos, como la erosión. En la Era Cuaternaria las glaciaciones han erosionado las cadenas montañosas, dando lugar a muchos de los paisajes montañosos característicos. Un ejemplo de formación montañosa terciaria es la Cordillera de los Andes (ZONISIG, 2000).

Según su altura las montañas se pueden dividir en colinas, montañas medias, y montañas altas. Por la forma en que se agrupan podemos encontrar cordilleras, unidas en sentido longitudinal, y macizos, agrupadas en forma más circular o compacta. Esta unidad se encuentra principalmente en la región sur y norte de la cordillera oriental y está constituida por montañas altas moderadamente disectadas, pendientes entre 40 – 70 % y una altitud entre 3.900 a más de 4.500 m.s.n.m. Superficie: La unidad abarca 2.650,03 Km<sup>2</sup> en el departamento de Chuquisaca, en este paisaje afloran estrato volcanes del Cuaternario con vegetación cubierta por matorral mayormente siempre verde. Los Suelos son muy superficiales, drenaje bueno a excesivo, fertilidad baja a muy baja; Con riesgos de erosión y deslizamientos; pedregosidad y/o rocosidad y fertilidad muy baja. Este paisaje se distribuye en los municipios de Tarvita, Azurduy, Las Carreras, Villa Abecia, Camargo, etc. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**M) Montaña Media.** El escalonamiento altitudinal es una característica universal de los sistemas montañosos (Rougerie, 1.990), escalonamiento que se advierte en la variación climática, biológica, en la tipología de los suelos, en los procesos morfogénicos y por ende en los modelados y también en las formas de ocupación social del espacio, sus formas de producción y sus productos (ZONISIG, 2000).

La macrounidad considerada como la montaña media incluye espacios ubicados altitudinalmente abajo de los  $2.700 \pm 100$  m. Bioclimáticamente en la montaña media tienen su mayor expresión los pisos Andino y Subandino, aunque en algunos casos en su borde inferior alcanza el piso Ecuatorial. Los sistemas morfogénicos de esta macrounidad son aquellos sin influencia directa de los eventos glaciares y glaciales (aunque sí indirecta) del pasado o del presente, descritos para la alta montaña. Su límite inferior va hasta los escarpes fundamentales que separan las cordilleras de las depresiones interandinas y periféricas. Esta unidad se encuentra principalmente en la región sur de la cordillera oriental, está constituida por montañas medias moderadamente disectadas, pendientes entre 40 a 60 % y una altitud entre 3.900 y 4.500 m.s.n.m. La unidad abarca una superficie aproximada en el departamento 980,87 Km<sup>2</sup>; En este paisaje afloran estrato volcanes del cuaternario, con una cobertura vegetación de matorral mayormente siempre verde y vegetación herbácea graminoide baja con Suelos superficiales, drenaje bueno a excesivo, fertilidad baja a muy baja. Matorral Desértico Montano Templado, Tundra seca Alpino (ZONISIG, 2000).

Templado. Limitaciones y riesgos: Riesgos de erosión y deslizamientos; pedregosidad y/o rocosidad y fertilidad muy baja. Estos paisajes se ubican en los municipios de Villa Abecia, Yamparáez, Culpina, Tarvita, Sopachuy, Sucre, Zudáñez, etc. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**MB) Montaña Baja.** Son relieves que se elevan entre 250 a 500 m sobre los niveles de base circundantes, con pendientes que van generalmente entre 25 a 70%. La constitución litológica predominante es de areniscas intercaladas con lutitas. Las areniscas son rocas consistentes y por lo general forman resaltes topográficos, mientras que las lutitas son rocas bastante débiles, y tienden a ser más fácilmente erosionadas proporcionando sectores de menor pendiente. Cabe destacar que en el mapa geomorfológico del área de influencia directa, las montañas bajas se han subdividido en montañas bajas moderadamente empinadas (pendiente de 25 a 50% predominante), y montañas bajas empinadas (50 a 70 % de pendiente predominante). Esta unidad se encuentra principalmente en la región central de la cordillera Oriental y está constituida por

montañas bajas fuertemente disectadas, pendientes la Superficie de la unidad abarca aproximadamente en el departamento 500,15 Km<sup>2</sup> en el departamento:,en este paisaje afloran lavas dacíticas y andesíticas del terciario y estrato volcanes del cuaternario con vegetación predominate herbáceo graminoide intermedia y ocasionalmente matorral mayormente siempre verde. Los Suelos son Superficiales, drenaje bueno a excesivo, fertilidad baja a muy baja. Con limitaciones y riesgos de erosión y deslizamientos; pedregosidad y/o rocosidad y fertilidad muy baja (ZONISIG, 2000).

Estos paisajes se distribuyen en los municipios de Culpina, Camargo, San Lucas.

**SA) Serranía Alta.** Son estructuras rocosas que rodean a las cuencas altas o altiplanicie con alturas que varían entre 3.900 a 4.500 m.s.n.m. Son zonas no aptas para la agricultura y están relacionadas con actividades mineras y la fundición de metales aprovechando los fuertes vientos que soplan en el lugar. Presentan una escasa vegetación predominando especies como la paja brava, yareta, Thola, etc.

Esta Unidad se encuentra principalmente en la región Norte de la cordillera oriental y está constituida por serranías altas moderadamente disectadas, pendientes entre 15 a 60%; La unidad abarca aproximadamente una superficie de 18.880,54 Km<sup>2</sup>; En este paisaje afloran lavas dacíticas y andesíticas del terciario. Los suelos son Superficiales, drenaje bueno a excesivo, fertilidad baja a muy baja con Limitaciones y riesgos de erosión; pedregosidad y/o rocosidad y fertilidad muy baja. Estos paisajes están distribuidos en los municipios de Muyupampa, Monteagudo, Huacareta, Villa Serrano,

Padilla, Villa Alcalá, Sopachuy, el Villar, Tarvita, Azurduy, Icla, Culpina, Incahuasi, Camargo, Las Carreras, Mojocoya, Poroma, Yotala, etc. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**SM) Serranía Media.** Estos paisajes Fisiográficos o unidad se encuentran principalmente en la región Sur de la cordillera oriental, sub andino y sobre todo en la región Chaco beniana y está constituida por serranías medias moderadamente disectadas, pendientes entre 15 a 60% y una altitud entre 3.800 a 4.000 m.s.n.m. La Superficie de esta unidad abarca aproximadamente en el

departamento 10.195,94 Km<sup>2</sup>. En este paisaje afloran lavas dacíticas y andesíticas del terciario y estrato volcanes del cuaternario (ZONISIG, 2000).

La unidad está cubierta por matorral mayormente siempre verde y vegetación herbácea graminoide baja. Los Suelos son superficiales, drenaje bueno a excesivo, fertilidad baja a muy baja, con limitaciones y riesgos de erosión; pedregosidad y/o rocosidad y fertilidad. Este paisaje se encuentra distribuido en los municipios de Machareti, Huacaya, Muyupampa, Huacareta, Monteagudo, Villa Charcas, San Lucas, Sopachuy, Tarvita, Sucre, Poroma Presto, Yotala, Zudáñez, etc. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**SB) Serranía Baja.** Esta unidad se encuentra principalmente en la región Sur de la cordillera oriental, en el Sub andino y el Chaco beniano y está constituida por serranías bajas moderada y fuertemente disectadas, pendientes entre 15 a 60% y una altitud menor a entre 3.350 y 3.500 m.s.n.m. La unidad abarca aproximadamente una superficie de 4.643,3 Km<sup>2</sup>; En este paisaje afloran lavas dacíticas y andesíticas del terciario. La Unidad está cubierta por matorral mayormente siempre verde. Con suelos superficiales, drenaje bueno a excesivo, fertilidad baja. Con limitaciones y riesgos de erosión pedregosidad y/o rocosidad y fertilidad. Esta unidad se encuentra dispersa en los municipios de Machareti, Huacaya, Muyupampa, Monteagudo, Tomina, Padilla, Sucre, San Lucas, etc. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**SE) Superficie de Erosión.** Superficie de erosión es la degradación y el transporte de suelo o roca que producen distintos procesos en la superficie de la Tierra. Entre estos agentes está la circulación de agua o hielo, el viento, o los cambios térmicos. La erosión implica movimiento, transporte del material, en contraste con la disgregación de las rocas, fenómeno conocido como meteorización. La erosión es uno de los principales factores del ciclo geográfico. La erosión puede ser incrementada por actividades humanas o antropogénicas. La erosión produce el relieve de los valles, gargantas, cañones, cavernas y mesas (ZONISIG, 2000).

Esta Unidad se encuentra principalmente en las regiones central y sur del departamento está constituida por superficies de erosión fuerte, moderadamente

y ligera disectadas, pendientes entre 0,5 a 2% y una altitud entre 2.900 a 3.900 m.s.n.m. La superficie de la unidad abarca aproximadamente en el departamento 807,26 Km<sup>2</sup>. En este paisaje afloran sedimentos del terciario; la vegetación está cubierta por matorral enano siempre verde: vegetación herbácea xeromórfica y matorral decíduo. Con suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bien drenados y pedregosos. Esta unidad se encuentra distribuida en los municipios de Mojocoya, Icla, Tarabuco, Yamparáez, Las carreras, Villa Abecia Culpina, Huacareta, Villa Serrano, Sucre, etc. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**VA) Valle Coluvi - Aluvial.** Se refiere este sistema principalmente a los valles mayores de las cuencas hidrográficas desarrolladas dentro de las mismas depresiones y a otros de carácter alóctono procedentes de las montañas en los grandes paisajes de Cordillera oriental y el sub andino. Con superficies aproximadas de 8,91 Km<sup>2</sup> en el departamento (ZONISIG, 2000).

El sistema se identifica por valles plano-cóncavos, en que la parte plana está compuesta por sedimentos aluviales de aporte longitudinal y ubicada en la parte central, mientras que los bordes de forma cóncava son los depósitos coluviales de aporte lateral. Los aportes coluviales laterales son más representativos en áreas con clima de tendencia seca; ej.: llanura aluvial del Alto Magdalena, valles de algunos afluentes del río Pilcomayu y bordes de las serranías del norte del departamento (ZONISIG, 2000).

Dentro de estos valles actúa moderadamente la disección en surcos y túneles en los bordes cóncavos, seguidos por la saltación pluvial en suelos desnudos. En conjunto, se trata de procesos con baja intensidad y poco degradantes y además los aportes de materiales nuevos es frecuente (ZONISIG, 2000).

La tendencia de estos valles es al aumento de material coluvial de aporte lateral, ligado al escurrimiento superficial en los flancos. Otra tendencia se relaciona con el escurrimiento subsuperficial, proceso bastante generalizado, especialmente en áreas de clima deficitario, y cuyas formas resultantes son de difícil observación, ya que su expresión morfológica son los túneles y micro túneles que posteriormente pueden dar paso a la formación de surcos y cárcavas, como

formas de degradaciones más avanzadas. Estos paisajes están ubicados en los municipios de Muyupampa, Icla, Sucre, Yotala, etc. (Ver Mapa Fisiográfico - geomorfológico) (ZONISIG, 2000).

**M) Meseta.** Son planicies extensas situada a una determinada altura sobre el nivel del mar (más de 500 m) provocada por fuerzas tectónicas, por erosión del terreno circundante, o por el emergimiento de una meseta submarina. En el primer caso, las fuerzas tectónicas producen el elevamiento de una serie de estratos que se mantienen horizontales con respecto al entorno; en el segundo caso, los agentes externos (principalmente ríos) erosionan la parte de la superficie menos resistente a la erosión, creando la meseta; y en el último, la meseta proviene del emergimiento de una meseta volcánica. Las mesetas volcánicas se forman en el agua (ZONISIG, 2000).

Esta Unidad se encuentra principalmente en la región norte de Cintis, está constituida por mesetas fuertemente disectadas, pendientes entre 2 a 5% y una altitud entre 2.900 a 3.900 m.s.n.m. Con superficie que abarca aproximadamente 5.9 Km<sup>2</sup> en el departamento; La Unidad presenta suelos coluviales profundos formada por sedimentos sueltos del cuaternario, con vegetación cubierta por vegetación herbácea xeromórfica. Con suelos: Moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bien drenados y pedregosos. Esta unidad se encuentra dispersa en el municipio de San Lucas (ZONISIG, 2000).

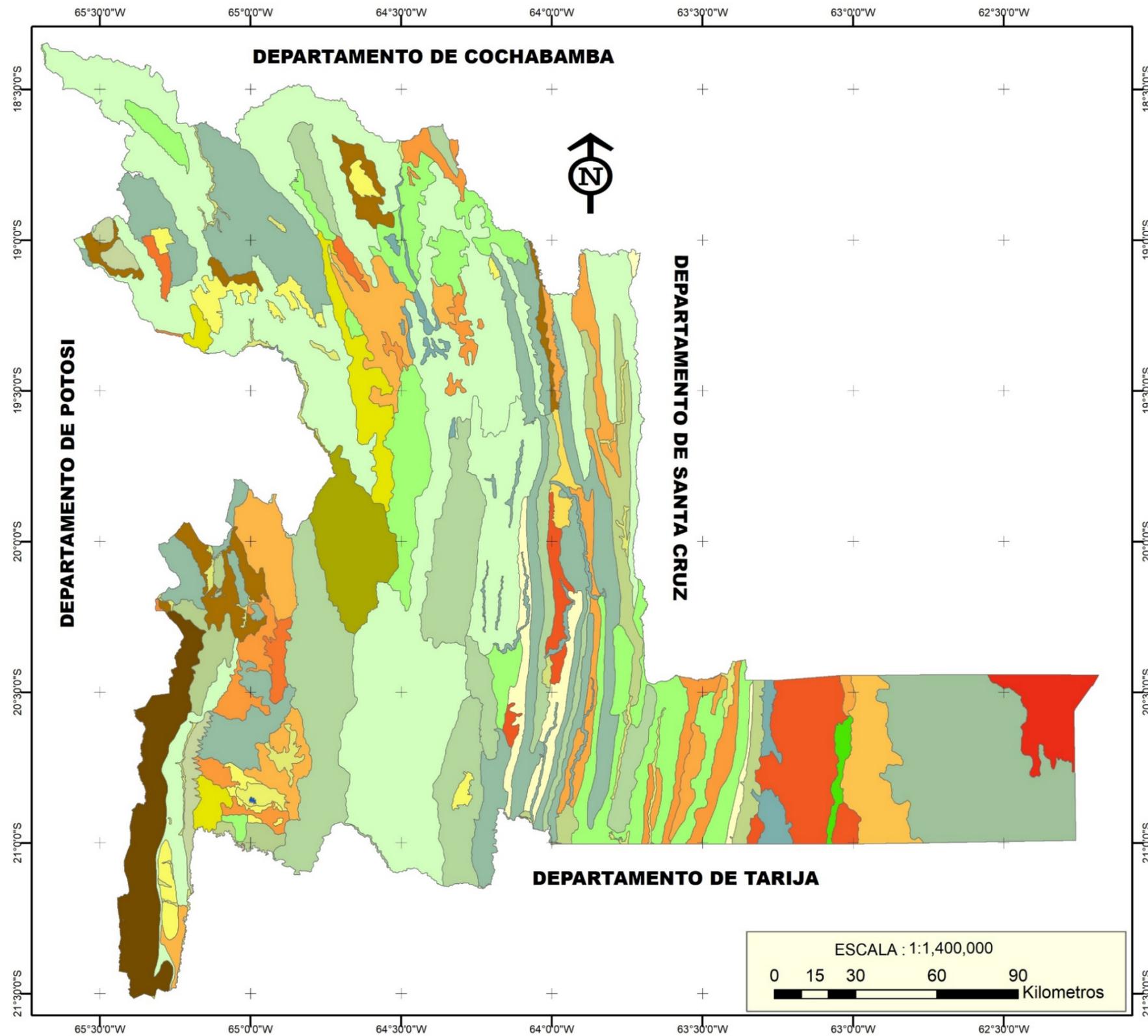
**CU) Cuesta.** Es una forma de relieve disimétrica resultado del allanamiento y posterior disección de una serie sedimentaria monoclinial concordante, conformada por un estrato de roca deleznable comprimido debajo de un banco de roca resistente, afectada por una débil pendiente (ZONISIG, 2000).

Sus características generales dependen de las condiciones morfo estructurales, cuyas variantes permiten definir los tipos de cuestas. Sin embargo, en general, presentan un frente y un reverso. El frente está compuesto por un talud excavado a expensas de un talud deleznable, generalmente de pendiente empinada que constituye una vertiente anaclinal (del griego ana=contrariamente a y Kleinnen= está inclinado) que da paso a una depresión ortoclinal (del griego orthos=recto y klinen= está inclinado); mientras que el reverso es una superficie estructural

plana e inclinada que coincide con el plano superior del estrato resistente con una pendiente de 0 a 10 ° es la vertiente cataclinal (del griego cata=conforme y kleinen=está inclinado). La cuesta culmina en una cornisa determinada por el estrato duro. La génesis de esta forma está ligada al intenso allanamiento miocénico que cepilla las estructuras sedimentarias plegadas, esta superficie sufre una intensa disección debido al trabajo que realizan los cursos durante períodos lluviosos del cuaternario (ZONISIG, 2000).

Esta Unidad se encuentra principalmente en la región central oriental y en la región sudoeste de la Cordillera oriental; está constituida por cuestas moderadamente disectadas, pendientes entre 5 a 15% y una altitud entre 1.900 a 3.900 m.s.n.m. La unidad abarca una superficie de 268,91 Km<sup>2</sup>. En este paisaje afloran sedimentos devónicos y suelos coluviales poco profundos formados por sedimentos sueltos del cuaternario. La Unidad está constituida por bosque denso siempre verde en la región central oriental y matorral deciduo, matorral ralo xeromórfico y vegetación herbácea graminoide intermedia en la región sur. Los suelos son superficiales a muy profundos, bien drenados con mucha pedregosidad.

Con limitaciones y riesgos: Erosión, pedregosidad. Fertilidad. Esta unidad se encuentra en los municipios de El Villar, Las carreras, Camargo, Villa Abecia (ZONISIG, 2000).



### FISIOGRÁFICO-GEOMORFOLÓGICO

---

#### LEYENDA TEMÁTICA

<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #0070C0; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Agua</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8B4513; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Colinas Altas, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FF8C00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Colinas Bajas, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FF4500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Colinas Bajas, con diseccion Moderada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #32CD32; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Colinas Bajas, con diseccion Muy Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Colinas Medias, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Colinas Medias, con diseccion Moderada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FF0000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Llanura Aluvial Eolica, con diseccion Ligera</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8FBC8F; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Llanura Aluvial, Antigua</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #9ACD32; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Llanura Aluvial, con diseccion Ligera</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Llanura Fluvio Lacustre, con diseccion Moderada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8FBC8F; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Llanura de Piedemonte con diseccion Ligera</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8FBC8F; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Llanuras de Piedemonte, con diseccion Ligera</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FF8C00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Llanuras de Piedemonte, con diseccion Moderada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8B4513; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Montanas Altas, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8B4513; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Montanas Altas, con diseccion Ligera</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8B4513; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Montanas Altas, con diseccion Moderada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Montanas Bajas, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Montanas Medias, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Montanas Medias, con diseccion Moderada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Planicies, con diseccion Ligera</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Serranias Altas, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FF8C00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Serranias Bajas, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FF8C00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Serranias Bajas, con diseccion Moderada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #32CD32; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Serranias Medias, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8FBC8F; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Serranias Medias, con diseccion Moderada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8FBC8F; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Serranias Altas, con diseccion Moderada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Serranias Bajas, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FF8C00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Serranias Bajas, con diseccion Moderada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Superficie de Erosion, con diseccion Ligera</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FF8C00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Superficie de erosion, con diseccion Fuerte</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Superficie de erosion, con diseccion Ligera</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Superficie de erosion, con diseccion Moderada</li> </ul>
---	---



**UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR**  
SEDE CENTRAL SUCRE-BOLIVIA

**PROGRAMA DE DIPLOMADO Y MAESTRIA EN**  
**"TELEDETECCION Y SISTEMAS DE INFORMACION**  
**GEOGRAFICA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE"**

Fuente de información: P.D.O.T.CH.(2013-2023) y Compilado en base a cartografía producida por el Instituto Geográfico Militar. Los límites trazados en el presente mapa no son oficiales, siendo su uso de carácter referencial.

Proyección: Universal Transversal Mercator Elipsoide de referencia: World Geodetic System 1984 - WGS84  
Universal Transversal de Mercator UTM, Zona 20 Sur.

### **3.1.3.2 Hidrografía del Departamento de Chuquisaca**

El sistema hidrográfico de Chuquisaca forma parte de dos grandes macro cuencas continentales, a saber, la cuenca del río Amazonas con una extensión de 21.278 Km<sup>2</sup> y la cuenca del río de la Plata con una extensión de 30.246 Km<sup>2</sup> aproximadamente en el Departamento (ZONISIG, 2000).

Tres de los ríos más importantes hacen de límites departamentales naturales; por el norte el Río Grande constituyente de la cuenca amazónica, que recibe aguas de los ríos San Pedro, Chico, Presto, Zudáñez, Tomina y Acero; por el Noroeste, el río Pilcomayu, constituyente de la Cuenca del Plata, que atraviesa territorio chuquisaqueño recibiendo a los ríos Ravelo, Cachimayu, Tarabuco-Icla, Orito Mayu, San José, Santa Elena, Chocaya, Añimbo, Ñacamiri e Ingre; por el Sudoeste el Río San Juan del Oro, que, al recibir caudales del Tumusla, forma el río Camblaya para desembocar en el Pilcomayu, con el nombre de Pilaya (ZONISIG, 2000).

El Río Parapetí que en territorio cruceño se insume en los bañados de Izozog, nace al Este de Villa Azurduy, y en su curso se une con los ríos San Antonio y Bañado, principalmente. Para su mejor comprensión se establece los siguientes cuadros 10 y 11 de cuencas del río de la plata y la cuenca del río Amazonas. Ver Mapa Hidrológico y de cuencas del departamento de Chuquisaca (ZONISIG, 2000).

### **3.1.3.3 Climatología del Departamento de Chuquisaca**

Debido a la variabilidad del clima emergente y los acontecimientos climáticos adversos cada vez más condicionantes que promueven desastres, amenazas y riesgos más constantes y de mayor intensidad, enmarcado en el cambio climático global, es perentorio hablar ahora del “recurso clima”, recurso que se considera estratégico y fundamental para el sistema productivo económico departamental, puesto que la ocurrencia de desastres naturales y condiciones climáticas anómalas, siempre han movilizado a las poblaciones en busca de mayor seguridad climática para sus inversiones económica productivas. Por ello, ahora se advierte la necesidad de conocer mucho más el clima a fin de pronosticar eventos climatológicos adversos, evaluar las vulnerabilidades y

determinar las opciones de intervención o adaptación frente a los cambios cada vez más evidentes.

En Chuquisaca, la densidad y cobertura de las estaciones climáticas, es baja y limitada en cuanto a los parámetros meteorológicos que se monitorean. Se ha advertido que tampoco existe continuidad del registro de datos, ya que en algunas de las estaciones han dejado de funcionar, razón por la que no se cuenta con series departamentales completas. Consecuentemente es fundamental incrementar la densidad de estaciones de registro, monitoreo y el número de parámetros, toda vez que ahora la tecnología lo permite a un costo accesible, para de esta forma entender más los fenómenos climáticos regionales que nos afectan e influyen en la cotidianidad poblacional. El Departamento de Chuquisaca está dominado por los efectos topográficos de la Cordillera de Los Andes que actúa como barrera a los vientos del Oeste, modificando la circulación general de los vientos en altura, impidiéndoles su ingreso, lo que ocasiona que se originen efectos termodinámicos con movimientos verticales de aire, ocasionando sistemas de baja presión al Este de la Cordillera Oriental.

En el departamento de Chuquisaca las limitaciones en cuanto a la información climática o meteorológica son similares en todo el departamento. La mala disponibilidad y distribución de las estaciones meteorológicas en el territorio generan datos inseguros, imprecisos, la discontinuidad del registro, las limitadas series y los escasos parámetros del clima que se registran, impiden la caracterización adecuada y confiable del comportamiento climático en el área de estudio.

Dentro del territorio chuquisaqueño existen diversos espacios con vacíos de cobertura de control climático, siendo los más evidentes los que corresponden a las zonas central, Este y Sudeste de Nor Cinti; Central y Este de Sur Cinti; Norte, Sudoeste, y extremo Este de Luis Calvo; Norte, Oeste y Sur de Azurduy y Norte de B. Boeto. La provincia con mayor densidad de cobertura es Oropeza con 17 estaciones y la de menor densidad Azurduy con 3 estaciones. La calidad y confiabilidad de la información a veces es objeto de dudas, debido al precario mantenimiento de las estaciones, a la falta de control y supervisión rutinarios y

también a las limitadas condiciones presupuestarias. Tampoco existe uniformidad en la continuidad en la serie de datos, ya que algunas de las estaciones fueron cerradas, otras fueron creadas e incluso algunas reabiertas, situación de donde deriva la discontinuidad de las series (ZONISIG, 2000).

### 3.1.3.4 Clasificación Climática

Uno de los criterios más ampliamente utilizado para delimitar zonas climáticas es el índice climático P/ETP, desarrollado por la FAO y la UNESCO en 1.977, tomando como base el índice de humedad propuesto por Thornthwaite (1.948), el método de Penman (1.948) y el procedimiento propuesto por Meigs (1.953).

**Tabla 3: Clasificación Climática**

<b>Índice de clasificación climática UNEP</b>	
<b>Zonas</b>	<b>Precip.m/Evap.Transp.0m</b>
Hiperáridas	<0.05
Áridas	0.05 a < 0.20
Semiáridas	0.20 a <0.50
Subhúmedas Secas	0.50 a <0.65
Subhúmedas Húmedas	0.65 a 1
Húmedas	>1

Fuente: UNEP, 1992

Este índice expresa la relación entre la precipitación anual promedio y la evapotranspiración potencial anual en un área determinada (UNEP, 1.992), y es empleado a continuación para clasificar climáticamente al departamento: Índice de clasificación =  $P_m/ET_{0m}$ . Dónde:  $P_m$  es la precipitación media anual y  $ET_{0m}$  la evapotranspiración anual media del período. La  $ET_0$  se calculó con el método de Penman, cuya ecuación usa registros meteorológicos estándar de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Periodo (1.970 – Mar/2.009).

En consecuencia, en Chuquisaca se presentan las siguientes zonas climáticas:

- **Clima Subhúmedo – Seco C1. Con un Índice Hídrico entre -20 a 0**

El Balance Hídrico de este tipo climático, indica que se tiene en general, de 1 a 2 meses de Excedencia como máximo y entre 6 a 7 meses de Déficit. Este tipo climático presenta vegetación xerofítica, matorral con hojas compuestas y apéndices espinosos, bastante cactus y algunos árboles emergentes. La anterior vegetación identifica un ambiente de relativa sequedad, con lluvias solo estivales y un invierno moderadamente seco. Este clima se presenta en todas las subregiones del departamento y en forma muy extendida (ZONISIG, 2000).

En la Región Chuquisaca Norte es el clima predominante, en las Regiones Chuquisaca centro y Sur, se presentan manchones importantes de este tipo climático. En Hernando Siles en cambio, solo se presenta en forma limitada hacia el Sur de la Subregión IV en proximidades al río Pilcomayu. En la Región V, provincia Luis Calvo, vuelve a manifestarse en forma notoria en sectores marcados tanto en la parte Norte, Centro y Sur de esta provincia, manifestándose en forma extendida en el sector de transición entre las últimas estribaciones del Aguarañe y la Llanura Chaqueña (ZONISIG, 2000).

- **Clima Semiárido – D. Con un Índice Hídrico entre -40 y -20**

Los Balances Hídricos indican que prácticamente no existe Excedente en este tipo climático, cuando más, se presenta algún mes con precipitación representativa de Reposición Hídrica. Mientras tanto se tienen desde 6 o 7 o hasta los 12 meses del año con Déficit Hídrico. Es muy marcada la sequedad del ambiente en este tipo climático, con muy bajos porcentajes de Humedad y ninguna Excedencia de agua (ZONISIG, 2000).

El Déficit Hídrico es total; los inviernos son casi completamente secos y las lluvias de verano limitadas. En este tipo climático las características vegetativas son muy similares a las del clima Subhúmedo seco, aunque con mayor sequedad en su ambiente. Existe predominio absoluto de las especies xerofíticas, con apéndices espinosos y clara presencia de especies cactáceas. El tipo de bosque, que es xerofítico, es denso, mayormente caducifolio, con clara presencia de matorral bajo y escasos árboles emergentes (ZONISIG, 2000).

Hay presencia de cactáceas, bromélias, además de diversidad de pastos. Se presenta en la parte Sur y Sudeste de Chuquisaca Norte, todo el cañón de Cinti, Culpina y márgenes del río Pilaya en Chuquisaca Sur, en tanto que en la provincia Luis Calvo aparece en la parte Sur en diferentes lugares (Igüembe, Boycobo, Huacaya, Cuevo, Etc.) y en forma muy notoria en toda la Llanura Chaqueña (ZONISIG, 2000).

- **Clima Árido – E. Con un Índice Hídrico de -40 a – 60**

En general las características de este tipo climático son muy semejantes a las del clima Semiárido, pero con mayor acentuación en las condiciones de sequedad, baja humedad y Déficit Hídrico. Lo mismo se puede decir de las características de la vegetación que predominan en el mismo (ZONISIG, 2000).

El clima Árido se presenta solamente en dos sectores. En las proximidades de las riberas del río Camblaya y área de influencia del sector de El Chilcar y en el extremo límite de la zona de la Llanura Chaqueña, ya en proximidades del límite con la república del Paraguay. Pero también se presentan, aunque en áreas más restringidas los climas mayormente húmedos (ZONISIG, 2000).

- **Clima Subhúmedo – Húmedo C2. Con un Índice Hídrico entre 0 a 20**

Sus Balances Hídricos presentan en general entre 2 a 4 meses de Excedencia y entre 3 a 5 meses de Déficit Hídrico. El ambiente de sequedad es mayor que en los climas más húmedos, presentándose sectores de humedad mayor en el fondo de los valles. En este clima el bosque es muy ralo y solo se presentan ocasionalmente manchones poco frecuentes de bosque denso, normalmente en forma de microclimas. Se identifican algunas especies xerofíticas, pero pocos cactus columnares, también hay matorral pero muy poco espinoso (ZONISIG, 2000).

Este tipo climático está muy difundido en el departamento, presentándose en forma muy evidente en las Regiones Chuquisaca Centro y Chuquisaca Sur; también en el Subandino en la provincia Hernando Siles, en un gran sector al Sudoeste de la misma y en la provincia Luis Calvo, tanto en el sector Norte, como en el Sur, sobre la serranía del Aguaragüe, donde se expone en forma muy

definida. En la Región Chuquisaca Norte, se presenta en forma mucho más constreñida y limitada (ZONISIG, 2000).

- **Clima Húmedo B1. Con un Índice Hídrico entre 20 y 40**

Las condiciones generales son las de los típicos climas húmedos, especialmente en el piso de drenaje de valles muy encajonados, donde se presenta una acentuada humedad relativa, la cual acelera en forma notoria el proceso de meteorización de los suelos y las rocas con un claro fraccionamiento y descomposición de sus partes. Sin embargo, en las superficies de las serranías, se presenta también algo de bosque ralo, con manchones de bosque denso, asociados a arbustos y gramíneas (ZONISIG, 2000).

Se presenta en un amplio sector de Chuquisaca Sur hacia el Este de la Cordillera Oriental y en el Subandino, en la provincia Luis Calvo, en los sectores Norte de la misma y ya en proximidades del sector del Río Grande y en cercanías de Cumandayti (ZONISIG, 2000).

- **Climas Húmedos B4 – B3 y B2. Con Índices Hídricos variando entre 40 y 100**

Los Balances Hídricos para estos tipos climáticos, determinan periodos de Excedencia de hasta 5 o 6 meses o más y periodos de Déficit Hídrico menores o subordinados (ZONISIG, 2000).

Estos climas presentan humedad ambiental alta, con notoria presencia de Epifitas (musgos y helechos), con bosques muy densos, perennifolios y con abundante regeneración natural. Es característico de este ambiente, un piso de mirtáceas dados por bosques de laurel y nogal; también se presentan pino de monte, aliso, sahuínto, arrayán y otros, todos los cuales constituyen especies de transición más húmeda hacia los bosques más secos (ZONISIG, 2000).

Se presentan climas con estas características, en determinados sectores de la Cordillera Oriental, hacia el este de la misma, en las Regiones Chuquisaca Centro y en Chuquisaca Sud. También en forma evidente en el sector de transición entre Chuquisaca Centro y la provincia Hernando Siles, como también en la transición entre Chuquisaca Centro y Luis Calvo, especialmente al norte de

esta última provincia, definiéndose claramente en varios sectores del Subandino (ZONISIG, 2000).

En la región de la Cordillera Oriental de Chuquisaca, la concentración de las lluvias estivales es más marcada y con casi total ausencia en invierno. La temperatura varía según la altura; hay elevada frecuencia de heladas, pero con alta temperatura durante el día debido a la gran recepción de energía solar. En las alturas existe una zona de precipitación relativamente alta de tipo orográfico, en las serranías al Noroeste del departamento, donde las precipitaciones superan los 1.000 mm anuales (Cordillera de Mandinga – Los Sombreros).

En la Cordillera Oriental debido a la estacionalidad del comportamiento climático, existen menores presiones en verano que en invierno y diferencias marcadas entre la precipitación de verano (concentración > 90%) respecto al invierno.

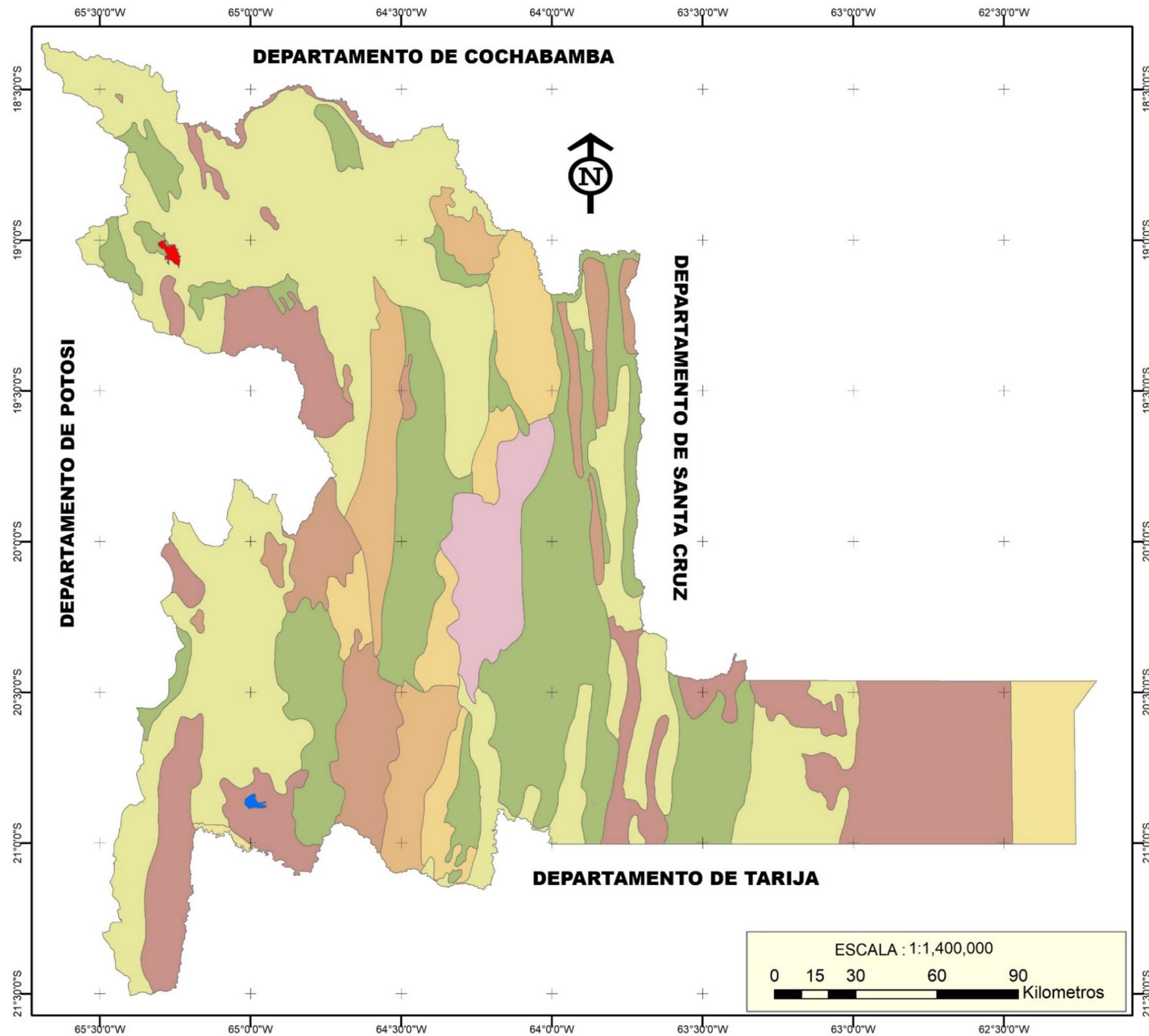
El vapor de agua necesario para originar las lluvias en la cordillera proviene del Océano Atlántico y las selvas tropicales de Sudamérica. Las trayectorias del flujo (aire) húmedo llegan al departamento desde el Norte, Noreste, Este y Sudeste. Este transporte tiene importantes efectos termodinámicos en las masas de aire y el tiempo asociado.

Región del Subandino – zona de transición, con lluvias suficientes, balance hídrico positivo. Verano cálido. Invierno templado (con días de bajas temperaturas: “surazos”). Las precipitaciones con valores inferiores a 100 mm por mes entre mayo y octubre; y mayores a 100 mm, entre los meses de noviembre y abril. Las máximas precipitaciones pluviales en Chuquisaca se producen en los meses de enero y febrero (ZONISIG, 2000).

La concentración estival de las lluvias se hace más evidente a medida que se avanza hacia el Oeste (cordillera oriental) con disminución de los valores absolutos (temperatura, precipitación y humedad relativa). La temperatura de verano se hace más alta y aumenta la amplitud diaria y estacional de manera que se producen heladas, algunas muy intensas en las noches claras de invierno (ZONISIG, 2000).

En el departamento de Chuquisaca, muchas veces y mayormente en los últimos años debido al fenómeno de “El Niño” y “La Niña” , se presentan desfases y

variaciones climáticas cada vez con mayor frecuencia e intensidad, las sequías se han prolongado durante la época de lluvias o viceversa, fenómenos climáticos que perjudican e inciden negativamente y severamente al desarrollo de la agricultura y ganadería, en la agro biodiversidad y los ecosistemas en relación a su limitada producción y regeneración natural, sumado a esto la presión que ejercen la acción antrópica sobre los recursos naturales del departamento. Originando como efecto de los mismos la migración o desplazamiento de la población en busca de nuevos espacios territoriales de condiciones favorables para la agricultura y que permita establecer o residir definitivamente; Acción que va en desmedro de la dinámica y la densidad poblacional del departamento. Son varios los eventos o fenómenos climáticos que afectan a las actividades agropecuarias en el departamento. Entre ellos los más significativos por su impacto y desastres que provocan son, en orden de importancia las siguientes (ZONISIG, 2000).



**CLIMAS**

**LEYENDA TEMÁTICA**

<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: red; margin-right: 5px;"></span> Area Urbana</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8B4513; margin-right: 5px;"></span> B1-HUMEDO, ENTRE 20 - 40</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #D2691E; margin-right: 5px;"></span> B2-HUMEDO, ENTRE 40 A 60</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; margin-right: 5px;"></span> B3-HUMEDO, ENTRE 60 A 80</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FF69B4; margin-right: 5px;"></span> B4-HUMEDO, ENTRE 80 A 100</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFFF00; margin-right: 5px;"></span> C1-SUBHUMEDO, ENTRE -20 A 0</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; margin-right: 5px;"></span> C2-HUMEDO, ENTRE 0 A 20</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #0000FF; margin-right: 5px;"></span> Cuerpo de Agua</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #A52A2A; margin-right: 5px;"></span> D-SEMIÁRIDO, ENTRE -40 A -20</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; margin-right: 5px;"></span> E-ÁRIDO, ENTRE -60 A -40</li> </ul>
--	--

**UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR**  
SEDE CENTRAL SUCRE-BOLIVIA

**PROGRAMA DE DIPLOMADO Y MAESTRIA EN  
"TELEDETECCION Y SISTEMAS DE INFORMACION  
GEOGRAFICA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE"**

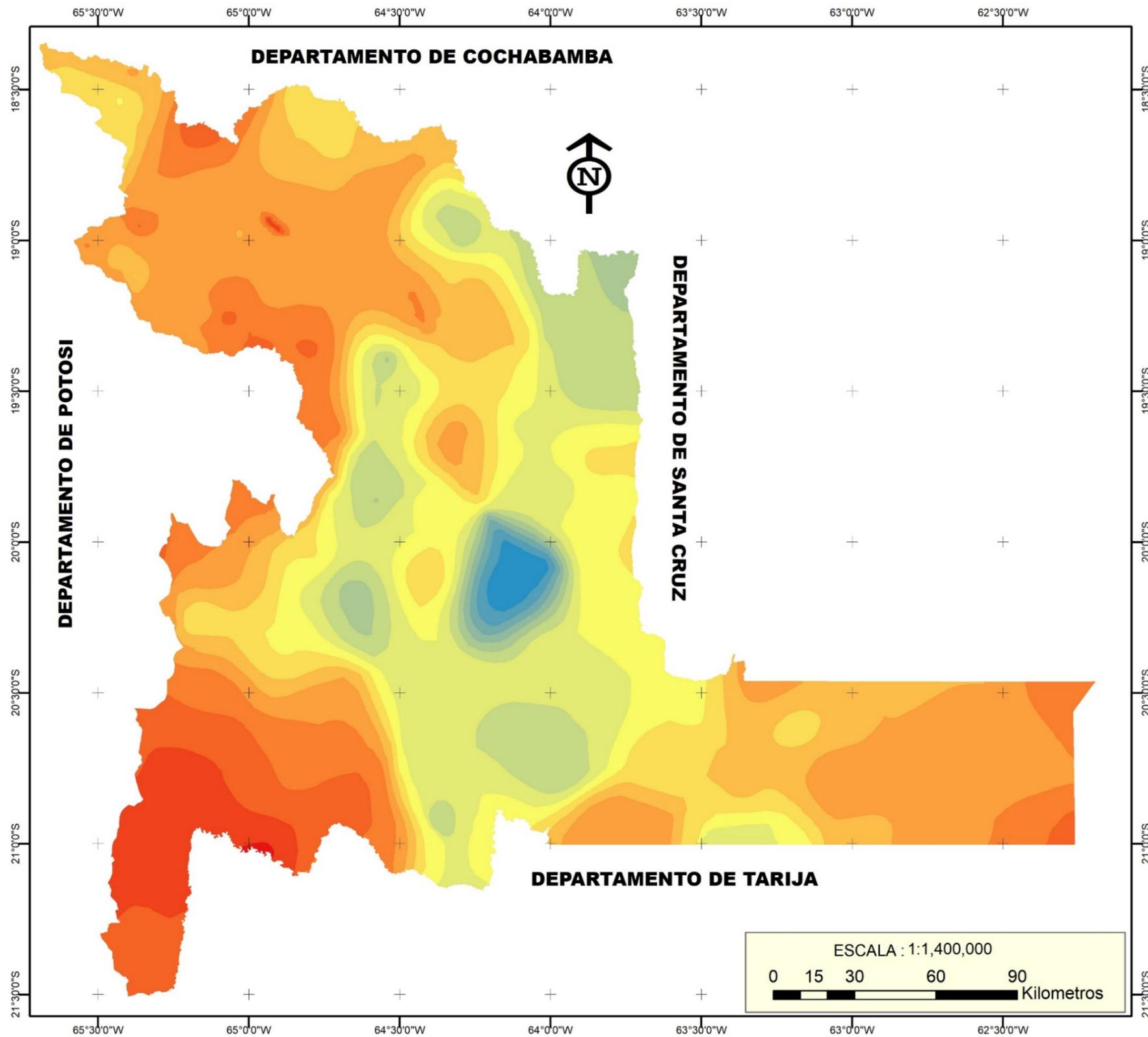
Fuente de información: P.D.O.T.CH.(2013-2023) y Compilado en base a cartografía producida por el Instituto Geográfico Militar.  
Los límites trazados en el presente mapa no son oficiales, siendo su uso de carácter referencial.

Proyección: Universal Transversal Mercator Elipsoide de eferencia:World Geodetic System 1984 – WGS84  
Universal Transversal de Mercator UTM, Zona 20 Sur.

### **3.1.3.5 Precipitación Pluvial**

Los promedios anuales de precipitación son menores en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, especialmente al Sudoeste, donde la estación El Chilcar presenta valores de 183 mm y en el extremo Este del Chaco chuquisaqueño la precipitación no sobrepasa los 400 m.m. anuales. Los valores mayores se encuentran en las serranías del Subandino (Estación Despensas con 1.582 mm – provincia Hernando Siles) y en la zona Andina, en los contrafuertes de la Serranía de Sombreros y Mandinga (Estación Cruz Khasa con unos 1.100 mm) donde se detienen las masas húmedas provenientes de la Amazonía (ZONISIG, 2000).

La distribución estacional de las lluvias, se caracteriza por presentar dos períodos marcados: el de precipitaciones, de noviembre a marzo, y el de estiaje o seco, de abril a octubre. En el período de estiaje se producen lluvias aisladas que a veces duran varios días, provenientes de frentes fríos de masas húmedas cíclicas originadas en la Antártica o Patagonia, conocidas como “Surazos” (ZONISIG, 2000).



**PRECIPITACION PLUVIAL**

**LEYENDA TEMÁTICA**

1501-1600	701-800
1401-1500	601-700
1301-1400	501-600
1201-1300	401-500
1101-1200	301-400
1001-1100	201-300
901-1000	180-200
801-900	

  
**UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR**  
 SEDE CENTRAL SUCRE-BOLIVIA

**PROGRAMA DE DIPLOMADO Y MAESTRIA EN**  
**"TELEDETECCION Y SISTEMAS DE INFORMACION**  
**GEOGRAFICA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE"**

Fuente de información: P.D.O.T.CH.(2013-2023) y Compilado en base a cartografía producida por el Instituto Geográfico Militar. Los límites trazados en el presente mapa no son oficiales, siendo su uso de carácter referencial.

Proyección: Universal Transversal Mercator Elipsoide de referencia: World Geodetic System 1984 - WGS84  
 Universal Transversal de Mercator UTM, Zona 20 Sur.

### ***3.1.3.6 Situación Infraestructura para Riego en el Contexto Departamental***

El departamento cuenta con recursos hídricos importantes, pero el problema está relacionado al escaso avance en el aprovechamiento de estos recursos con fines de riego, generalmente las acciones desplegadas en este rubro fueron para solucionar problemas de emergencia, sin una proyección al futuro y ligadas a la estrategia de riego del departamento, menos dirigidas hacia potenciales productivos en la región.

En los sistemas de riego hasta ahora ejecutados, los problemas son comunes, debido a que los proyectos fueron concebidos solamente con un enfoque netamente de construcción de obras, sin considerar la gestión de riego (organización para la operación, administración del agua y el mantenimiento), y en cuanto a la organización esta se concretó solamente a la conformación de los comités de obra, cuyas funciones terminaron juntamente con la construcción de obras. A consecuencia de esto, actualmente se observan infraestructuras en franco proceso de deterioro, sin funcionamiento, comunidades divididas o el descrédito de las instituciones dedicadas al riego.

Así en los últimos años se han mejorado y tecnificado numerosos sistemas tradicionales de riego en los diferentes municipios del departamento, empero si bien se ha mejorado la eficiencia en la captación, conducción y distribución del agua de riego, aún falta mucho que hacer para mejorar la eficiencia de la aplicación parcelaria y el fortalecimiento de las organizaciones de regantes.

Las actividades agrícolas desarrolladas a secano son cada vez más vulnerables a la temporalidad y disponibilidad de las precipitaciones pluviales, lo cual restringe los cultivos y solo a reducidas parcelas que confieren un poco diversificada e insuficiente dieta familiar. Si bien el territorio del departamento cuenta con recursos naturales muy importantes y dentro de ellos el agua, el mismo no tiene aún niveles de contaminación que podría ser muy bien aprovechado para la producción agropecuaria; sin embargo, muchos de los afluentes donde es posible disponer de agua de manera permanente, no pueden ser utilizados debido principalmente a los desniveles existentes entre el afluente

y la parcela agrícola, es decir, los ríos están por debajo de las parcelas productivas.

En el departamento de Chuquisaca existen 274.697,41 has de tierras agrícolas, en cambio hay 53.944,37 has que solamente disponen de mayor o menor medida de agua para riego.

**Tabla 4: Superficie Bajo Riego y a Secano en el Departamento**

<b>Región</b>	<b>Superficie Bajo Riego (ha)</b>	<b>Superficie a Secano (ha)</b>	<b>Total(ha)</b>
Chuquisaca Norte	25.633,06	121.609,09	147.242,15
Chuquisaca Centro	3.912,04	27.046,76	30.958,80
Chuquisaca Cintis	24.067,27	31.658,88	55.726,15
Chaco Chuquisaca	332,00	40.438,31	40.770,31
<b>Chuquisaca</b>	<b>53.944,37</b>	<b>220.753,04</b>	<b>274.697,41</b>

Fuente: Elaboración propia COBODES y DOTyL, en base a PDM's. 2.013

A nivel de regiones, se destaca la de Chuquisaca Norte porque tiene mayor superficie bajo riego y en porcentaje con 25.633,06 ha, le sigue la región de Chuquisaca Cintis con 24.067,27 ha, luego está Chuquisaca Centro con 3.912,04 ha y finalmente está el Chaco Chuquisaqueño con apenas 332 ha como se demuestra en el cuadro y gráfico correspondiente.

Tomando en cuenta se observa que la superficie bajo riego en las Regiones Chuquisaca Norte y Chuquisaca Cintis son las que poseen las mayores superficies bajo, en cambio las Regiones Chuquisaca Centro y Chaco Chuquisaqueño son las menores superficies, de la misma forma las tierras agrícolas a secano, la Región Chuquisaca Norte es la de mayor superficie, le sigue la Región Chuquisaca Centro, las de menor superficie son las de Chuquisaca Centro y Chaco chuquisaqueño.

Analizando, el siguiente gráfico, los porcentajes de las superficies bajo riego y a secano se puede indicar que la Región Chuquisaca Norte es la de mayor

porcentaje con 47,52%, le sigue en orden la Región de Chuquisaca Cintis con 44, 61% y le sigue la Región Chuquisaca Centro con 7,25% y finalmente la Región del Chaco Chuquisaqueño que tiene 0,62%.

Durante la duración del Programa Nacional de Riego ha implementado 158 proyectos de riego en siete de los nueve departamentos de Bolivia, este esfuerzo ha significado una importante inversión de parte del Banco Interamericano de Desarrollo, la contribución de regantes y los gobiernos municipales. Esta inversión ha sentado las bases para la producción bajo riego de más de 14.000 has. En diferentes regiones del país. Estos sistemas se encuentran funcionando en manos de 12.500 familias de regantes, quienes operan y mantienen la infraestructura construida.

En Chuquisaca se construyeron 39 proyectos beneficiando 2.300 familias, el agua embalsada irrigara a más de 1.531 has.

### **3.1.3.7 Condiciones socioeconómicas**

De acuerdo a estimaciones oficiales, el departamento de Chuquisaca cuenta con una población de 647 mil habitantes a 2020, correspondiente al 5.5% de la población total de Bolivia, constituyéndose así en el quinto departamento por población a nivel nacional, luego de Santa Cruz, La Paz, Cochabamba y Potosí (ZONISIG, 2000).

Según el último Censo Nacional de Población y Vivienda de 2012, el departamento de Chuquisaca registra la más baja tasa media de crecimiento poblacional de 0.8% anual inferior a la tasa media nacional que se sitúa en 1.7%, debido a que la mayor parte de los municipios chuquisaqueños registran tasas negativas de variación poblacional intercensal (ZONISIG, 2000).

A nivel nacional, el generalizado fenómeno de la migración campo ciudad determinó que, a mediados de la década de los ochenta, Bolivia se convierta en un país con una distribución poblacional predominantemente urbana. Sin embargo, según el último Censo Nacional de Población y Vivienda de 2012, el departamento de Chuquisaca continúa caracterizado como departamento rural cuando el 51.3% de su población se sitúa en el área rural, después de Potosí

(59.4%) y Pando (51.3%), como departamentos preeminentemente rurales (ZONISIG, 2000).

Chuquisaca, el porcentaje de pobreza revela una situación muy preocupante, pues el 2001 la proporción de pobres extremos era de 61,5%, cifra notablemente superior al promedio nacional ese año. En términos absolutos, se estima que para el 2001 el departamento de Chuquisaca tenía más de 345.000 personas en condición de extrema pobreza (DAPRO, 2021).

Los datos de extrema pobreza nacionales y de Chuquisaca son mucho más altos que el promedio de Latinoamérica (12,6%), lo que muestra un importante rezago si se compara a Bolivia con otros países de la región.

La situación al interior del departamento de Chuquisaca, revela una alta disparidad entre municipios. Mientras Sucre, Monteagudo, Macharetí, Camargo y Las Carreras presentan porcentajes de extrema pobreza menores a 30%; municipios como Presto, Poroma, Tomina, Azurduy, Tarvita e Icla muestran incidencias de extrema pobreza de más de 90% (PNUD, Desarrollo Humano en el Departamento de Chuquisaca, 2010).

### **Conclusiones del marco contextual**

El departamento de Chuquisaca es uno de los departamentos más pobres de Bolivia y de los más afectados por el fenómeno de la sequía, afectando su producción, siendo por lo tanto importante caracterizar de mejor manera la distribución de la sequía en el departamento de Chuquisaca.

## CAPÍTULO IV

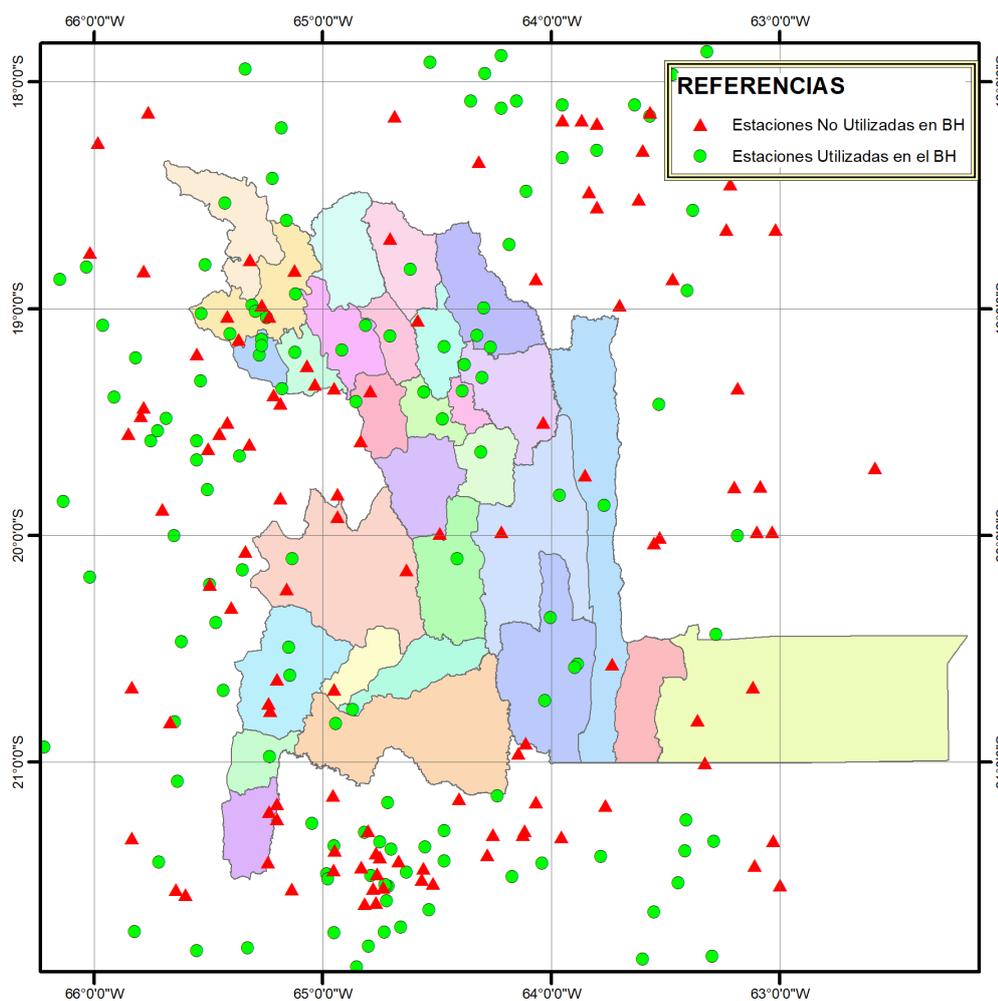
### 4.1 . RESULTADOS Y DISCUSIONES DE LA INVESTIGACION

#### 4.1.1 Recopilación de información y Selección de estaciones

Es importante aclarar que para la generación y calibración de la Rejilla del GMET se trabajó con 384 estaciones que cubren todo Bolivia. Pero para un análisis de micro regiones se analizaron con estaciones no tomadas en cuenta en el mencionado trabajo.

Para el análisis de la precipitación se han recopilado 111 estaciones, con datos mayores a 10 años que no fueron tomados en cuenta en el Balance Hídrico de Bolivia. Se puede observar que existen estaciones con registros desde los años 1942 al 2020. De las 111 estaciones, se seleccionaron 2 categorías:

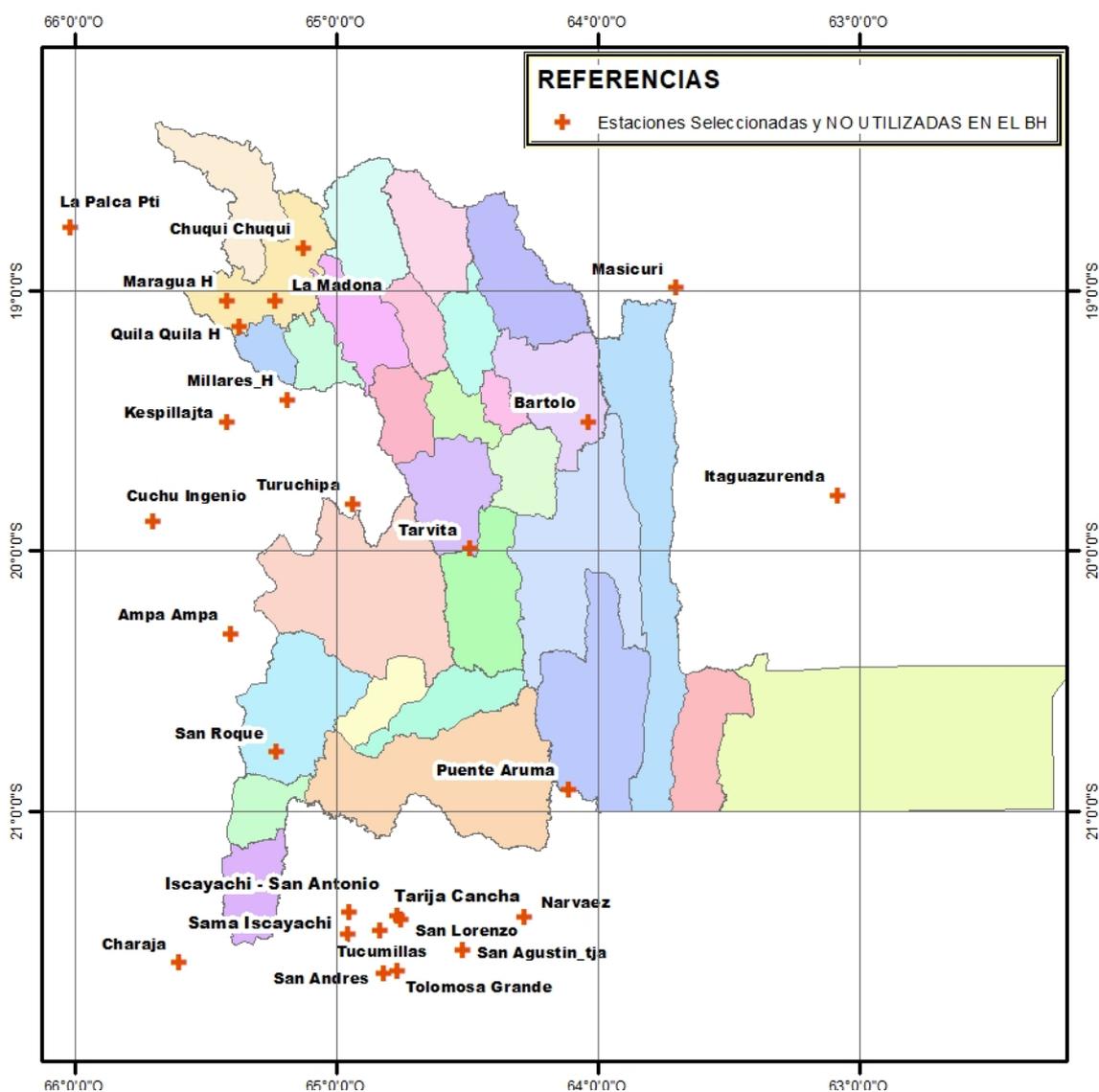
**Tabla 5: Estaciones del Balance Hídrico y no Usadas en el BH**



- Categoría 1: Estaciones que tengan  $\geq 20$  años de datos y que tengan  $> 70\%$  de datos registrados.
- Categoría 2: Estaciones que tengan 10 a 20 años de datos y que tengan  $> 80\%$  de datos registrados.

Además, se eliminaron estaciones con menores años de registros. Quedando 26 estaciones para hacer la validación de datos de precipitación

**Ilustración 4: Estaciones seleccionadas**



Las estaciones seleccionadas tienen la siguiente información:

**Tabla 6: Estaciones Seleccionadas**

Código	Estación	Departamento	Año ini	Año fin	Años Registro	% Datos	Catego 1	Catego 2
1004	Bartolo	Chuquisaca	1980	1992	13	90.2	NO	SI
1022	La Madona	Chuquisaca	1980	1992	13	85.6	NO	SI
1028	Maragua H	Chuquisaca	1980	1993	14	93.4	NO	SI
1071	Quila Quila H	Chuquisaca	1980	1993	14	92.1	NO	SI
5041	Cuchu Ingenio	Potosí	1980	1993	14	93.5	NO	SI
5073	Millares_H	Potosí	1980	1994	15	90.1	NO	SI
5075	Ampa Ampa	Potosí	1980	1993	14	87.5	NO	SI
5078	Charaja	Potosí	1980	1993	14	87.5	NO	SI
5080	Kespillajta	Potosí	1980	1992	13	94.9	NO	SI
5081	La Palca Pti	Potosí	1980	1993	14	80.0	NO	SI
6098	Tolomosa Grande	Tarija	1980	1993	14	82.2	NO	SI
6106	Tarija Cancha	Tarija	1980	1991	12	83.3	NO	SI
6110	San Lorenzo	Tarija	1980	1993	14	95.2	NO	SI
6111	San Agustín_tja	Tarija	1980	1992	13	92.3	NO	SI
6112	Iscayachi - San Antonio	Tarija	1980	1994	15	92.9	NO	SI
6119	Sama Iscayachi	Tarija	1980	1993	14	92.8	NO	SI
6179	Puente Aruma	Tarija	2005	2016	12	84.4	NO	SI
7013	Masicuri	Santa Cruz	1980	1997	18	81.9	NO	SI
7055	Itaguazurenda	Santa Cruz	1980	1993	14	86.4	NO	SI
1012	Chuqui Chuqui	Chuquisaca	1980	2016	37	97.2	SI	NO
1047	San Roque	Chuquisaca	1980	1999	20	81.0	SI	NO
1054	Tarvita	Chuquisaca	1980	2008	29	81.3	SI	NO
5047	Turuchipa	Potosí	1980	2016	37	93.5	SI	NO
6018	Narvaez	Tarija	1980	2016	37	97.9	SI	NO
6028	San Andres	Tarija	1980	2016	37	97.8	SI	NO
6034	Tucumillas	Tarija	1980	2016	37	96.6	SI	NO

Fuente: Elaboración Propia

Trabajos realizados en el análisis de la sequía y otros riesgos fueron generados con datos raster directamente de satélite o de puntos específicos donde se tienen datos climáticos de estaciones.

#### **4.1.2 Pruebas para verificar la calidad de la información**

Constituye el paso siguiente al proceso de selección preliminar de estaciones. Los errores en los datos se atribuyen a los instrumentos, el observador, la transmisión de los datos y su transferencia a la base de datos. La verificación se basa en las siguientes pruebas:

- Prueba de formato. Verifica la presencia de datos repetidos, datos en blanco, error en la coma decimal, confusión en el nombre de la estación o la variable.
- Prueba de ausencia de datos. Verifica y analiza la ausencia de datos por periodos extensos.
- Prueba de coherencia espacial. Verifica que los registros entre estaciones vecinas sean congruentes. La coherencia se verifica en la horizontal y/o en la vertical. Por ejemplo, en los registros de precipitación se espera coherencia en la horizontal, es decir, un comportamiento similar entre estaciones ubicadas en sitios separados a una distancia máxima aceptable.
- Prueba de tolerancia (prueba de rango fijo). Se verificará límites superiores o inferiores, absolutos o referidos a parámetros estadísticos, para un factor climatológico (MMyA, 2016).

#### **4.1.3 Análisis de homogeneidad y rellenado de datos faltantes y consistencia a las series de precipitación**

Para tener una información con calidad de datos, que a veces tienen errores por medición, el personal que pasa los datos, etc. Es de mucha importancia realizar la homogenización y rellenado de datos, en este caso con la Herramienta CLIMATOL de R (ver Anexo 1).

En trabajos similares para la homogeneidad y rellenos como en el caso del GMET fueron trabajados manualmente con apoyo de HYDRA ACCES.

Para usar los datos de las estaciones y poder correr en el programa se introdujo en una hoja Excel la información de las estaciones con el siguiente formato:

**Tabla 7: Formato Ingreso de Datos de Estaciones, CLIMATOL**

X	Y	Z	COD	EST
-65.4000	-20.3167	2957	X5075	Ampa Ampa
-64.0333	-19.5000	1688	X1004	Bartolo
-65.6000	-21.5833	2804	X5078	Charaja
-65.1225	-18.8311	1791	X1012	Chuqui Chuqui
-65.7000	-19.8833	3765	X5041	Cuchu Ingenio
-64.9469	-21.3886	3370	X6112	Iscayachi - San Antonio

Y los datos de precipitaciones en otra hoja de todas las estaciones con el siguiente formato:

**Tabla 8: Formato Ingreso de Datos de Precipitación, CLIMATOL**

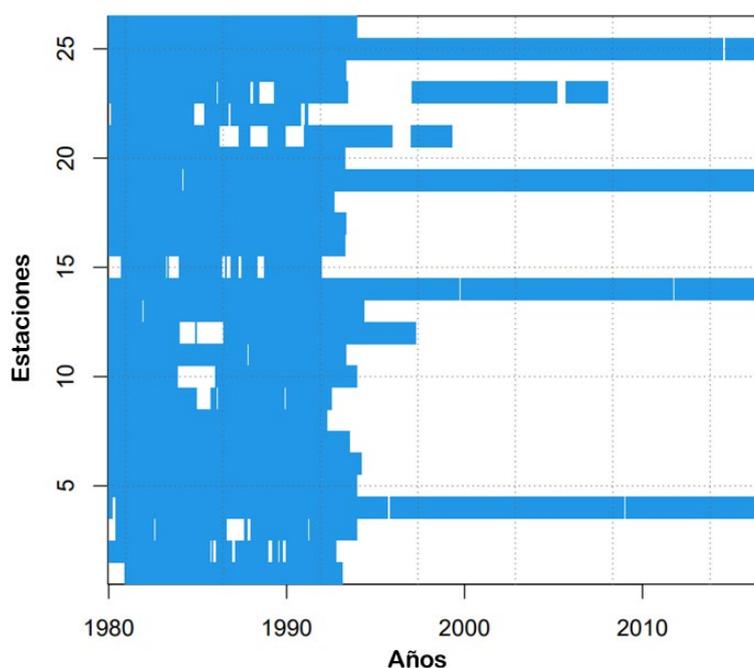
X1022	X5081	X1028	X7013	X5073	X6018	X6179	X1071
48.2	56.6	69.5	377.5	113.0	168.9	NA	57.9
55.0	49.9	19.5	147.5	55.0	245.7	NA	42.9
141.3	75.1	112.6	250.0	90.0	318.4	NA	179.8
20.3	0.0	20.1	53.7	34.0	42.2	NA	20.2
0.3	0.0	1.6	31.5	0.0	5.7	NA	2.5
5.0	0.0	3.4	71.3	5.0	11.0	NA	2.3
16.4	0.0	8.1	30.0	5.0	0.6	NA	4.8
59.4	32.5	54.6	122.5	58.0	17.9	NA	65.5
29.0	0.0	27.3	12.3	10.0	1.5	NA	17.5
32.2	34.7	58.4	35.8	141.0	107.5	25.5	79.7
21.8	9.0	28.7	96.6	180.0	146.4	72.6	22.8
55.4	14.8	87.4	207.2	76.0	110.5	101.8	41.5
86.1	87.9	165.6	522.5	214.0	404.4	192.9	102.7
135.7	43.3	197.7	637.3	115.0	211.5	134.3	233.0
110.8	13.6	117.4	398.5	88.0	199.0	143.7	138.4
20.6	6.0	34.8	245.0	76.0	199.6	107.0	25.7
0.9	0.0	1.2	88.2	0.0	27.3	5.7	18.3

Lo primero será analizar los datos anómalos con CLIMATOL, si reporta datos anómalos se deberá verificar con otras fuentes si existieron exceso de lluvia o deficiencia de lluvia para corregir y volver a hacer corre con datos validados.

El análisis en CLIMATOL de los datos de precipitación, se realizó con la normalización de datos por proporciones, que se aconseja para la precipitación que es más sesgada a la derecha y con valores no menores de 0.

Con esta primera corrida el Programa nos brinda información en PDF, como la disponibilidad de información de precipitación por estación desde 1980 al 2016.

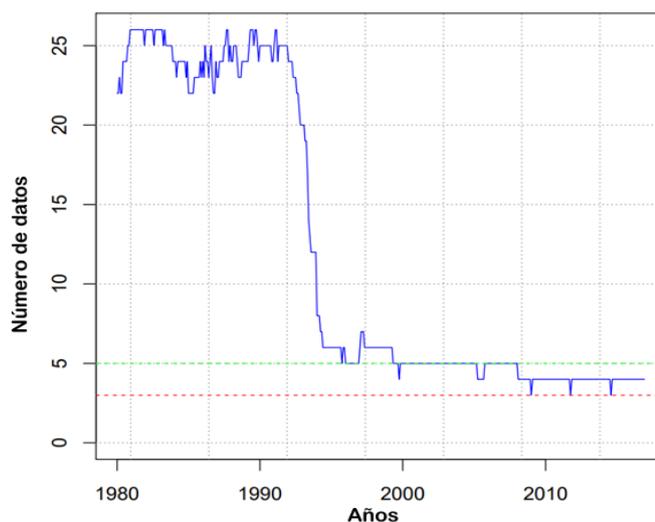
**Ilustración 5: Datos de precipitación habilitados por estación**



En la figura anterior podemos ver la disponibilidad de datos de precipitación de color azul y blanco datos sin información.

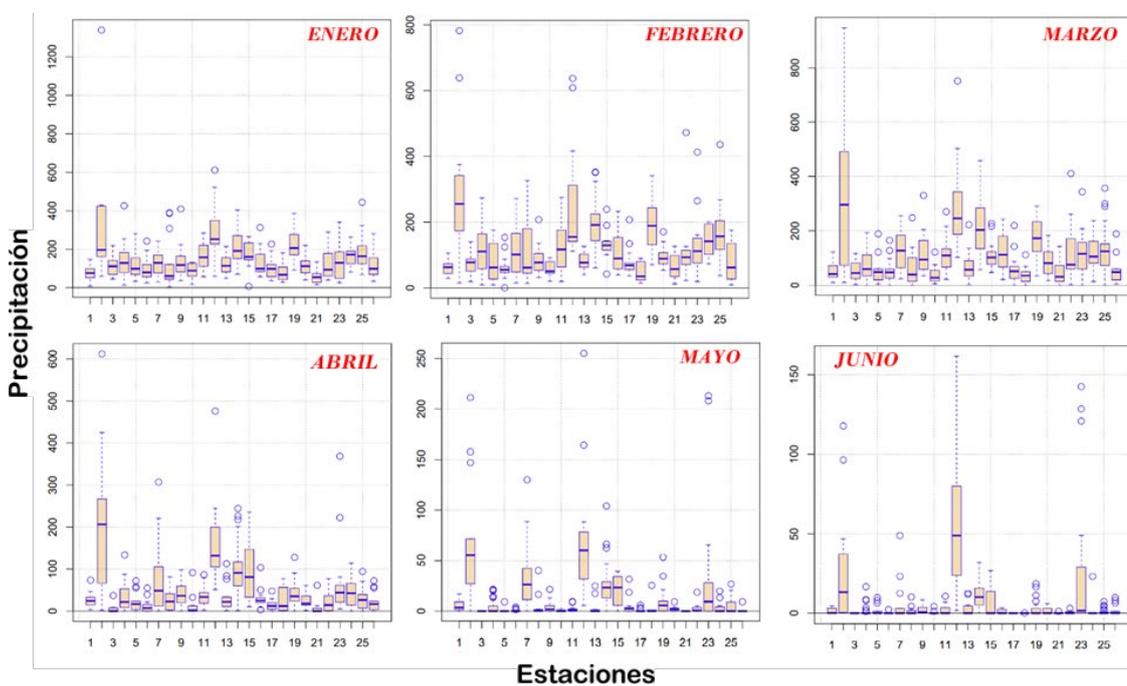
También nos brinda un análisis de la disponibilidad de información de precipitación desde 1980 al 2016, donde podemos ver que se tenía mayor disponibilidad de información hasta el año 1994 y luego va bajando la disponibilidad de esta información climática, específicamente precipitaciones.

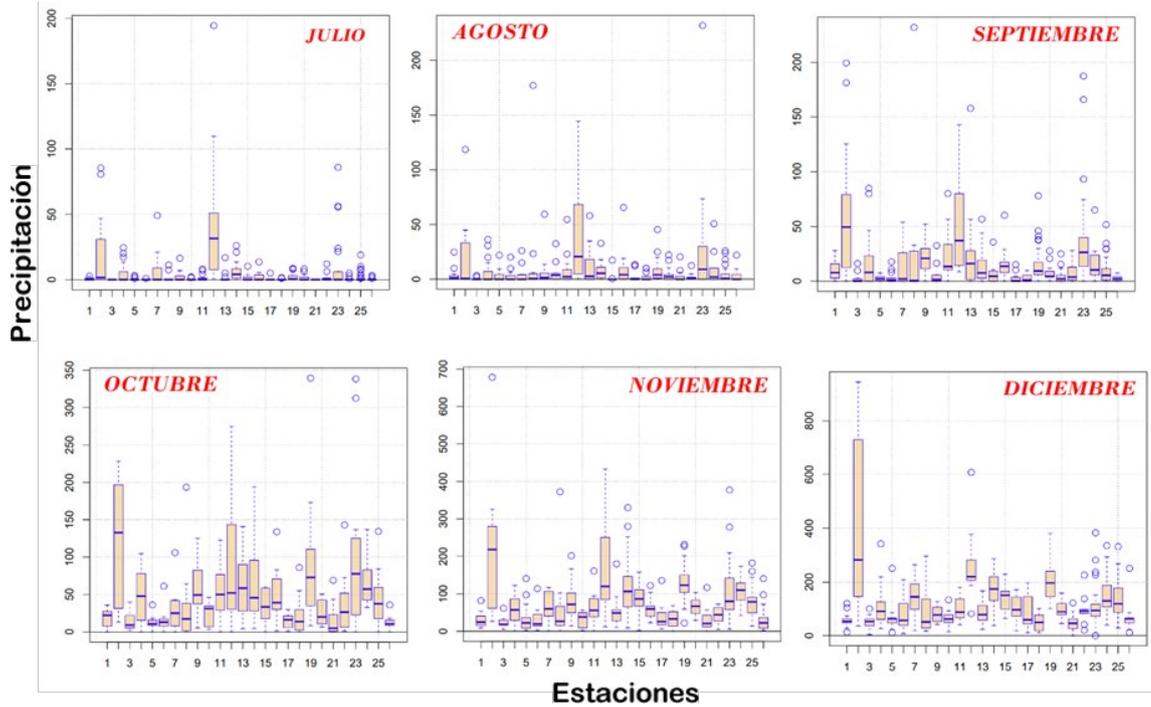
**Ilustración 6: Información disponible de precipitación en las estaciones**



En los diagramas de cajas mensuales, en la primera corrida de CLIMATOL, verificamos algunos datos anómalos, que se identifican y ajustan con el análisis descrito posteriormente.

**Ilustración 7: Diagrama de cajas**

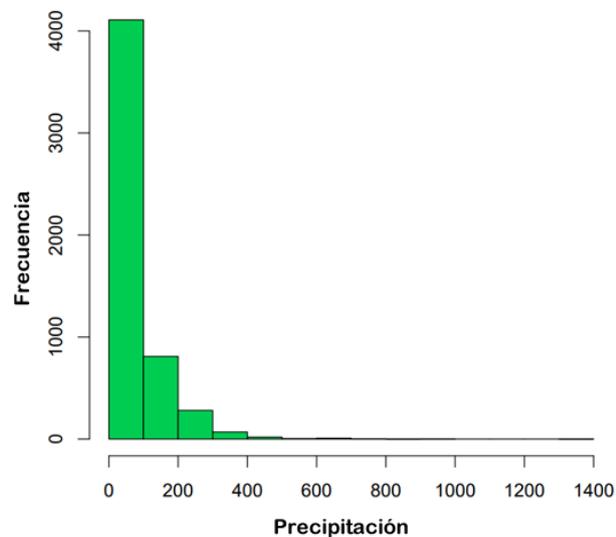




En el grafico siguiente vemos el histograma exploratorio de datos actuales de precipitación, que muestra mucha diferencia con una distribución normal, siendo una distribución normal donde se tiene la mayor cantidad de datos distribuidos cerca del medio del gráfico y no como en este caso la distribución muestra más a la izquierda.

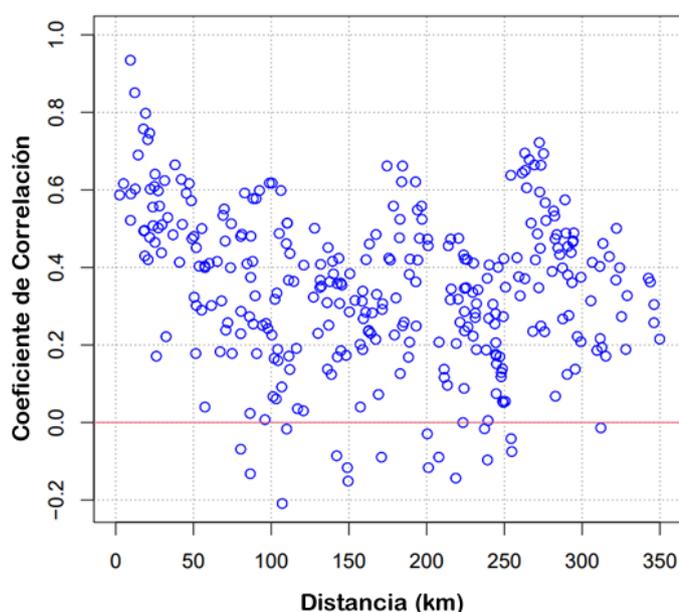
Aclarando que es la primera corrida donde se realiza el **análisis de los datos**, y se ira corrigiendo posteriormente.

**Ilustración 8: Histograma de todos los datos de precipitación**



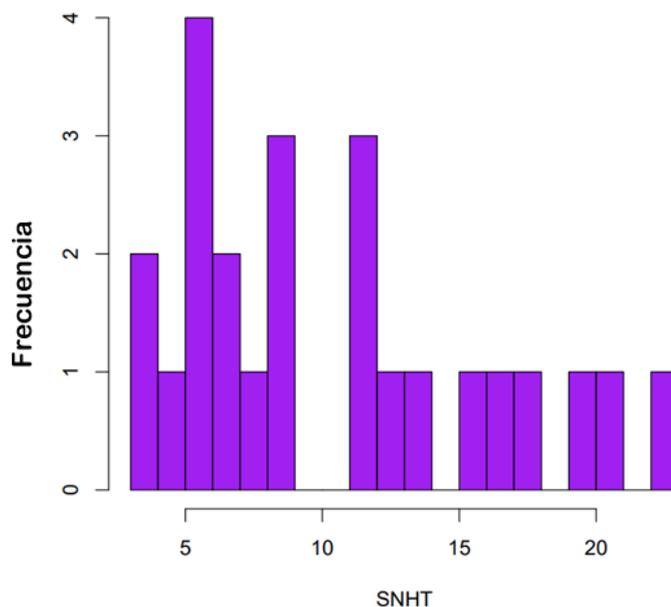
En cuanto a las correlaciones obtenidas podemos observar en el gráfico un análisis general de todas las estaciones, correlaciones desde -0.2 hasta casi 1, teniendo una mayoría una correlación entre 0.2 a 0.6 incluso en estaciones con distancia de 350 km. Cabe aclarar que se realiza un análisis general de todas las estaciones con el software CLIMATOL y no estación por estación.

**Ilustración 9: Correlograma de las diferentes series de precipitaciones de estaciones**



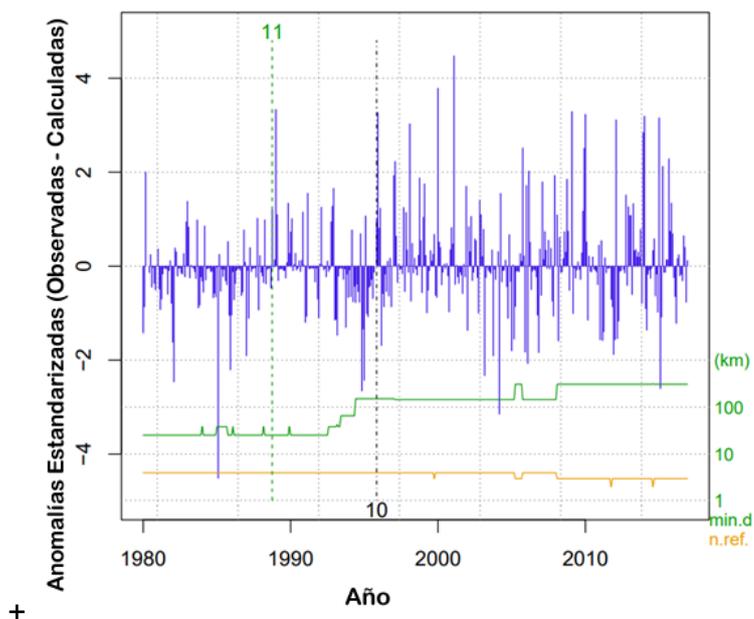
CLIMATOL evalúa los resultados adecuados con valores menores o iguales a 25 SNHT (Test de significancia) y en la ilustración 11, podemos observar que en la primera corrida hay valores mayores a 25, aunque pocos, pero todos estos valores deben estar en el rango mencionado. Por lo tanto, los datos no son homogéneos (Guijarro, 2023).

**Ilustración 10: Histograma de máximos SNHT**



En la ilustración de Anomalías de precipitación, se muestra la corrección de los datos anómalos, que previamente deben ser verificados en esas fechas con estaciones corregidas y cercanas a estas, si estas estaciones también tienen valores altos o bajos similares se aceptará estos datos si no, se debe corregir.

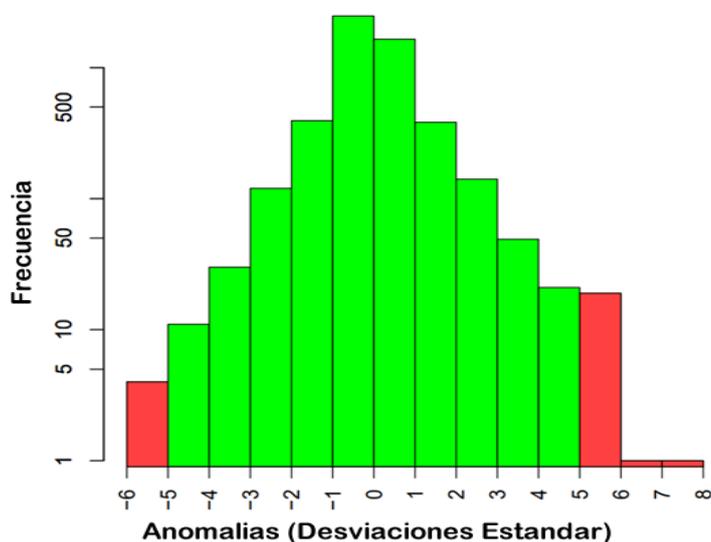
**Ilustración 11: Anomalías de precipitación**



Finalmente nos muestra un histograma donde se analiza los datos de precipitación, debiendo este histograma no tener valores mayores a 5

desviaciones estándar o menores a 5 desviaciones estándar. Sino cumple con estas condiciones se rechazará, como es el caso de este análisis.

**Ilustración 12: Histograma de anomalías normalizada**



En el gráfico anterior, los datos son rechazados como se puede ver en las barras de color rojo, por lo que no se puede hacer el relleno de datos sin antes corregir los datos anómalos, previa verificación como se indicó con estaciones cercanas.

Para ver que datos anómalos han sido rechazados el programa no bota un archivo con extensión csv y con prefijo `_out` como ser en este caso ***preci\_1980-2016\_out.csv***, donde podemos analizar la fecha, la precipitación observada y una precipitación sugerida, donde debemos verificar con otras estaciones cercanas y ajustar este valor y si en las otras estaciones tiene también valores similares dejar el valor.

Tabla 9: Anomalías en la precipitación

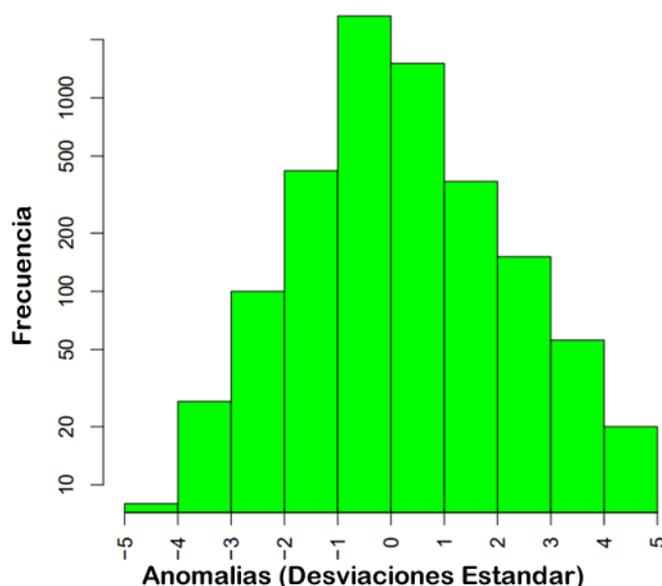
<i>Code</i>	<i>Fecha</i>	<i>Observado</i>	<i>Sugerido</i>	<i>Anomalía (std.devs)</i>	<i>Corregido</i>
X1012	1/12/1996	342	109	5.86	153
X1012	1/1/2004	247.8	58.1	5.36	94
X1012	1/1/2008	425.7	188.1	5.97	221
X1022	1/1/1984	409.1	258.1	5.2	268
X1022	1/3/1988	329.7	177.2	5.44	195
X1028	1/3/1993	269.9	113.7	5.71	91
X5041	1/12/1985	250.4	96.9	5.37	96
X5047	1/12/1985	250.4	96.9	5.28	96
X5078	1/1/1990	218.7	76.6	5.38	94
X5080	1/1/1984	386	170.5	5.83	123
X6034	1/2/1981	436.3	157.9	7.11	153
X6034	1/3/1988	45	225.5	-5.14	193
X6106	1/12/1985	82.5	202	-5.13	215
X6106	1/12/1989	226	80.7	5.38	100
X6106	1/1/1990	289	114.4	5.47	124
X6106	1/3/1990	261	76.7	5.05	63
X6106	1/10/1990	143	10.9	5.01	13
X6106	1/2/1991	472.5	145.1	6.02	137
X6106	1/3/1991	410.5	120.6	5.33	150
X6110	1/12/1985	120.9	237.7	-5.04	120.9
X6112	1/1/1987	194.1	94.1	5.02	114
X6119	1/1/1987	226.3	120.9	5.04	200
X6119	1/3/1988	219.1	96	5.23	195
X6119	1/12/1988	189.8	85.6	5.38	170
X6179	1/1/1984	6.5	348.6	-5.15	280

Fuente: Elaboración propia

Una vez verificados y corregidos los datos volvemos a hacer correr el script CLIMATOL, hasta que no tengamos observaciones.

Corrigiendo estos valores tenemos el siguiente resultado, donde todos los valores de precipitación tienen un valor menor a 5 desviaciones estándar y ya aceptada y homogenizado los datos.

**Ilustración 13: Histograma corregido**



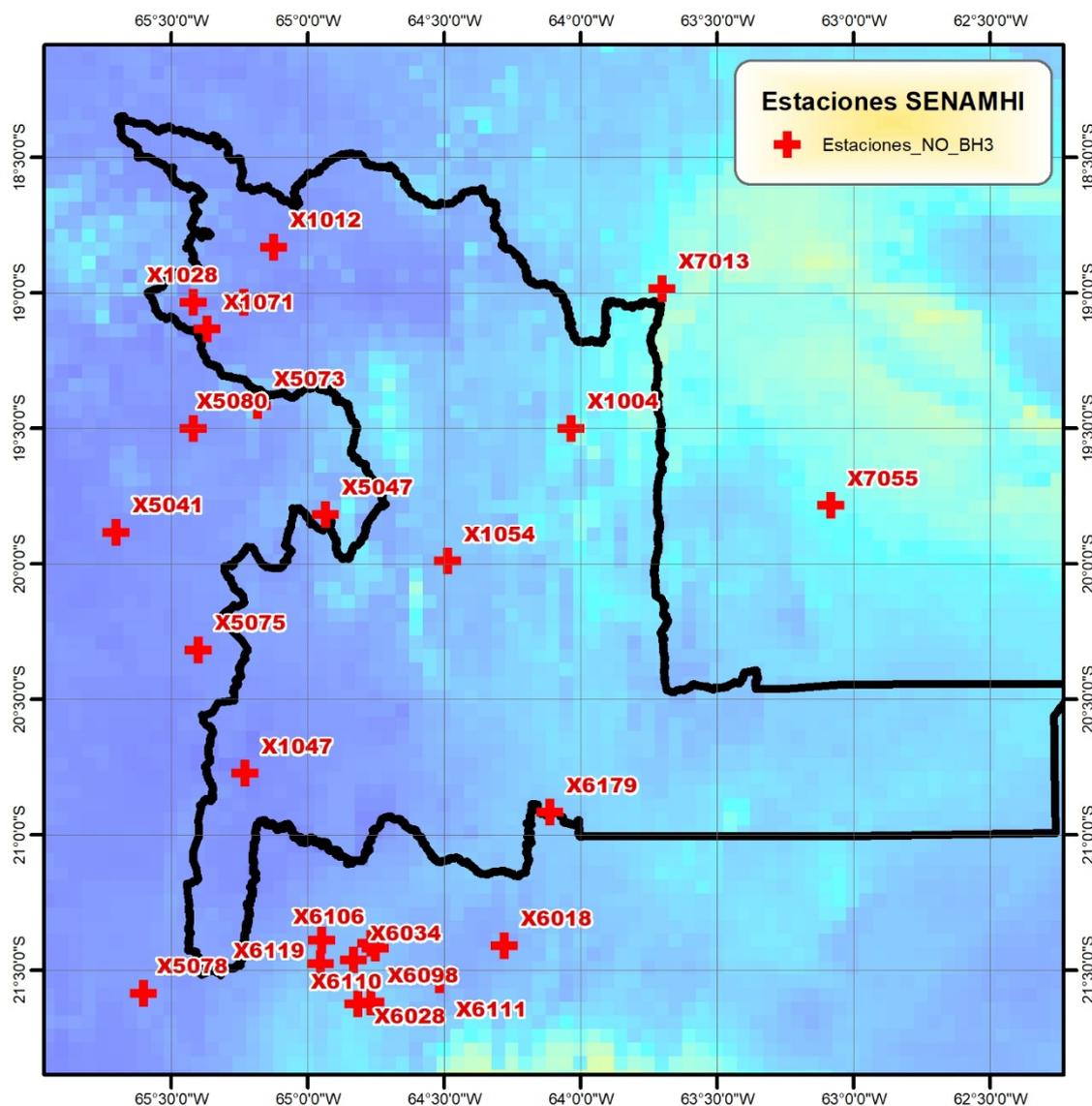
Una vez corregidos los datos anómalos, homogenizada las estaciones no utilizadas por el GMET y Rellenadas, se ´procede a realizar el análisis de la Rejilla de GMET versus datos obtenidos con las 26 estaciones que se obtuvieron rellenas y homogenizadas.

Todo este análisis resumido puedo realizarse con el software mencionado, pero siempre haciendo un análisis de resultados y comparando con datos generados en el GMET.

#### **4.1.4 Análisis de la Rejilla GMET para su uso**

Para realizar el análisis y comparación de los datos de GMET se obtuvieron las precipitaciones en los puntos de las 26 estaciones del SENAMHI.

**Ilustración 14: Estaciones Meteorológicas Seleccionadas SENAMHI**



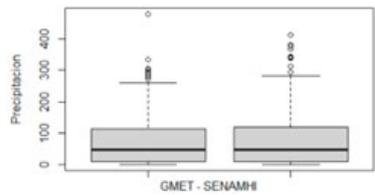
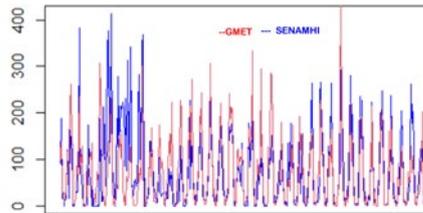
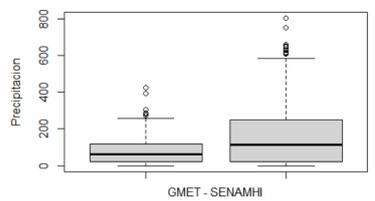
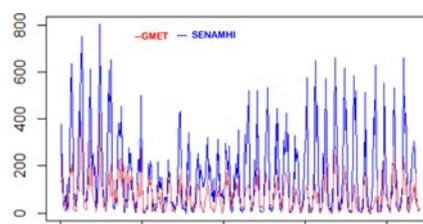
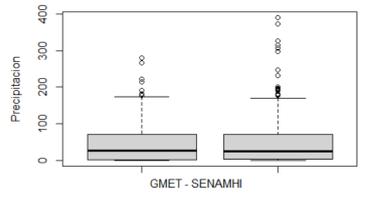
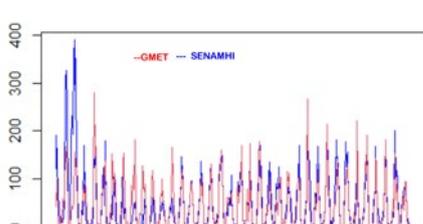
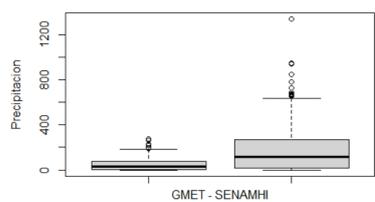
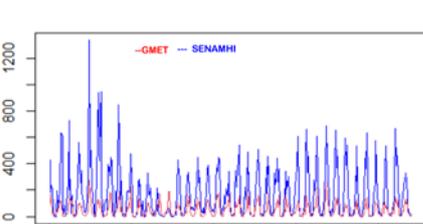
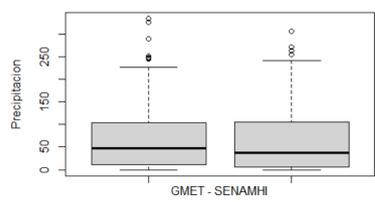
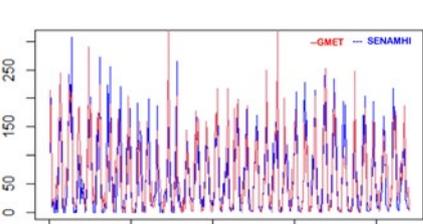
Para luego realizar el análisis de correlación y sesgo de las estaciones SENAMHI y GMET.

En este análisis se puede identificar que el 92.31% de las estaciones tienen correlación MUY ALTA y que el 7.69% de las estaciones tienen correlación alta. Por lo que se concluye que las 26 estaciones de tierra y 26 puntos del GMET tienen alta correlación.

Pero observando en la tabla los gráficos de flujo de cajas, el gráfico de dispersión con líneas y el sesgo, vemos que hay estaciones donde se sub estima y sobre estima las precipitaciones, es así que de las 26 estaciones analizadas 17

estaciones de GMET sub estiman las precipitaciones y 9 sobre estiman. Se nota una tendencia de subestimar las precipitaciones en las zonas altas y sobre estiman en las zonas bajas de Chuquisaca.

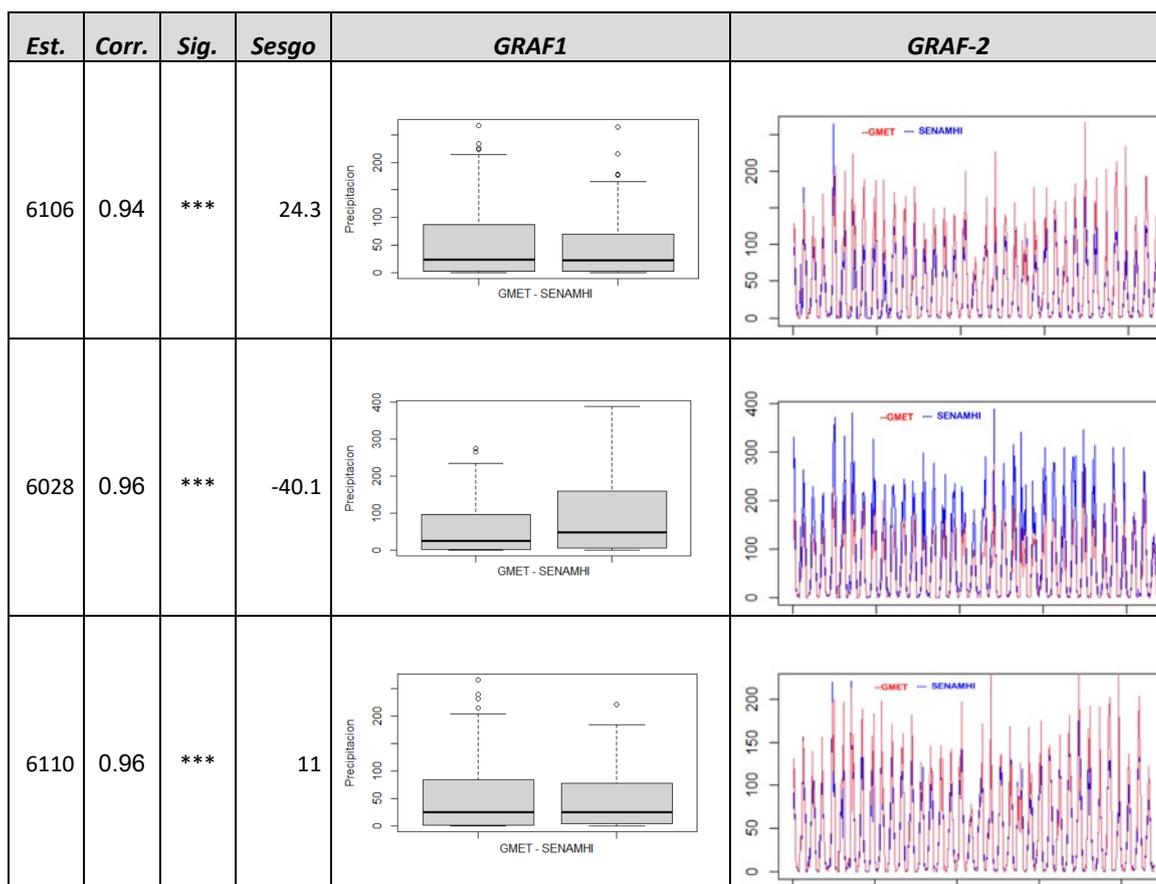
**Tabla 10: Correlaciones y Sesgos de Estaciones vs GMET**

<i>Est.</i>	<i>Corr.</i>	<i>Sig.</i>	<i>Sesgo</i>	<i>GRAF1</i>	<i>GRAF-2</i>
1054	0.74	***	-3		
7013	0.72	***	-53.1		
5080	0.84	***	-7		
1004	0.83	***	-70.8		
7055	0.83	***	8.4		

<i>Est.</i>	<i>Corr.</i>	<i>Sig.</i>	<i>Sesgo</i>	<i>GRAF1</i>	<i>GRAF-2</i>
5073	0.88	***	-23.5		
5081	0.84	***	112.8		
5078	0.89	***	-0.5		
1047	0.87	***	-2		
5041	0.89	***	-4.2		
5047	0.90	***	14.6		

<i>Est.</i>	<i>Corr.</i>	<i>Sig.</i>	<i>Sesgo</i>	<i>GRAF1</i>	<i>GRAF-2</i>
1012	0.89	***	-15.4		
5075	0.91	***	-9.1		
6179	0.88	***	5.7		
6111	0.91	***	54		
1028	0.92	***	-29.7		
6018	0.92	***	-45.2		

<i>Est.</i>	<i>Corr.</i>	<i>Sig.</i>	<i>Sesgo</i>	<i>GRAF1</i>	<i>GRAF-2</i>
6034	0.92	***	-30.7		
1022	0.93	***	-25		
6112	0.89	***	52.1		
1071	0.91	***	-24.7		
6119	0.92	***	63.8		
6098	0.94	***	-29.3		



Para que el modelo sea más preciso es importante saber de los errores que pueda tener, por lo que el Sesgo nos ayudara a determinar los errores y poder realizar los ajustes.

**Tabla 11: Rango error BIAS**

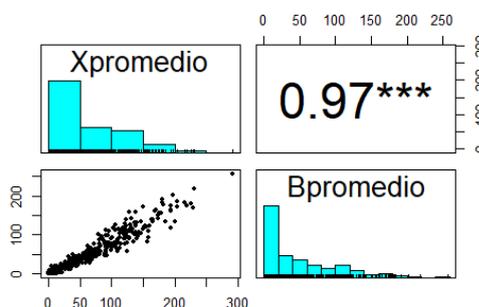
<i>Rango</i>	<i>Clasificación</i>	<i>Eventos</i>	<i>%</i>
Bias < - 20	La precipitación es subestimada	10	38.46
-20 ≤ Bias ≤ 20	La precipitación es aceptable	11	42.31
Bias > 20	La precipitación es sobreestimada	5	19.23
<b>TOTAL</b>		<b>26</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Adaptado del Global Drought Monitor (2002)

De acuerdo a los resultados obtenidos del Sesgo o Bias se tiene un 42% de precipitaciones aceptables del GMET, contra un 38% de que subestima la precipitación y un 19.23% que sobre estima. Por lo que se generó una Rejilla propia para la investigación, esta grilla cubre el departamento de Chuquisaca y tiene datos de precipitación mensual desde enero de 1980 a diciembre del 2016.

También se realizó el análisis con los promedios de precipitación de GMET y de las Estaciones, teniendo el siguiente resultado:

**Ilustración 15: Correlación Datos Tierra vs GMET SESGO =-19**



Con los promedios también se tiene una muy alta correlación, pero en general la precipitación estaría siendo subestimada según el análisis de BIAS.

#### 4.1.5 Calibración de datos GMET

Verificando que la Rejilla GMET no se adecua al 100% a las precipitaciones verificadas con estaciones tierra, se procedió a calibrar y corregir los datos con 129 estaciones que abarcan el departamento de Chuquisaca, de estas son 26 estaciones tierra y el resto son puntos de precipitaciones obtenidas del GMET.

Para ello se recurre nuevamente al CLIMATOL realizando el mismo proceso, es decir una corrida para encontrar datos anómalos y otra para la homogenización y relleno de datos.

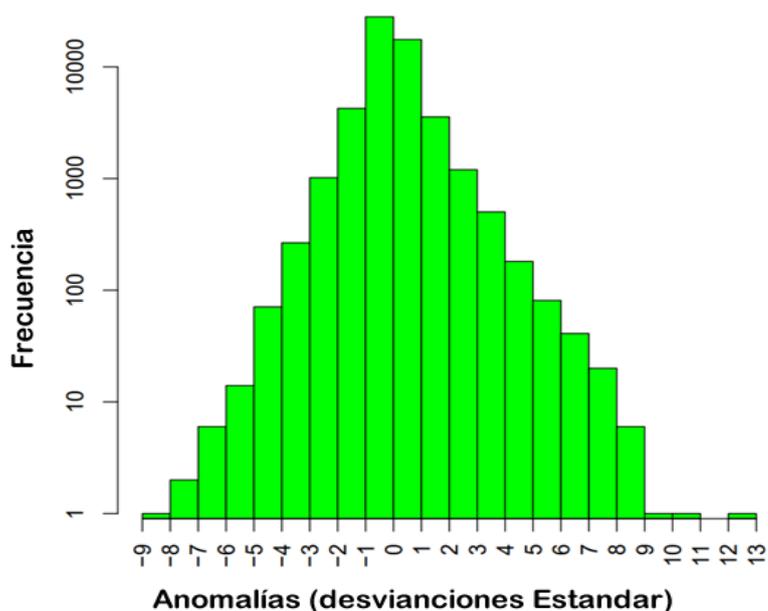
En la primera corrida CLIMATOL determino que se tenían 338 datos anómalos y como se vio, el CLIMATO sugiere otros valores para cambiarlos, lo que se aceptó.

Ilustración 16: Datos observados de anomalías

<i>Code</i>	<i>Date</i>	<i>Observed</i>	<i>Suggested</i>	<i>Anomaly (std.devs.)</i>
BO1002	1/10/1987	167.9	67	5.81
BO1002	1/12/1996	205.9	116.9	5.12
BO1002	1/9/1997	147	59.3	5.18
BO1003	1/3/1993	266.2	94.2	5.19
BO1003	1/1/2001	288.5	130.9	5.37
BO1003	1/1/2008	463.4	214.3	7.52
BO1005	1/1/1984	390.7	284.8	5.08
BO1005	1/10/1991	215.7	3.5	9.07
BO1005	1/1/2013	276.5	163.2	5.27
BO1008	1/12/1988	173.7	57.6	7.97
BO1008	1/1/2001	0	94.5	-6.49
BO1010	1/3/1997	377.3	216.2	5.32
BO1016	1/12/1984	203.9	83.1	5
BO1016	1/1/1985	241	76.5	6.22
BO1016	1/3/1986	225.7	108.4	5.02
BO1016	1/1/2007	302.5	144.4	5.98
BO1020	1/2/1984	220.3	123.1	5.02
BO1020	1/3/1986	181.4	64.5	5.61

Obteniendo resultados más aceptables como se puede ver el histograma de anomalías.

Ilustración 17: Histograma de anomalías normalizadas



#### 4.1.6 Generación de la Rejilla de Precipitación para Chuquisaca

Una vez que se obtuvo las 129 estaciones corregidas, homogenizadas y rellenadas, se procedió a generar la Rejilla, en base a una interpolación que incorpora una Regresión Lineal Múltiple (MLR) en el proceso a partir de variables de terreno como la elevación, la pendiente y el aspecto. Para su cálculo se utiliza un modelo digital de elevación. El método utiliza también los interpoladores Spline e IDW.

El DEM para realizar la interpolación y poder calcular pendiente y aspecto son las HYDROSHED de 900 metros, reduciendo la escala del GMET que es de 5km. La interpolación se realizó en R, con el SCRIP RegRAIN(ver Anexo 2), introduciendo la siguiente información en formato Excel o csv de las 129 estaciones:

A	B	C	D	E
FECHA	CODIGO	LONGITUD	LATITUD	PPT
1980-01-16	BO3002	-65.1781	-18.2033	113.4
1980-02-16	BO3002	-65.1781	-18.2033	43.3
1980-03-16	BO3002	-65.1781	-18.2033	126.5
1980-04-16	BO3002	-65.1781	-18.2033	18
1980-05-16	BO3002	-65.1781	-18.2033	4.4

El resultado del proceso no bota 444 rasters en formato tif con precipitaciones por mes y año desde 1980 al 2016. Y con el mismo R se unió en un solo archivo format NetCDF, para hacer correr el programa de Cálculo de Sequía.

The screenshot displays the RStudio interface. The left pane shows the R script editor with the following code:

```

1 library(devtools)
2 library(dplyr)
3 library(rgdal)
4 library(rgeos)
5 library(fields)
6 library(raster)
7 library(sp)
8 library(hydroGDF)
9 library(gstat)
10 library(RegRAIN)
11 library(readxl)
12
13 ##LLAMAR DATOS DE EXCEL
14
15 setwd("D:/tesis_2022/OSRegRAIN/PPT/")
16 #load the digital elevation model to use in the interpolation
17 m1dem <- raster("D:/tesis_2022/OSRegRAIN/dem/dem_tesis.tif")
18 class(as.Date(as.POSIXct(misdatos$FECHA, "GMT")))
19 class(misdatos$LONGITUD)
20
21 r <- raster("D:/tesis_2022/OSRegRAIN/PPT/RegRAIN_PPT_1980-01-16.tif")
22
23 plot(r)
24
25 #load the daily rainfall data that will be interpolated
26
27 misdatos2 <- data.frame(as.Date(as.POSIXct(misdatos$FECHA, "GMT")), misdatos$CODIGO, misdatos$LO
28 names(misdatos2) <- c("FECHA", "CODIGO", "LONGITUD", "LATITUD", "PPT")
29
30 #Run the RegRAIN function. Here the rainfall data between the
31 #first (ini) and the 5th (fin) date will be interpolated, using
32 #the 5m pixel resolution (0.0091 decimal degrees).
33 RegRAIN(misdatos2) #m1dem 1 444 cross = 14150
34

```

The right pane shows the Environment window with the following objects:

- m1dem: Formal class 'RasterLayer'
- misdatos: 57276 obs. of 5 variables
- misdatos2: 57276 obs. of 5 variables
- r: Formal class 'RasterLayer'

The bottom right pane shows a plot of the raster data, with a color scale ranging from 0 to 400. The plot shows a map of the region with a color gradient from brown (low values) to green (high values). The axes are labeled with coordinates: x-axis from -66 to -62, and y-axis from -21.5 to -18.5.

The console window shows an error message:

```

R 4.1.3 D:/tesis_2022/OSRegRAIN/PPT/ #
Error in plot.window(...): se necesitan valores finitos de 'ylim'
In addition: Warning messages:
1: In xy.coords(x, y, label, ylim, log) : NAs introduced by coercion
2: In min(x) : no non-missing arguments to min; returning -Inf
3: In max(x) : no non-missing arguments to max; returning -Inf
> r <- raster("D:/tesis_2022/OSRegRAIN/PPT/RegRAIN_PPT_1980-01-16.tif")
> plot(r)
>

```

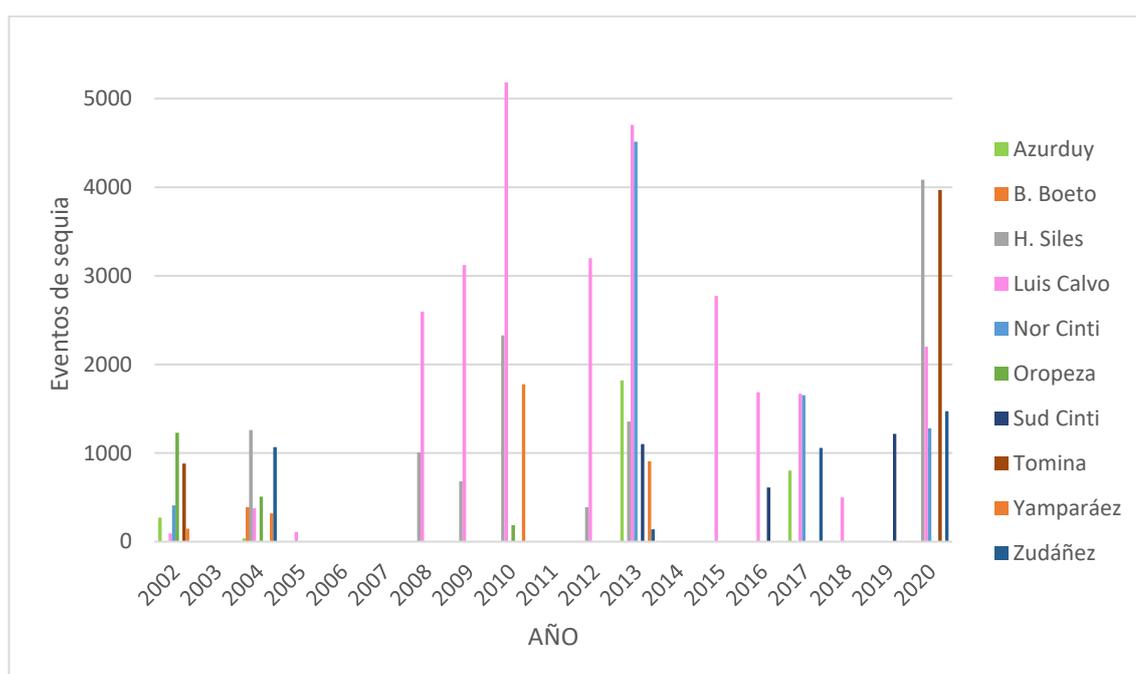
El modelo de precipitación obtenido para trabajar con SPI tiene ahora ajustes con información de tierra siendo más valido los resultados obtenidos de índices de sequía.

#### 4.1.7 Análisis y caracterización de la sequía a corto, mediano y largo plazo

En base a los datos de ocurrencias de eventos de sequía recopilados del VIDECI (Viceministerio de Defensa Civil)(ver anexo 3), se hizo un análisis comparando los tipos de sequía a escala 1, 3, 6 o 9 para conocer cuál de estos representa de mejor manera la sequía en el Departamento de Chuquisaca.

Para ese trabajo con la información del VIDECI se sistematizo los eventos de sequía por año y provincia para ver los años que se presentaron sequía.

**Ilustración 18: Eventos de Sequia VIDECI**



Los datos entregados por VIDECI son del 2002 al 2020, para realizar el análisis de eventos de Sequia se graficó en las fechas mencionadas, pero el análisis para el presente trabajo solo toma eventos del 2002 al 2016.

En el grafico los años con mayores eventos de sequía en Chuquisaca dentro de los años analizados 2002 al 2016, fueron el año 2009, 2010, 2012 y 2013.

Estos eventos se sistematizaron por año y mes para hacer las comparaciones con los resultados del SPI.

Para analizar y caracterizar la sequía se trabajó con el número de **familias afectadas**, es decir se clasificó en rangos definiendo la severidad de la sequía, para poder relacionar con los índices de sequía que obtiene el SPI.

**Tabla 12: Clasificación del SPI**

<b>SEQUIA</b>	<b>Mínimo de Familias Afectadas</b>	<b>Máximo de Familias Afectadas</b>	<b>SPI</b>
Extremadamente Seco	>2000		<-2
Severamente Seco	1298	2000	-1.5 a -1.99
Moderadamente Seco	622	1298	-1 a -1.49
Condición Anormal Seca	<622		-0.51 a -0.99

Fuente: Adaptado del Global Drought Monitor (2002)

Por medio de una interpolación se fue obteniendo el índice SPI para cada valor de familias afectadas. Ver Anexo 2

#### **4.1.8 Eventos de Sequía 2009 y Valor SPI para su Caracterización de Sequía**

En la siguiente tabla resumen (tabla 12), se presentan los eventos de sequía reportados al VIDECI del año 2009, donde 5 municipios son los afectados por la sequía. Reportando las mayores afectaciones el municipio de Villa Vaca Guzmán y el que reporta menos afectaciones es el municipio de Monteagudo.

Los meses de sequía reportados en el año 2009 son enero, marzo y octubre, con una sequía Moderadamente seco a Condición Anormal Seca de acuerdo a los índices SPI.

**Tabla 13: Eventos de Sequia 2009 y su índice SPI**

<i>Fecha Ocurrencia</i>	<i>Municipio</i>	<i>Familias afectadas</i>	<i>SPI</i>
23/1/2009	Machareti	300	-0.70
1/3/2009	Huacareta	658	-1.00
30/3/2009	Machareti	365	-0.80
31/8/2009	Huacaya	635	-1.00
1/10/2009	Machareti	676	-1.00
1/10/2009	Monteagudo	23	-0.51
1/10/2009	Villa Vaca Guzmán	1147	-1.40

Fuente: Elaboración Propia en base a información VIDECI

#### **4.1.9 Eventos de Sequía 2010 y Valor SPI para su Caracterización de Sequía**

En el año 2010, tabla resumen 13, siete municipios reportaron sequía al VIDECI con severidades de Condición Anormal a Severamente seco. Teniendo una mayor afectación por la sequía que el anterior año.

**Tabla 14: Eventos de Sequia 2010 y su índice SPI**

<i>Fecha Ocurrencia</i>	<i>Municipio</i>	<i>Familias afectadas</i>	<i>SPI</i>
1/1/2010	Villa Vaca Guzmán	1298	-1.50
15/1/2010	Huacaya	724	-1.00
15/1/2010	Machareti	1159	-1.40
15/1/2010	Monteagudo	500	-0.90
1/3/2010	Huacareta	1340	-1.50
1/3/2010	Huacaya	606	-0.90
1/3/2010	Machareti	622	-1.00
30/3/2010	Yotala	186	-0.60
30/4/2010	Tarabuco	1777	-1.80
30/5/2010	Machareti	159	-0.60
30/7/2010	Huacareta	488	-0.90

Fuente: Elaboración Propia en base a información VIDECI

#### 4.1.10 Eventos de Sequía 2012 y Valor SPI para su Caracterización de Sequía

Los reportes de Sequía del 2012 de los municipios de Chuquisaca( ver tabla 14), son de 3 municipios que van de una severidad Extremadamente seca a condición anormal seca. Siendo Huaca el Municipio que tuvo la mayor cantidad de familias afectadas

**Tabla 15: Eventos de Sequia 2012 y su índice SPI**

Fecha Ocurrencia	Municipio	Familias afectadas	SPI
15/2/2012	Huacaya	711	-1
1/8/2012	Huacareta	390	-0.7
1/8/2012	Huacaya	2150	-0.8
1/8/2012	Machareti	339	-2.1

Fuente: Elaboración Propia en base a información VIDECI

#### 4.1.11 Eventos de Sequía 2013 y Valor SPI para su Caracterización de Sequía

El año 2013 existen reportes( ver tabla 15) de 13 municipios de Chuquisaca con sequías leves a muy altas, siendo los municipios de Huacaya, Machareti, Azurduy, San Lucas y Camargo los más afectados.

**Tabla 16: Eventos de Sequia 2013 y su índice SPI**

Fecha Ocurrencia	Municipio	Familias afectadas	SPI
15/3/2013	San Lucas	1488	-1.6
15/4/2013	Huacaya	2119	-2.1
1/5/2013	Zudañez	58	-0.5
2/5/2013	Tarabuco	548	-0.9
10/5/2013	Huacareta	553	-0.9
12/5/2013	Yamparaez	359	-0.8
15/5/2013	Azurduy	1821	-1.9
15/5/2013	Las Carreras	274	-0.7
15/5/2013	Villa Charcas	1635	-1.7
15/6/2013	Machareti	1871	-1.9

15/6/2013	Villa Abecia	662	-1
15/7/2013	Camargo	1390	-1.5
15/7/2013	Huacaya	715	-2.1
15/7/2013	Presto	81	-0.5
30/7/2013	Huacareta	803	-1.1
12/8/2013	Culpina	166	-0.6

Fuente: Elaboración Propia en base a información VIDECI

#### 4.1.12 Desarrollo del software aplicativo de apoyo SPI

Generalmente se tiene apoyo de aplicativos para generar SPI de una solo estación y no así trabajar con raster.

El Aplicativo para ayudar a gestionar procesos grandes como es en este caso del manejo de matrices donde cada pixel tiene información de Fecha, latitud, longitud y precipitación y se debe calcular el valor del índice de precipitación estandarizada.

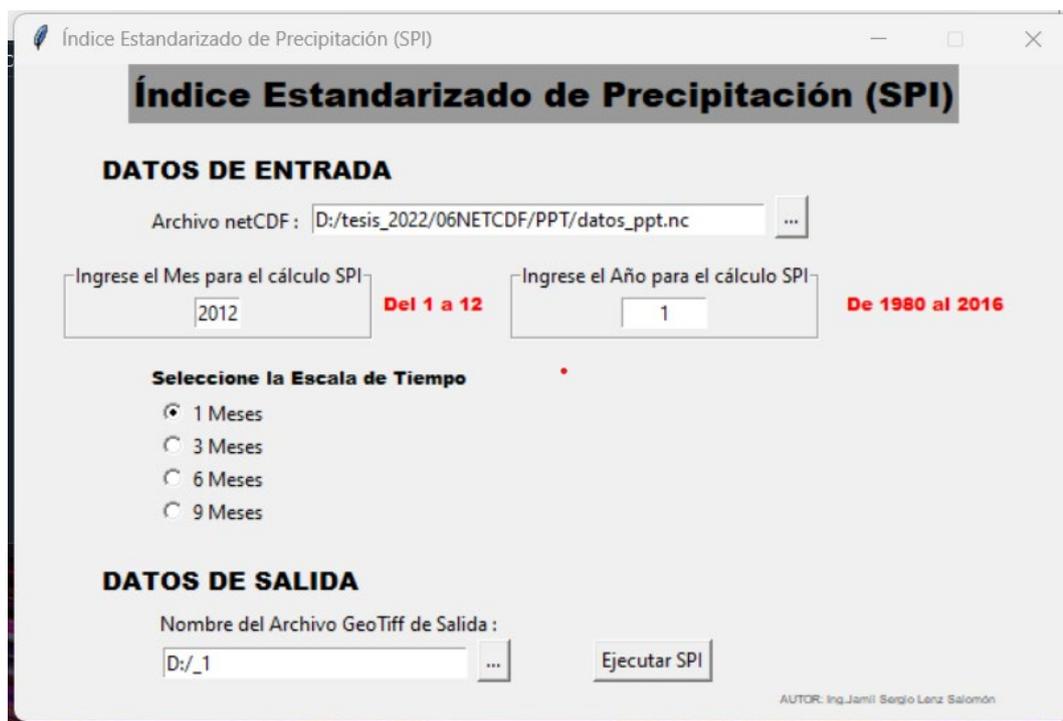
El aplicativo fue desarrollado en Python 3.x, donde el mismo tiene librerías que facilitan el manejo de matrices multidimensionales, como es el ***xarray y pandas***, haciendo que el desarrollo sea más corto y fácil de realizarlo.

El Aplicativo se desarrolló en 2 módulos o scripts, uno que se aplica a la interface de recepción de variables y envió de las mismas al otro modulo. El objetivo es tener menores errores y hacer que la introducción de datos sea más fácil.

El Segundo modulo o script, es netamente de cálculo de SPI con la metodología explicada anteriormente.

El módulo de la interface se desarrolla con tkinter una librería de Python, el código base se presenta en el anexo 4. Siendo básicamente información de entrada y salida que se debe introducir:

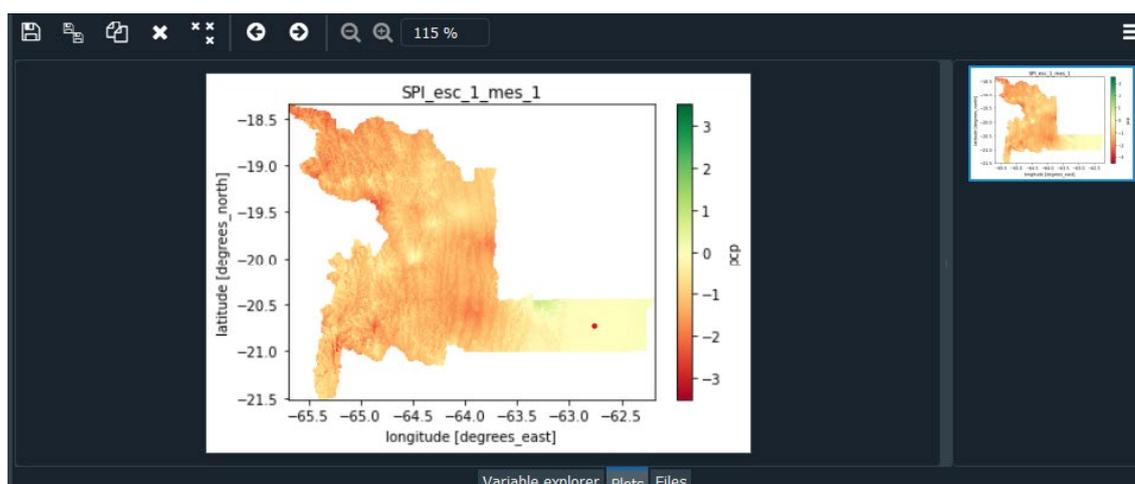
### Ilustración 19: Pantalla Principal Aplicativo SPI



Como el archivo netCDF, el mes, el año y la escala como datos de entrada y de salida donde se graba el archivo geotif del SPI.

Teniendo como salida un raster con valores del SPI en la consola y además se graba en la carpeta definida como salida

### Ilustración 20: Resultado del Aplicativo SPI

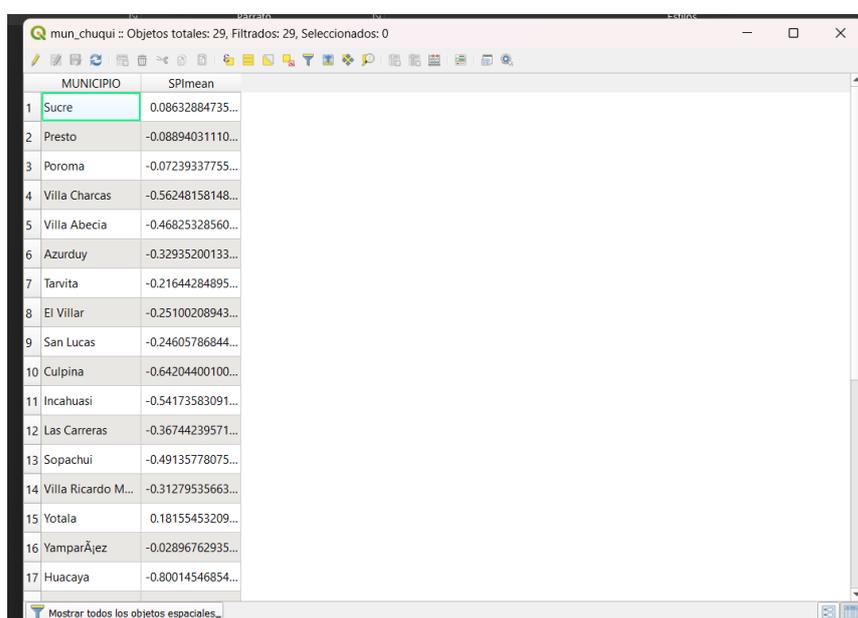


Es así que en el mes de enero a escala 1 el año 2011 tiene valores de SPI entre 0.94 a -2.79 en el departamento de Chuquisaca.

El trabajo siguiente fue obtener los raster de SPI de acuerdo a los eventos de sequía del VIDECI y hacer un análisis estadístico para ver cuál de las escalas representa mejor la sequía en el departamento de Chuquisaca.

Por lo que en base a las tablas 9,10,11,12 y 13, se obtuvieron SPIs a escala 1, 3, 6 y 9 obteniendo el valor promedio SPI de cada municipio con QGIS, superponiendo el archivo shapefile de municipios de Chuquisaca con el SPI raster y con estadística de zona obtener los valores medios de SPI.

### Ilustración 21: Valores medios por Municipio



MUNICIPIO	SPImean
1 Sucre	0.08632884735...
2 Presto	-0.08894031110...
3 Poroma	-0.07239337755...
4 Villa Charcas	-0.56248158148...
5 Villa Abecia	-0.46825328560...
6 Azurduy	-0.32935200133...
7 Tarvita	-0.21644284895...
8 El Villar	-0.25100208943...
9 San Lucas	-0.24605786844...
10 Culpina	-0.64204400100...
11 Incahuasi	-0.54173583091...
12 Las Carreras	-0.36744239571...
13 Sopachui	-0.49135778075...
14 Villa Ricardo M...	-0.31279535663...
15 Yotala	0.18155453209...
16 Yamparájez	-0.02896762935...
17 Huacaya	-0.80014546854...

#### 4.1.13 Análisis estadístico VIDECI vs. SPI

En el siguiente acápite se analiza cuál de las escalas (1,3,6 y 9) o sea que Sequia Meteorológica, Agrícola o Hidrológica representa de mejor manera las sequias en el departamento de Chuquisaca. Esto para definir en futuro cuál de las escalas utilizar para la representación más exacta de la sequía en nuestro departamento.

Para ello comenzamos con el análisis y lo primero es ver si la  $H_0$  es aceptada, ósea que todas las escalas son iguales a la de VIDECI. Para ello hacemos un Análisis de Varianza:

Tabla 17: Análisis de Varianza (ANOVA)

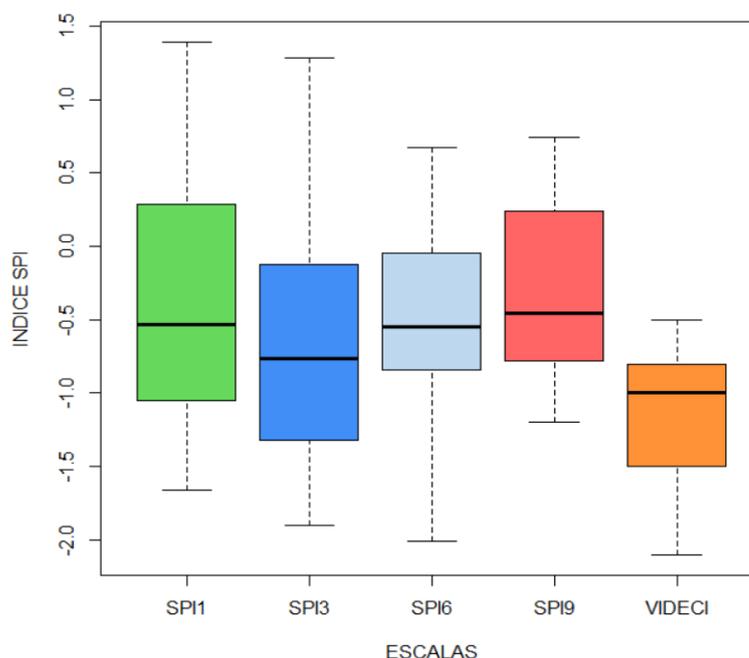
Suma de cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
15.4593	4	3.8648	8.0221	5.50765E-06	2.42047886
89.1276	185	0.4817			
104.5869	189				

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla de análisis de varianza nos muestra que F es mayor a Valor crítico para F, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, teniendo diferencias significativas entre las escalas (1,3,6,9 y VIDECI). Por tanto, se hará un análisis para ver si por lo menos una de las escalas representa la sequía de acuerdo con la información de Familias Afectadas.

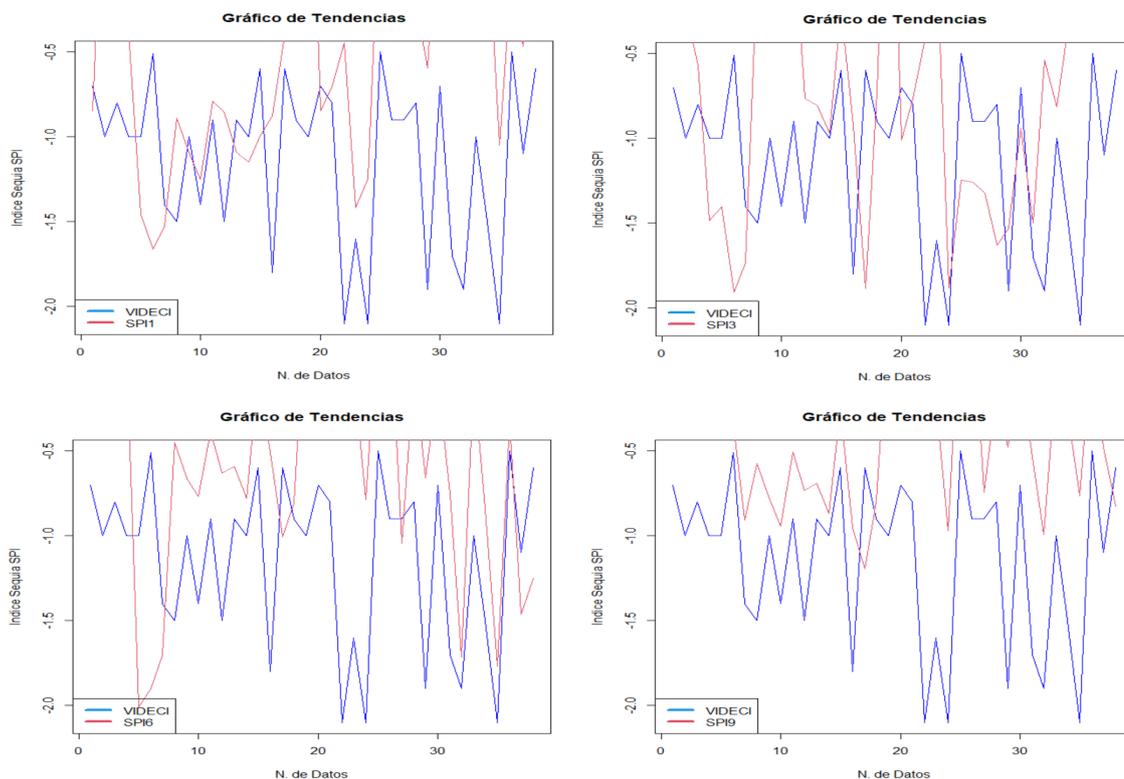
Para ver gráficamente si alguna escala es similar a la del VIDECI (Familias afectadas) se realiza una gráfica de Caja y Bigotes.

Ilustración 22: Caja de Bigotes Mostrando Medias de cada Escala SPI



En la gráfica podemos analizar los valores de los índices SPI (SPI1, SP6 y SP9) tienen mucha diferencia con los datos del VIDECI, pero la escala SPI3 tiene una media más cercana a la del VIDECI.

### Ilustración 23: Tendencias VIDECI vs SPI(1,3,6 y 9)



En el gráfico anterior, también podemos ver que la tendencia que mejor representa es de la escala SPI3 y SPI6, siendo las SPI1 y SPI9 que no tienen una tendencia como la del VIDECI.

Realizando la prueba de TUKEY, que se muestra en la siguiente tabla 17, podemos decir que al 95% de Significancia existe diferencias altamente significativas del VIDECI con SPI1, SPI6 y SPI9 y una significancia no muy alta con SPI3, siendo así la hipótesis nula es aceptada. Pero al 99% existe una alta significancia con SPI1, SPI6 y SPI9 y no hay significancia con SPI3, lo que nos lleva a aceptar la hipótesis alternativa, y así podemos decir que no hay una clara mejor escala que represente la sequía en el departamento de Chuquisaca con el índice estudiado.

Tabla 18: Análisis TUKEY

<i>INDICE SPI</i>	<i>diff</i>	<i>lwr</i>	<i>upr</i>	<i>p</i>	<i>95%</i>	<i>99%</i>
VIDECI-SPI1	-0.7271	-1.1658	0.2884	0.0001	**	**
VIDECI-SPI3	-0.4859	-0.9246	0.0472	0.0217	*	
VIDECI-SPI6	-0.5830	-1.0217	0.1443	0.0030	**	**
VIDECI-SPI9	-0.8174	-1.2561	0.3787	0.0000	**	**
SPI3-SPI1	-0.2412	-0.6799	0.1975	0.5542		
SPI6-SPI1	-0.1441	-0.5828	0.2946	0.8947		
SPI9-SPI1	0.0903	-0.3484	0.5290	0.9796		
SPI6-SPI3	0.0971	-0.3416	0.5358	0.9734		
SPI9-SPI3	0.3315	-0.1072	0.7702	0.2323		
SPI9-SPI6	0.2344	-0.2043	0.6731	0.5819		

Fuente: Elaboración Propia

## **CAPÍTULO V**

### **5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1.1 Conclusiones**

Se consiguió información de precipitación para el presente trabajo de 2 fuentes, una del SENAMHI recogiendo 111 estaciones de las cuales se usaron 26 por datos faltantes, años de registros y otras utilizadas para la generación del GMET. La segunda fuente fue el GMET que fue obtenida del Ministerio de Medio Ambiente y Agua con registros desde 1980 al 2016 y que actualmente es utilizada para los Planes de Aprovechamiento Hídrico Local en cuencas de Bolivia.

De las 26 estaciones seleccionadas se realizó la eliminación de 33 datos anómalos identificados con el programa CLIMATOL, cambiando por datos calculados con otras estaciones cercanas, la homogenización y relleno de datos faltantes, también se realizó con CLIMATOL obteniendo 26 estaciones con datos rellenos y homogenizados.

En Base a la información generada de las 26 estaciones, se comparó y analizó los datos de la Red GMET para el territorio de Chuquisaca, teniendo correlaciones altas, pero con errores de sesgo (valores negativos) que subestimaba la precipitación en Chuquisaca. Por lo que se tuvo que calibrar y generar un nuevo raster con precipitaciones desde 1980 al 2016, interpolada con una Regresión Lineal Múltiple (MLR) a partir de variables de terreno como la elevación, la pendiente y el aspecto (orientación de las Pendientes).

Con este proceso de interpolación de Regresión Lineal Múltiple se generó una base de datos geoespacial de precipitaciones en formato netCDF, que nos permite el manejo de la información en un solo archivo, haciendo el manejo más fácil y teniendo menos peso que los otros formatos de archivos ráster y que tiene información multidimensional como es la precipitación, fecha, latitud y longitud.

En base a la generación de la información de precipitación para el Departamento de Chuquisaca y para automatizar el proceso del cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado de Mckee, se desarrolló un aplicativo con Python y

haciendo un ejecutable del mismo que pueda usarse en cualquier computadora. El código es presentado en los anexos y puede ser modificado fácilmente para escala y lugar.

Con el Aplicativo y el archivo netCDF se pudo comparar la sequía a diferentes escalas con datos del VIDECI desde 2002 al 2020, teniendo como resultado que para caracterizar la sequía de Chuquisaca con Índice de Precipitación Estandarizado de Mckee(SPI) no se tiene una clara mejor escala (1,3,6 y 9) que represente la sequía en el departamento de Chuquisaca.

### **5.1.2 Recomendaciones**

En base al desarrollado del aplicativo para el SPI, ampliar la investigación con otras metodologías para determinar la sequía y comparar si otra metodología representa de mejor manera la sequía en el Departamento de Chuquisaca.

Comparar también metodologías para la homogenización y relleno de datos con otros softwares.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (Flacso Paraguay). (2022). APORTES PARA EL DEBATE SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS CONSECUENCIAS EN PARAGUAY. *APORTES PARA EL DEBATE SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS CONSECUENCIAS EN PARAGUAY*, 13.
- AcademiaLab. (16 de 07 de 2022). *AcademiaLab*. Obtenido de AcademiaLab: <https://academia-lab.com/enciclopedia/iso-8601/>
- AClimate. (11 de 3 de 2015). *AClimate*. Obtenido de AClimate: <https://aclimatealaadversion.wordpress.com/2015/03/11/medidas-de-prevencion-contr-la-sequia/>
- B. McKee, T., J. Doesken, N., & Kleist, J. (1993). *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time*. Boston: American Meteorological Society.
- BATRES, J. A., & LEMUS, M. J. (2017). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA DURANTE LA ESTACION LLUVIOSA EN LA ZONA ORIENTAL DE EL SALVADOR*. UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.
- C, S. (1999). *Agroclimatologíaç*. Caracas: Innovación.
- Centro de Información y Gestión Tecnológica. (2014). *Ciencias Holguín*, 3.
- CICAP. (22 de 03 de 2023). *Centro de Investigación y Promoción del Campesinado*. Obtenido de Centro de Investigación y Promoción del Campesinado: <https://www.cipca.org.bo/analisis-y-opinion/cipca-notas/el-agua-en-la-region-del-chaco-boliviano-luchando-contr-la-sequia>
- Crespo Pichardo, G. (1979). CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍA PARA DOCE RESERVAS DE LA BIOSFERA MEXICANA. 2.
- DAPRO. (2021). Informe Económico Productivo del Departamento de Chuquisaca. *Informe Económico Productivo del Departamento de Chuquisaca*.

- El Mundo.es*. (06 de 11 de 2009). Obtenido de *El Mundo.es*:  
<http://www.elmundo.es/america/2009/11/05/argentina/1257433211.html>
- FAO, O. d. (2010). *Gestión del Riesgo de Sequía y otros eventos climaticos extremos en Chile*. Santiago: FAO.
- Fundamentos del almacenamiento de datos netCDF. (2020). *Climate and Forecast (CF)*, 2-3.
- GARCÍA MARÍN, R. (2008). *RIESGO DE SEQUÍA Y VULNERABILIDAD SOCIOECONÓMICA EN LA CUENCA DEL GUADALENTÍN*. Murcia.
- Gaucin, D. O. (2012). *Sequía en Nuevo León. Vulnerabilidad, Impactos y Estrategias de Mitigación*. Nuevo León: Instituto del Agua.
- Giner, R. A., & Fierro, L. C. (2011). Análisis de la problemática de la sequía 2011-2012 y sus efectos en la ganadería y agricultura de temporal. Documento de circulación interna. Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA). *Análisis de la problemática de la sequía 2011-2012*.
- Guijarro, J. (2023). Guía de uso del paquete de R climatol. *Guía de uso del paquete de R climatol*, 3.
- Heuveltop. (12 de 3 de 1986). *SENARA*. Obtenido de SENARA: [www.una.ac.cr / mapascostarica / mapas / botones /](http://www.una.ac.cr/mapascostarica/mapas/botones/)
- L.Giddings. (2005). Standardized Precipitation Index Zones for México. *Standardized Precipitation Index Zones for México*.
- LaRegión. (11 de 06 de 2023). *La Región*. Obtenido de La Región: <https://www.laregion.bo/extremos-climaticos-intensas-lluvias-y-sequias-afectan-a-casi-medio-millon-de-familias-en-bolivia/>
- Loaiza Cerón, W. (2014). *EVALUACIÓN DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS Y PROCESOS DE ADAPTACIÓN DE LAS COMUNIDADES AGRÍCOLAS DE LA CUENCA DEL RÍO DAGUA*. SANTIAGO DE CALI.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, A. y. (04 de 23 de 2015). *Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de*

*España.* Obtenido de [http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/que-es-la-sequia/Observatorio\\_Nacional\\_Sequia\\_1\\_1\\_tipos\\_sequia.aspx](http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/que-es-la-sequia/Observatorio_Nacional_Sequia_1_1_tipos_sequia.aspx)

MITECO. (s.f.). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.* Obtenido de Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: [https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/que-es-la-sequia/observatorio\\_nacional\\_sequia\\_1\\_1\\_tipos\\_sequia.html](https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/que-es-la-sequia/observatorio_nacional_sequia_1_1_tipos_sequia.html)

MMAyA. (2020). PROGRAMA PILOTO DE RESILIENCIA CLIMÁTICA. *DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA DE SEQUÍAS PARA BOLIVIA.*

MMyA. (2016). Guía Metodológica para la Elaboración de Balances Hídricos Superficiales. *Guía Metodológica para la Elaboración de Balances Hídricos Superficiales.*

Morales Saldivar, J. A. (2005). *EL EFECTO DE LA LONGITUD DE REGISTRO EN EL CALCULO DEL INDICE DE PRECIPITACION ESTANDAR.* UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.

Naciones Unidas. (22 de 02 de 2023). *Cambio climático y medioambiente.* Obtenido de Cambio climático y medioambiente: <https://news.un.org/es/story/2023/02/1518812#:~:text=Gran%20parte%20de%20Argentina%2C%20Chile,m%C3%A1s%20bajos%20en%2035%20a%C3%B1os.>

OMM. (2012). Índice normalizado de precipitación. Guía de Usuario. *Índice normalizado de precipitación. Guía de Usuario, 3.*

OMM(Organización Meteorológica Mundial). (2006). *Vigilancia y Alerta Temprana de la Sequía: Conceptos, progresos y desafíos futuros.* Kenya: OMM.

- Ortega, C. (02 de 06 de 2023). *QuestionPro*. Obtenido de QuestionPro: <https://www.questionpro.com/blog/es/software-para-proyectos-de-investigacion/>
- Pichardo, G. C. (1989). *COMPARACIÓN DE DOS METODOLOGIAS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍA PARA DOCE RESERVAS DE LA BIOSFERA MEXICANA*. Texcoco.
- PNUD. (2010). Desarrollo Humano en el Departamento de Chuquisaca. *Desarrollo Humano en el Departamento de Chuquisaca*.
- PNUD. (2010). Desarrollo Humano en el Departamento de Chuquisaca. *Desarrollo Humano en el Departamento de Chuquisaca*.
- Portal, M., & Esther, G. (2009). Análisis de los criterios de selección de estaciones para la generación de la grilla meteorológica (GMET) en la cuenca del río Guadalquivir. 344.
- Salamanca Mazuelo, L., Quiroga Becerra de la Roca, R., & Zamora Auza, B. (2011). Ochenta y cinco años de la historia de desastres en Bolivia (1920-2005). *Revista Virtual REDESMA*, 24-25.
- Solar Maraz, D. (22 de 03 de 2023). *CIPCA Regional Cordillera*. Obtenido de CIPCA Regional Cordillera: <https://cipca.org.bo/analisis-y-opinion/cipca-notas/el-agua-en-la-region-del-chaco-boliviano-luchando-contra-la-sequia>
- SpaceRobotics.EU. (s.f.). *Nubalo Studios*. Recuperado el 02 de 06 de 2023, de Nubalo Studios: <https://www.spacerobotics.eu/ciencia-y-software/>
- Tierra. (8 de 12 de 2022). Obtenido de Tierra(T.): <http://www.ftierra.org/index.php/tema/medio-ambiente/1088-bolivia-sequia-departamentos-afectados-fenomeno-nina-peor-2022-lluvias>
- Ulchur, B. S. (2020). PRÁCTICA EN PYTHON . *Lenguajes de Programación*, 5.
- UNFPA. (2015). Vulnerabilidad Poblacional al Riesgo de Desastres en Bolivia. *Vulnerabilidad Poblacional al Riesgo de Desastres en Bolivia*, 14.

Valiente, Ó. M. (2001). *Sequía:Definiciones, tipologías y métodos*. Barcelona:  
Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional.  
Universidad de Barcelona.

ZONISIG. (2000). *ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA*. Sucre.

**ANEXOS**

## Anexo 1: CODIGO R EN CLIMATOL

```
#librerias requeridas
library(maps)
library(mapdata)
library(readxl)
library(climatol)

#Carpeta de trabajo
dir <- setwd('D:/tesis_2022/01climatol')

#precipitaciones_tesis
datos <- as.matrix(precipitaciones_tesis, sep = ".")
write(datos,'preci_1980-2016.dat')

#Estaciones
write.table(Estaciones,'preci_1980-2016.est', row.names = FALSE, col.names = FALSE)

dat <- read.delim('preci_1980-2016.dat', dec = '.')
est <- read.delim('preci_1980-2016.est')

rm(datos,precipitaciones_tesis,Estaciones)

dat
est

#Analisis exploratorio de datos
homogen('preci',1980,2016, std = 2, gp=4)
homogen('preci',1980,2016, std = 2, gp=4, expl=TRUE)

#Corregir
dahstat('preci',1980,2016, stat = 'series')
```

## Anexo 2: SCRIPT REGRAIN

```
#Librerias Utilizadas
library(devtools)
library(dplyr)
library(rgdal)
library(rgeos)
library(fields)
library(raster)
library(sp)
library(hydroGOF)
library(gstat)
library(RegRAIN)
library(readxl)

##LLAMAR DATOS DE EXCEL
setwd("D:/tesis_2022/05RegRAIN/PPT/")

#Leer el modelo de elevación digital para hacer la interpolación
midem <- raster('D:/tesis_2022/05RegRAIN/dem/dem_tesis.tif')
class(as.Date(as.POSIXct(misdatos$FECHA,'GMT')))
class(misdatos$LONGITUD)

r<- raster("D:/tesis_2022/05RegRAIN/PPT/RegRAIN_PPT_1980-01-16.tif")

plot(r)

#Leer los datos de precipitación para la interpolación
misdatos2 <- data.frame(as.Date(as.POSIXct(misdatos$FECHA,'GMT')), misdatos$CODIGO,
misdatos$LONGITUD, misdatos$LATITUD, misdatos$PPT )
names(misdatos2) <- c("FECHA", "CODIGO", "LONGITUD", "LATITUD", "PPT")

#Correr la interpolación
RegRAIN(misdatos2, midem, 1, 444, crossv = FALSE)
```

### Anexo 3: DATOS VIDECI



## RESUMEN DE EVENTOS ADVERSOS DE 2002 A 2016



Viceministerio de Defensa Civil - VIDECI

ID	Fecha evento	Municipio	Tipo de Evento	Fam. afec.	Fam. damn.	Has. Afec.	Gan. Afec.
1	06/02/2002	Villa Alcala	Sequia Hidrológica	882	0	0	0
2	20/02/2002	Villa Vaca Guzmán (Muyupampa)	Sequia Hidrológica	51	0	0	0
3	08/03/2002	Villa Vaca Guzmán (Muyupampa)	Sequia Hidrológica	41	0	0	0
4	16/03/2002	Poroma	Sequia Hidrológica	38	0	0	0
5	21/03/2002	San Lucas	Sequia Hidrológica	55	0	0	0
6	22/03/2002	Tarvita	Sequia Hidrológica	60	0	0	0
7	24/03/2002	Azurduy	Sequia Hidrológica	65	0	0	0
8	25/03/2002	Sucre	Sequia Hidrológica	101	0	0	0
9	10/04/2002	Poroma	Sequia Hidrológica	38	0	0	0
10	10/04/2002	San Lucas	Sequia Hidrológica	75	0	0	0
11	10/04/2002	Sucre	Sequia Hidrológica	50	0	0	0
12	10/04/2002	Tarvita	Sequia Hidrológica	146	0	0	0
13	10/04/2002	Yotala	Sequia Hidrológica	41	0	0	0
14	09/05/2002	Poroma	Sequia Hidrológica	41	0	0	0

15	09/05/200 2	Poroma	Sequia Hidrológica	75	0	0	0
16	09/05/200 2	San Lucas	Sequia Hidrológica	279	0	0	0
17	09/05/200 2	Sucre	Sequia Hidrológica	27	0	0	0
18	09/05/200 2	Yamparaez	Sequia Hidrológica	147	0	0	0
19	22/10/200 2	Sucre	Sequia Hidrológica	819	0	0	0
20	18/03/200 4	Villa Serrano	Sequia Hidrológica	388	0	0	0
21	19/03/200 4	Huacareta	Sequia Hidrológica	1109	0	0	0
22	24/03/200 4	Sucre	Sequia Hidrológica	99	0	0	0
23	31/03/200 4	Machareti	Sequia Hidrológica	120	0	0	0
24	31/03/200 4	Machareti	Sequia Hidrológica	44	0	0	0
25	31/03/200 4	Machareti	Sequia Hidrológica	51	0	0	0
26	31/03/200 4	Machareti	Sequia Hidrológica	53	0	0	0
27	31/03/200 4	Machareti	Sequia Hidrológica	19	0	0	0
28	31/03/200 4	Machareti	Sequia Hidrológica	67	0	0	0
29	31/03/200 4	Machareti	Sequia Hidrológica	24	0	0	0
30	06/04/200 4	Sucre	Sequia Hidrológica	71	0	0	0
31	07/04/200 4	Yamparaez	Sequia Hidrológica	176	0	0	0
32	08/04/200 4	Tarabuco	Sequia Hidrológica	78	0	0	0
33	12/04/200 4	Poroma	Sequia Hidrológica	176	0	0	0
34	13/04/200 4	Tarabuco	Sequia Hidrológica	35	0	0	0
35	21/04/200 4	Presto	Sequia Hidrológica	99	0	0	0

36	22/04/2004	Presto	Sequia Hidrológica	202	0	0	0
37	26/04/2004	Presto	Sequia Hidrológica	685	0	0	0
38	04/05/2004	Tarvita	Sequia Hidrológica	37	0	0	0
39	07/05/2004	Sucre	Sequia Hidrológica	62	0	0	0
40	08/05/2004	Poroma	Sequia Hidrológica	66	0	0	0
41	12/05/2004	Presto	Sequia Hidrológica	82	0	0	0
42	19/05/2004	Poroma	Sequia Hidrológica	35	0	0	0
43	22/05/2004	Tarabuco	Sequia Hidrológica	31	0	0	0
44	23/05/2004	Culpina	Helada	129	0	0	0
45	01/12/2004	Huacareta	Sequia Hidrológica	151	0	0	0
46	31/01/2005	San Lucas	Helada	300	0	0	0
47	31/01/2005	San Lucas	Helada	21	0	0	0
48	31/01/2005	San Lucas	Helada	36	0	0	0
49	31/01/2005	San Lucas	Helada	38	0	0	0
50	31/01/2005	San Lucas	Helada	51	0	0	0
51	31/01/2005	San Lucas	Helada	22	0	0	0
52	01/08/2005	Huacaya	Sequia Hidrológica	16	0	0	0
53	27/10/2005	Machareti	Sequia Hidrológica	29	0	0	0
54	27/10/2005	Machareti	Sequia Hidrológica	17	0	0	0
55	27/10/2005	Machareti	Sequia Hidrológica	16	0	0	0
56	27/10/2005	Machareti	Sequia Hidrológica	13	0	0	0
57	27/10/2005	Machareti	Sequia Hidrológica	18	0	0	0

58	07/09/2006	El Villar	Helada	0	0	0	0
59	19/03/2007	Icla	Helada	25	0	12.5	0
60	19/03/2007	Icla	Helada	25	0	12.5	0
61	19/03/2007	Icla	Helada	25	0	12.5	0
62	02/05/2008	Villa Alcala	Helada	0	0	0	0
63	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	34	0	0	0
64	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	29	0	0	0
65	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	37	0	0	0
66	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	80	0	0	0
67	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	25	0	0	0
68	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	74	0	0	0
69	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	37	0	0	0
70	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	35	0	0	0
71	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	63	0	0	0
72	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	58	0	0	0
73	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	51	0	0	0
74	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	51	0	0	0
75	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	37	0	0	0
76	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	25	0	0	0
77	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	65	0	0	0
78	29/05/2008	Villa Alcala	Helada	35	0	0	0
79	10/06/2008	Tarvita	Helada	109	0	132	0
80	10/06/2008	Tarvita	Helada	32	0	51	0
81	10/06/2008	Tarvita	Helada	83	0	160	0

82	10/06/2008	Tarvita	Helada	60	0	44	0
83	26/08/2008	Sucre	Sequia Hidrológica	0	0	0	0
84	31/10/2008	Huacareta	Sequia Hidrológica	115	0	0	0
85	31/10/2008	Huacareta	Sequia Hidrológica	300	0	0	0
86	31/10/2008	Huacaya	Sequia Hidrológica	289	0	0	0
87	31/10/2008	Huacaya	Sequia Hidrológica	300	0	0	0
88	31/10/2008	Machareti	Sequia Hidrológica	1007	0	0	0
89	31/10/2008	Machareti	Sequia Hidrológica	700	0	0	0
90	31/10/2008	Monteagudo	Sequia Hidrológica	92	0	0	0
91	31/10/2008	Monteagudo	Sequia Hidrológica	500	0	0	0
92	31/10/2008	Villa Vaca Guzmán (Muyupampa)	Sequia Hidrológica	300	0	0	0
93	23/01/2009	Machareti	Sequia Hidrológica	300	0	0	0
94	01/03/2009	Huacareta	Sequia Hidrológica	658	0	1400	0
95	30/03/2009	Machareti	Sequia Hidrológica	365	0	600	0
96	10/07/2009	Sucre	Helada	329	0	119	0
97	31/08/2009	Huacaya	Sequia Hidrológica	635	0	1089	250
98	01/10/2009	Machareti	Sequia Hidrológica	676	0	0	250
99	01/10/2009	Monteagudo	Sequia Hidrológica	23	0	0	50
100	01/10/2009	Villa Vaca Guzmán (Muyupampa)	Sequia Hidrológica	1147	0	0	250

101	01/01/2010	Villa Vaca Guzmán (Muyupampa)	Sequia Hidrológica	1298	0	824	0
102	01/01/2010	Villa Vaca Guzmán (Muyupampa)	Sequia Hidrológica	615	0	0	0
103	15/01/2010	Huacaya	Sequia Hidrológica	724	0	0	0
104	15/01/2010	Machareti	Sequia Hidrológica	1159	0	1000	0
105	15/01/2010	Monteagudo	Sequia Hidrológica	500	0	620	0
106	01/03/2010	Huacareta	Sequia Hidrológica	1340	0	4020	0
107	01/03/2010	Huacaya	Sequia Hidrológica	606	0	0	0
108	01/03/2010	Machareti	Sequia Hidrológica	622	0	0	0
109	30/03/2010	Yotala	Sequia Hidrológica	186	0	0	0
110	30/04/2010	Tarabuco	Sequia Hidrológica	1777	0	1664	0
111	30/05/2010	Machareti	Sequia Hidrológica	159	0	0	0
112	01/07/2010	Sucre	Helada	30	0	0	0
113	30/07/2010	Huacareta	Sequia Hidrológica	488	0	6076	0
114	15/12/2010	Culpina	Helada	0	800	0	0
115	03/08/2011	Huacaya	Helada	0	200	0	0
116	03/08/2011	Machareti	Helada	0	140	0	0
117	03/08/2011	Monteagudo	Helada	0	0	0	0
118	03/08/2011	Villa Vaca Guzmán (Muyupampa)	Helada	0	260	0	0

119	15/02/2012	Huacaya	Sequia Hidrológica	711	0	600	0
120	01/08/2012	Huacareta	Sequia Hidrológica	390	0	0	0
121	01/08/2012	Huacaya	Sequia Hidrológica	2150	0	7700	30
122	01/08/2012	Machareti	Sequia Hidrológica	339	0	0	0
123	15/03/2013	San Lucas	Sequia Hidrológica	1488	0	0	0
124	15/04/2013	Huacaya	Sequia Hidrológica	2119	0	0	0
125	01/05/2013	Zudañez	Sequia Hidrológica	58	0	65	0
126	02/05/2013	Tarabuco	Sequia Hidrológica	548	0	0	0
127	10/05/2013	Huacareta	Sequia Hidrológica	553	0	0	0
128	12/05/2013	Yamparaez	Sequia Hidrológica	359	0	0	0
129	15/05/2013	Azurduy	Sequia Hidrológica	1821	0	920	0
130	15/05/2013	Las Carreras	Sequia Hidrológica	274	0	0	0
131	15/05/2013	Tomina	Helada	159	0	0	0
132	15/05/2013	Villa Charcas	Sequia Hidrológica	1635	0	820	0
133	15/06/2013	Machareti	Sequia Hidrológica	1871	0	12440	0
134	15/06/2013	Villa Abecia	Sequia Hidrológica	662	0	525	0
135	15/07/2013	Camargo	Sequia Hidrológica	1390	0	369	0
136	15/07/2013	Huacaya	Sequia Hidrológica	715	0	0	0
137	15/07/2013	Presto	Sequia Hidrológica	81	0	136	0
138	30/07/2013	Huacareta	Sequia Hidrológica	803	0	4402	0
139	12/08/2013	Culpina	Sequia Hidrológica	166	0	420	0

140	10/05/2015	Huacaya	Sequia Hidrológica	283	0	0	0
141	22/09/2015	Machareti	Sequia Hidrológica	2490	0	0	0
142	02/01/2016	Las Carreras	Sequia	0	452	0	0
143	09/01/2016	Culpina	Sequia	0	160	0	0
144	23/01/2016	Tarvita	Helada	0	400	0	0
145	24/01/2016	Tarabuco	Helada	0	283	0	0
146	27/02/2016	Villa Vaca Guzmán (Muyupampa)	Sequia	0	1686	0	0
147	01/07/2016	Machareti	Sequia	0	0	0	0
148	04/11/2016	Incahuasi	Helada	0	729	0	0

## Anexo 4: INTERFACE DEL PROGRAMA

```
#librerias requeridas
import tkinter
import tkinter.filedialog
import importlib
import matplotlib.pyplot as plt
import spi_cal
importlib.reload(spi_cal)
from spi_cal import calculo

from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
import tkinter as tk

#FUNCIONES
def send():
    mes=anno=escala=None
    data_in=input_var.get()
    sal=output_var.get()
    mes=el_mes.get()
    anno=el_anno.get()
    escala=selec.get()

# Intentar
if data_in == "":
    tkinter.messagebox.showwarning("Error", "No se tiene cargo el Archivo netCDF")
if not mes in range(1,13):
    tkinter.messagebox.showwarning("Error", "Error en el MES")
if not anno in range(1980,2017):
    tkinter.messagebox.showwarning("Error", "Error en el AÑO")
if escala==0:
    tkinter.messagebox.showwarning("Error", "Seleccione una escala de tiempo")
if sal == "":
    tkinter.messagebox.showwarning("Error", "No hay carpeta ni nombre del archivo de Salida")
else:
    re = calculo(data_in,sal,escala,mes, anno)[0]
    root = tk.Tk()

    def cerrar():
        root.destroy()

    fig, ax = plt.subplots()
    canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, root)
    canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
    re.plot(cmap='RdYlGn', col_wrap=1, vmin=-3.5, vmax=3.5)
    plt.title('SPI_esc_'+str(escala)+'_mes_'+str(mes))
    plt.close()
    canvas.draw()
    button = tkinter.Button(master=root, text="Cerrar", command=cerrar)
```

```

        button.pack(side=tkinter.BOTTOM)

        root.mainloop()

#ARMADO DE LA INTERFACE DEL PROGRAMA
def interface():
    #VENTANA PRINCIPAL
    ventana.title("Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)")
    ancho=ventana.winfo_screenwidth()
    alto=ventana.winfo_screenheight()
    x_coord=(ancho/2)-(640/2)
    y_coord=(alto/2)-(400/2)
    ventana.resizable(0,0)
    ventana.geometry("%dx%d+%d+%d"%(640,400,x_coord,y_coord))

    #TITULO PRINCIPAL
    tkinter.Label(ventana,text="Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)", font =("Arial Black",
16),bg="#999999").pack()

    #TITULO INPUT
    tkinter.Label(ventana,text="DATOS DE ENTRADA", font =("Arial Black", 11)).place(x=50, y=50)

    tkinter.Label(ventana,text="Archivo netCDF :").place(x=80,y=85)
    ventana.abrir_vn=tkinter.Entry(ventana, width=45, textvariable=input_var) #ingreso archivo
NetCDF
    ventana.abrir_vn.place(x=180,y=85)
    tkinter.Button(ventana, text="...", command=abrir).place(x=460,y=80)

    TITULO3=tkinter.LabelFrame(ventana,text="Ingrese el Mes para el cálculo SPI", padx=5,
pady=5)
    TITULO3.place(x=30,y=120)
    entry=tkinter.Entry(TITULO3, textvariable=el_mes,width=4, justify="center") #ingreso del
mes
    entry.pack()
    TITULO31=tkinter.Label(ventana,text="Del 1 a 12",font =("Arial Black", 8),fg="red")
    TITULO31.place(x=220,y=135)

    TITULO9=tkinter.LabelFrame(ventana,text="Ingrese el Año para el cálculo SPI", padx=5,
pady=5)
    TITULO9.place(x=300,y=120)
    entry=tkinter.Entry(TITULO9, textvariable=el_anno,width=8, justify="center") #ingreso del
año
    entry.pack()
    TITULO91=tkinter.Label(ventana,text="De 1980 al 2016",font =("Arial Black", 8),fg="red")
    TITULO91.place(x=500,y=135)

    tkinter.Label(ventana,text="Seleccione la Escala de Tiempo",font =("Arial Black",
8)).place(x=80,y=180)

```

```

tkinter.Radiobutton(ventana, text='1 Meses', value=1, variable=selec).place(x=85,y=200)
#Seleccion escala
tkinter.Radiobutton(ventana, text='3 Meses', value=3, variable=selec).place(x=85,y=220)
tkinter.Radiobutton(ventana, text='6 Meses', value=6, variable=selec).place(x=85,y=240)
tkinter.Radiobutton(ventana, text='9 Meses', value=9, variable=selec).place(x=85,y=260)

tkinter.Label(ventana,text="DATOS DE SALIDA", font=("Arial Black", 11)).place(x=50, y=300)

tkinter.Label(ventana,text="Nombre del Archivo GeoTiff de Salida :").place(x=85,y=330)
ventana.guardar_vn=tkinter.Entry(ventana, width=30, textvariable=output_var)
ventana.guardar_vn.place(x=90,y=355)
tkinter.Button(ventana, text="...", command=guardar).place(x=280,y=350)

BtnEjecutar=tkinter.Button(ventana, text="Ejecutar SPI", command=send)
BtnEjecutar.place(x=350,y=350)

tkinter.Label(ventana,text="AUTOR: Ing.Jamil Sergio Lenz Salomón", fg="#444444",font
="times bold italic underline", 5)).place(x=460,y=380)

def abrir():
    ventana.input_file = tkinter.filedialog.askopenfilename(initialdir="/",title="Seleccione un
Archivo", filetypes=(("nc files", "*.nc"),("Todos los archivos", "*..*")))
    ventana.abrir_vn.insert("1",ventana.input_file)

def guardar():
    ventana.output_directory = tkinter.filedialog.askdirectory()
    ventana.guardar_vn.insert("2", ventana.output_directory)

ventana = tkinter.Tk()

#-----VARIABLES-----
input_var = tkinter.StringVar()
output_var = tkinter.StringVar()
selec = tkinter.IntVar()
el_mes = tkinter.IntVar()
el_anno = tkinter.IntVar()

interface()

ventana.mainloop()

```

## Anexo 5: CALCULO DEL SPI DEL PROGRAMA

```
#Librerias requeridas
import numpy as np
import xarray as xr
from scipy.stats import gamma
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')
import geopandas as gpd
import rioxarray as rio
from shapely.geometry import mapping

np.set_printoptions(suppress=True)

#####INTRODUCCION DE
DATOS#####
#####
#####
chuqui = "./CHQ/lim_chuqui.shp"
chuquisaca = gpd.read_file(chuqui, crs="epsg:4326")
#####
#####
#####
#####
def calculo(data_in,sal,escala,mes, anno):
    b0=2.515517
    b1=0.802853
    b2=0.010328
    b3=1.432788
    b4=0.189269
    b5=0.001308
    data = xr.open_dataset(data_in)
    PCP = data['pcp']

    df_sequia = PCP.sel(longitude=slice(-65.763667, -62.113666), latitude=slice(-18.303333, -
        21.553334), time=slice('1980', '2016')) # print('UNO :',df_sequia[:,155,173])

    df = np.round(np.abs(df_sequia.rolling(time=escala, center=False).mean('time')), 2)

    g_m = df.groupby('time.month')

    matriz = g_m[mes]

    NoLluvia = sum(matriz == 0)
    # logaritmo natural
    df_log = np.log(matriz)
    df_log = df_log.where(np.isinf(df_log) == 0,0)

    n = sum(matriz != 0) - sum(np.isnan(matriz))
```

```

df_sum_matriz = matriz.sum('time')
df_mean = df_sum_matriz/n

df_sumlog = df_log.sum('time')

A = np.log(df_mean) - (df_sumlog/n)
alpha = (1/(4*A))*(1+(1+((4*A)/3))**0.5)
beta = df_mean/alpha

def gamma_func(data, a, scale): return gamma.cdf(data, a=a, scale=scale)
gamma1 = xr.apply_ufunc(gamma_func, matriz, alpha, beta)
GAMMA = gamma1*(1-(NoLluvia/n))+(NoLluvia/n)

N1 = xr.where(GAMMA<=0.5, np.sqrt( np.log(1/(GAMMA**2)) ), np.sqrt(np.log(1/(1-
GAMMA)**2)))
N1 = xr.where(np.isinf(N1),0,N1)

SPI = xr.where(GAMMA<=0.5, -(N1 - ( (b0 + b1 * N1 + b2 * (N1*N1) ) / (1+ b3 * N1 + b4 *
(N1*N1) + b5 * (N1*N1)) ) ,
( N1 - ( (b0 + b1 * N1 + b2 * (N1*N1) ) / (1+ b3 * N1 + b4 * (N1*N1) + b5 * (N1*N1)) )
))
spi = SPI.sel(time=str(anno))

spi.rio.set_spatial_dims(x_dim="longitude", y_dim="latitude", inplace=True)
spi.rio.write_crs("epsg:4326", inplace=True)
spi_CH = spi.rio.clip(chuquisaca.geometry.apply(mapping), chuquisaca.crs)

# #-----PASANDO SPI A UN RASTER-----
spi.rio.to_raster(sal+'/'+'SPI_esc_'+str(escala)+'_mes_'+str(mes)+'_'+str(anno)+'.tif')
#print('PROCESO CONCLUIDO.')
#spi_CH.plot(cmap='RdYlGn', col_wrap=1, vmin=-3.5, vmax=3.5)
#plt.title('SPI_esc_'+str(escala)+'_mes_'+str(mes))
return spi_CH, escala, mes

```