

## **MARCO TEÓRICO**

### **1.1.- DEFINICIÓN DE SEQUÍA**

Una definición conceptual consensuada sin tener en cuenta la realidad climática del área afectada y sin establecer umbrales de referencia, de entre las múltiples que podemos recopilar en diccionarios y enciclopedias de este vocablo, nos permite concluir que la sequía tiene lugar cuando se produce una deficiencia de precipitaciones durante un periodo de tiempo relativamente prolongado.

Sin embargo, se requiere un conocimiento más detallado de las variables climáticas y disponer de series de datos de diferente escala según el nivel de detalle deseado (horario, diario, mensual, anual, estacional...) Wilhite y Glantz (1985) citado por Valiente O. (2001), detectaron más de 150 definiciones operacionales, categorizándolas en cuatro grupos según la disciplina científica desde la que sea analizada el fenómeno: sequia meteorológica, sequia agrícola, sequia hidrológica y sequia socioeconómica.

De hecho son solos aspectos parciales de un mismo fenómeno, que hay que abordarlo como un proceso con fases distintas; de esta manera, y siguiendo una secuencia temporal de manifestaciones o estadios lógicos, es posible ordenarlos del siguiente modo:

#### **1.1.1.- SEQUÍA METEOROLÓGICA**

Basada en datos climáticos, es una expresión de la desviación de la precipitación respecto a la media durante un periodo de tiempo determinado. Palmer (1965) citado por García (2008). La define 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 apropiado.

Las definiciones de sequía meteorológica presentan información específica para cada región particular que varía en función de las características del clima regional de tal modo que es imposible extrapolar la definición de una región a otra.

### **1.1.2.- SEQUÍA AGRÍCOLA**

Según Valiente O. (2001), por ser el primer sector económico que resulta afectado por la escases 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.

Este tipo de sequía, por depender no solo 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 periodo que dure la sequía meteorológica, no llegara a producirse una sequía agrícola. Así, una superficie de cultivo en regadío presenta una menor vulnerabilidad ante un episodio de déficit pluviométrico.

### **1.1.3.- SEQUÍA HIDROLÓGICA**

Surge cuando existe una deficiencia en el caudal o volumen de Aguas superficiales o subterráneas. Al producirse un desfase ante la escases de precipitación 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. 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 escases pluviométrica o, si las lluvias retornan en poco tiempo, no llegar a manifestarse, Morales Gil et al, (1996) citado por García (2008),

#### **1.1.4.-SEQUÍA SOCIOECONÓMICA**

Cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños (materiales o personales) a la población de la zona afectada por la escases 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 previsión 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 no producirse sequía meteorológica o ser muy leve. De esta forma, la sequía agrícola constituye en sí misma el inicio de la sequía socioeconómica.

Según Pita López (1995) citado por García (2008), la sequía socioeconómica se puede definir como un “déficit hídrico inusual que genera impactos adversos en la sociedad que la padece, alterando el normal desenvolvimiento de su vida colectiva”.

Bates (1950) citado por García (2008), definió sequía, en Estados Unidos, como el año con precipitación equivalente al 75% de la media anual, o el mes con precipitación mensual correspondiente al 60% de la media de dicho período. Más exigente es el criterio de Cole (1953) citado por García (2008), según el cual hay sequía cuando el período sin lluvia dura como mínimo 15 días.

Para Australia, Baldwin-Wiseman (1941), citado por, OMM (1996), citado por García (2008), considera sequía si tres o más meses registran una precipitación inferior al 50% de la media de precipitación. Caba J. (2008).

Bates (1953) y Baldwin-Wiseman (1941) presentan definiciones parecidas desde el punto de vista del índice que aplicaron pero con umbrales diferentes, y aunque la definición de Bates es más exigente, es más fácil determinar eventos de sequía con la definición de Baldwin-Wiseman ya que toma en cuenta el número de meses en que la situación persiste. Ambas definiciones operacionales tiene la desventaja de estar relacionadas con la media, lo cual no representa adecuadamente a los datos de precipitación.

El programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo identifica la sequía como el período con precipitación anual inferior al 60% de la media durante más de dos años consecutivos en una extensión superior al 50% del total del área donde se esté estudiando la sequía (PNUD, 1996).

Actualmente, la definición más universal de sequía se encuentra en el texto de la Convención de Lucha contra la Desertificación (CCD), elaborada por Naciones Unidas y ratificada en 1996. En este documento se entiende por “sequía” el fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción de recursos de tierras (OMM,1993).

## **1.2.- PRECIPITACIÓN**

Una nube es un agregado de pequeñísimas gotitas, un número aproximado de unas 100 por centímetro cúbico, cuyos diámetros son del orden de las 10 micras. En

general esta estructura es muy estable y las gotitas no tienden a juntarse y aumentar de tamaño. La precipitación se origina cuando el conglomerado se hace inestable y unas gotas crecen a expensas de las otras. Caba J. (2008).

Dada la gran superficie de contacto con el aire, considerada la pequeñez de las gotas, estas caen muy lentamente de rozamiento y, en consecuencia, de la resistencia que el aire opone. Por lo general, las pequeñas gotas, en su movimiento descendente encuentran capas de aire más seco y caluroso; ello hace que se evaporen antes de llegar al suelo. Caba J. (2008).

Las especies nubosas que conducen a precipitación generalmente están formadas tanto por gotitas de agua como por pequeños cristallitos de hielo. A partir de esta composición se explica el origen de las precipitaciones que pueden ser sólidas, como la nieve y el granizo, o líquidas, como la lluvia y el rocío.

Las precipitaciones se forman a partir de lo que se conoce como ciclo hidrológico. Este ciclo consta de tres etapas fundamentales, que son: la evaporación, la condensación y la precipitación.

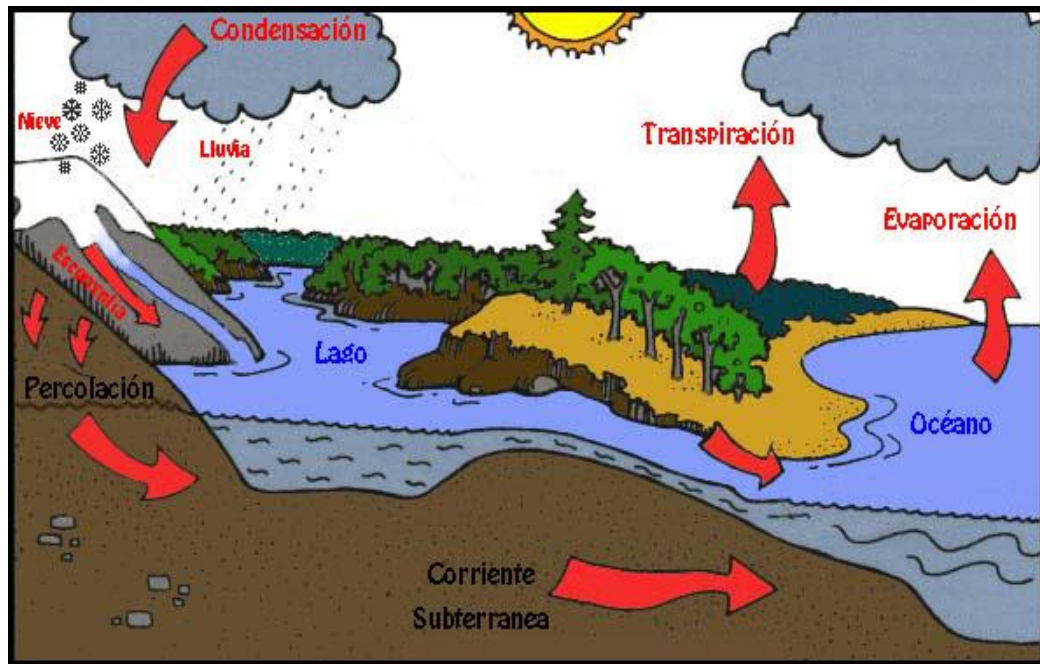


Figura N° 1 Ciclo Hidrológico

### 1.2.1.- FORMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

La precipitación se origina cuando el conglomerado, de gotas de una nube, se hace inestable y unas gotas crecen a expensas de las otras. Dos son los mecanismos que producen este efecto: la interacción entre gotitas de agua y cristales de hielo (nubes que superan el nivel de los 0° C) y la coalescencia o choque directo de las gotas. Cuando mediante estos procesos las gotas o los cristales de hielo alcanzan el tamaño adecuado, entre 0.5 a 5 mm de diámetro. En este caso la velocidad de caída es grande y la gota puede llegar al suelo, es el fenómeno de la lluvia. Caba J. (2008).

Según el primer mecanismo, interacción entre gotas de agua y cristales de hielo en una nube, se explica que al enfrentarse un cristal de hielo con gotitas de nubes subenfriadas (a temperaturas bajo cero) se produce la evaporación de estas y la condensación del vapor sobre el cristal, en consecuencia, el cristal de hielo aumentara su tamaño a expensas de las gotas de agua y, por último precipitará. Si

en su trayectoria descendente atraviesa capaz de aire caliente, licua y llega al suelo como gota de lluvia.

La segunda teoría de coalescencia de gotas, expone que en el seno de una nube coexisten pequeñas gotas de distintos tamaños, por lo tanto la velocidad de caída también será distinta. Las gotas más grandes, al caer más rápidamente chocan con otras más pequeñas y generalmente de este choque resulta la unión de ambas. De esta forma, por repetidos choques, se produce la formación de una gota de lluvia. Este fenómeno se produce principalmente en regiones tropicales.

Por otra parte, la electricidad juega un papel importante en la formación de la precipitación. En efecto se sabe que las diminutas gotas que componen una nube encierran una carga eléctrica negativa repeliéndose unas a otras, impidiendo así la formación de gotas más voluminosas. Esta fuerza de repulsión que es la base del equilibrio interno de la nube, provoca una verdadera suspensión del agua en el aire. Pero si se evacua esta electricidad por ejemplo. Por un relámpago que brota entre el suelo y la nube, o entre una nube y otra de signo contrario, el equilibrio se rompe, las gotitas pueden reunirse y la lluvia comienza. Esta hipótesis explica la iniciación de precipitaciones inmediatamente después de relámpagos. Caba J. (2008).

Como ya se dijo, para que exista precipitación primeramente debe producirse la condensación del vapor de agua contenido en la atmósfera. Casi siempre se necesita algo, sobre lo que el vapor pueda condensarse, es decir, superficies o cuerpos apropiados donde depositarse. Y en la atmósfera ese "algo" son partículas diminutas, impurezas procedentes de la Tierra. La mayoría de estas partículas son tan pequeñas que no pueden verse a simple vista y se conocen como núcleos de condensación.

### 1.2.2.- NÚCLEOS DE CONDENSACIÓN

En la atmósfera siempre hay gran cantidad de esas partículas o núcleos sobre los cuales las moléculas de vapor de agua tienden a reunirse para transformarse en líquido, formando diminutas gotas de agua. De estos núcleos hay que destacar, en primer lugar, a los llamados higroscópicos, que tienen gran afinidad por el agua, entre éstos hay que señalar las minúsculas partículas de sal suspendidas en el aire. De Fina A. Ravelo A. (1973).

Otros núcleos de condensación muy activos son las pequeñísimas gotas de ácido nítrico presentes en todo momento en el aire terrestre y cuyo diámetro es inferior a una décima de micrón. El vapor de agua también comienza a condensarse sobre ellas a humedades relativas por debajo del cien por cien. De Fina A. Ravelo A. (1973).

Gran parte de los núcleos de condensación están formados por sustancias químicas conocidas como sulfatos, que se producen en el aire a causa de la combustión de productos ricos en azufre. Por ejemplo cuando se quema carbón, el humo que se desprende contiene anhídrido sulfuroso, formado por una combinación de azufre y oxígeno. Más tarde al entrar en contacto con el vapor de agua, se transforma en ácido sulfúrico, proceso que es acelerado por la luz solar. Muchos núcleos consisten en partículas de polen y polvo levantadas de la superficie terrestre por el viento. Los corpúsculos vuelven a caer a tierra muy pronto, a causa de su peso, pero las más pequeñas flotan en el aire y pueden ser transportadas a grandes altitudes y a través de largas distancias. Caba J. (2008).



### **1.2.3.- CLASIFICACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES**

La formación de la precipitación requiere la elevación de una masa de aire húmedo en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense, hasta formar gotas lo suficientemente grandes como para vencer las corrientes ascendentes y caer a la superficie.

#### **1.2.3.1. POR SU ORIGEN**

Los mecanismos que causan el levantamiento del aire húmedo provocan que la atmósfera se enfríe. De acuerdo al origen del mecanismo que provoca dicho levantamiento del aire la precipitación puede ser convectiva, orográfica o ciclónica. Caba J, (2008).

##### **1.2.3.1.1.-PRECIPITACIÓN CONVECTIVA**

Se producen cuando el aire asciende por diferencias de temperatura a causa de un calentamiento local (ascensión convectiva). El ascenso es natural. El gradiente adiabático tiene que ser menor que el gradiente vertical medio de temperatura. Entonces el aire inestable asciende y se forman nubes de desarrollo vertical (cúmulos y cumulonimbos), dando lugar a precipitaciones de tormenta y granizo. Son propias de las regiones ecuatoriales y tropicales. En latitudes medias dan lugar a las tormentas de verano.

<http://www.rinconsolidario.org/meteorologia/webs/precipcla.htm> (Enero 2013).

### 1.2.3.1.2.- PRECIPITACIÓN OROGRÁFICA

Es la que se genera durante el ascenso de una nube sobre un relieve como lo son las montañas y las cordilleras. Esto ocurre porque el vapor de agua se eleva demasiado y su temperatura baja lo suficiente como para precipitar en forma líquida.



Figura N° 2 Precipitación Orográfica

<http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/CORDOBA/1324/trabajo/precipitacion.ht>

(Enero 2013)

### 1.2.3.1.3.- PRECIPITACIÓN FRONTAL O CICLÓNICA

Una masa de aire caliente se encuentra con una gran masa de aire frío. Como las masas de aire generalmente no se mezclan, el aire caliente asciende, deslizándose por encima del frío.

En este proceso la masa cálida sufre expansión y por consiguiente un enfriamiento. Estos frentes son más estables, forman nubes de tipo estratiforme o sea lo que va perdiendo en altura va ganando en horizontalidad, dando lugar a las manifestaciones pluviales de tipo llovizna intermitente duraderas por un día o más, origina nieblas que cubren grandes extensiones. Caba. J (2008).

### **1.2.3.2. POR SU FORMA**

La precipitación, según la forma de presentarse y su intensidad, recibe distintos nombres y está afectada por diversas circunstancias y fenómenos físicos y geográficos.

#### **1.2.3.2.1. LLOVIZNA**

Precipitación bastante uniforme que cae blandamente y está formada por gotas finísimas, muy numerosas y que parecen flotar en el aire. Es lluvia compuesta totalmente de gotas que tienen un diámetro menor a 0,5mm. Las gotitas son tan pequeñas que su caída en charcos, ríos o lagos no es perceptible a la vista. El agua que se evapora de la superficie de los mares y continentes no se queda en el aire, al menor enfriamiento se condensa en nubes que enseguida caen en forma de gotas de agua, si alcanzan 0,05milímetros de espesor se presenta la lluvia.

<http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/CORDOBA/1324/trabajo/precipitacion.html>  
(Junio 2012)

### **1.2.3.2.2.- LLUVIA**

Se denomina lluvia si es continua, regular y el diámetro de sus gotas es superior a 0,5 milímetros. Una gota de lluvia de tamaño mediano, tiene un radio del orden de 100 micrómetros ( $1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$ ), mientras que las gotas de agua que se forman en las nubes son de un radio medio mucho menor ( $20 \mu\text{m}$ ). Como el volumen de la gota es proporcional al cubo del radio, esto quiere decir que una gota de lluvia corriente se forma con más de un millón de gotitas de nube. Estos valores son aproximados, pero sirven para observar la diferencia entre los procesos de condensación (formación de la nube) y de precipitación. Caba J. (2008).

En Estados Unidos, la lluvia se identifica según su intensidad, en:

- Ligera, para tasas de caída de hasta 2.5 mm/h
- Moderada, desde 2.5 hasta 7.5 mm/h
- Fuerte, por encima de 7.6 mm/h

### **1.2.3.2.3.- NIEVE**

Precipitación sólida. Constituida por livianos cristales de hielo, la mayoría ramificados y hexagonales aglomerados en copos. Se denomina granulada la formada por granos blancos y opacos de aspecto esponjoso, de forma casi esférica con un diámetro aproximado no superior a 5mm. Se produce cuando el nivel de congelación está tan cerca de la superficie que los conglomerados de cristales de hielo no tienen tiempo de fundirse antes de llegar al suelo. La precipitación de lluvia y nieve es máxima cuando la temperatura del aire en la superficie es de  $1,5^{\circ} \text{C}$ , aproximadamente. Pocas veces nieva a temperatura del aire de más de  $4^{\circ} \text{C}$ .

Las nubes generadoras de nieve son Nimbostratus y Altostratus.

<http://www.rinconsolidario.org/meteorologia/webs/precipcla.htm> (Junio 2012)

#### **1.2.3.2.4.- GRANIZO**

Precipitación de bolitas o trozos de hielo (piedras) cuyos diámetros varían entre 5 y 50mm, o a veces, más. Pueden caer separados o en trozos irregulares aglomerados.

Para que se produzca la precipitación de granizo deben existir ciertas condiciones atmosféricas, como ser: la atmósfera debe ser inestable, es decir, deben existir condiciones de temperatura y humedad que permitan el desarrollo de tormentas eléctricas, con fuertes corrientes ascendentes. En una atmósfera inestable, una cierta cantidad de aire en ascenso continúa acelerándose en la misma dirección. A veces, la aceleración prosigue hasta que el aire alcanza la base de la estratosfera. De este modo, pueden formarse tormentas muy grandes y violentas, que producen intensas lluvias, rayos, y a veces, granizo. Caba J. (2008).

#### **1.3.- ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA (STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX SPI)**

Este índice fue desarrollado por Edwards y McKee (1993) con el propósito de definir y monitorear el déficit de precipitación en múltiples escalas de tiempo. Esta versatilidad permite monitorear la disponibilidad de agua, por ejemplo, en el suelo, la cual es susceptible a déficit de precipitación de cortos períodos de tiempo, así como también permite monitorear fuentes de agua que responden a déficit de precipitación por largos períodos de tiempo, tales como acuíferos y niveles de embalses (Bordi 2001) citado por Mendoza (2005).

El SPI permite determinar la frecuencia de la sequía o de un evento anormalmente húmedo a una escala de tiempo particular para cualquier localidad que tenga registros de precipitación. El cálculo del SPI está establecido en largos períodos de registro de precipitación en la escala de tiempo decidida. Esos registros son ajustados a una distribución de probabilidad gamma que luego es transformada en una distribución normal de media cero y varianza uno (Edwards y McKee 1997).

Este método se fundamenta en admitir que la precipitación, es el principal factor que define si un período y área determinados son o no deficientes en agua, con respecto a las condiciones normales de largo plazo. El SPI es un indicador de la “eficiencia” de la lluvia, ya que sólo estima su comportamiento temporal respecto a las condiciones normales, independientemente del uso que se dé al agua y de los demás factores naturales.

En muchos casos en que se tienen registros históricos de precipitación, con períodos estacionales cíclicos más o menos definidos de lluvia y estiaje, se ha comprobado que gran parte de los registros, en valores mensuales, muestran un ajuste aceptable a la función de densidad de probabilidad Gamma (Puche, 1987; Coronel y Llanos, 1996). Citado por Mendoza (2005).

La distribución gamma es definida por su función de densidad de probabilidad

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

para una lámina  $x > 0$ , donde:  $\beta$  es el parámetro de escala;  $\alpha$  es el parámetro de forma;  $\Gamma(\alpha)$  es la función gamma de  $\alpha$  y  $x$  es el valor de precipitación. (Edwards y McKee, 1997).

Los parámetros alfa y beta de la función de densidad de probabilidad son calculados para cada estación, para cada escala de interés (trimestral, semestral, anual, etc.) y para cada mes del año. Las soluciones de máxima verosimilitud pueden ser usadas para estimar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  Thom (1966).

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

y

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}$$

Donde

$$A = \ln \bar{x} - \frac{\sum \ln x}{n}$$

Los parámetros resultantes son usados luego para calcular la probabilidad acumulada de un evento de precipitación observado para un mes dado a la escala de tiempo que se esté trabajando para la estación en cuestión. La probabilidad acumulada está dada por

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx$$

Dado que la función gamma no está definida para  $x = 0$ , como es frecuente en los datos de precipitación, la probabilidad acumulada viene dada por:

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

Dónde:  $H(x)$  es la probabilidad de tener una lámina de precipitación menor o igual a un valor de  $x$ ,  $G(x)$  es la función Gamma Incompleta y  $q$  es la probabilidad de no tener precipitación.

El SPI en este trabajo se calculará utilizando la distribución gamma tal y como lo utiliza Edwards y McKee (1997). El SPI indica el número de desviaciones

estándar que un particular evento se desvía de las condiciones normales. Además no sólo da una idea de cómo es la condición actual con respecto a la normal sino que climas secos y húmedos pueden ser monitoreados de la misma manera y se pueden hacer comparaciones entre localidades distintas (Edwards y McKee, 1997). El SPI permite clasificar intensidades de sequía y períodos húmedos (Cuadro N°1

Cuadro N°1 Clasificación del SPI.

<b>SPI</b>	<b>CATEGORÍA</b>
-2 o menor	Extremadamente Seco (sequía extrema)
-1.50 a -1.99	Muy Seco (sequía severa)
-1.00 a -1.49	Moderadamente Seco (sequía moderada)
-0.5 a -0.99	Ligeramente Seco
0.49 a -0.49	Normal
0.50 a 0.99	Ligeramente Húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente Húmedo (exceso moderado)
1.50 a 1.99	Muy Húmedo (exceso severo)
2.00 o mayor	Extremadamente Húmedo (exceso extremo)

Fuente: McKee (1995)

### **1.3.1.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SPI:**

Hayes *et al.* (1999) citado por Núñez. Analizaron las ventajas y desventajas de la utilización del SPI para caracterizar la severidad de las sequías. El SPI tiene tres ventajas principales.

La primera es su simplicidad. El SPI está basado solamente en la precipitación y requiere sólo la estimación de los dos parámetros de la Gamma, comparado con los 68 términos necesarios para describir, por ejemplo, el PDSI (Palmer DroughtSeverityIndex), otro índice ampliamente utilizado. Al eliminar la



dependencia con las condiciones de humedad del suelo, el SPI puede ser utilizado efectivamente en las distintas estaciones del año. El SPI tampoco es afectado por la topografía.

La segunda ventaja del SPI es que puede ser calculado para escalas de tiempo variables, lo cual lo hace aplicable en el ámbito de la meteorología, agricultura e hidrología superficial y subterránea. Esta versatilidad temporal es también útil para el análisis de la dinámica de la sequía, especialmente la determinación del comienzo y el fin, lo que ha sido difícil de reconocer por medio de otros índices.

La tercera ventaja proviene de la estandarización, lo que asegura que la frecuencia de los eventos extremos en cualquier localidad y en cualquier escala de tiempo es consistente.

No obstante, el SPI tiene dos potenciales desventajas. La primera depende de la calidad de los datos de precipitación utilizados. Datos erróneos conducen a SPI erróneos.

Segundo, el SPI no es capaz de identificar regiones que son más propensas que otras a la ocurrencia de sequías.

#### **1.4.- MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL**

La medida más común de tendencia central, o localización de los datos, es la media aritmética ordinaria, seguida de la mediana y la moda.

La media está definida como:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \text{ donde } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Donde  $x_i$  es cada uno de los valores y  $n$  el número total de datos de la serie.

Si los valores  $x_i$  constituyen una muestra de una población estadística,  $\bar{X}$ , es la media de la muestra.

La media tiene en cuenta todos los valores de la serie pero es muy sensible a los valores extremos. En climatología es un parámetro fundamental, que se utiliza como indicador de variaciones espaciales de regímenes térmicos y pluviométricos. Un ejemplo de su uso son las normales climáticas. El Reglamento Técnico de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) define las normales como la media de datos climatológicos calculados para un período de 30 años consecutivos como los siguientes: 1° de enero de 1901 al 31 de diciembre de 1930, el 1° de enero de 1931 al 31 de diciembre de 1960 (OMM, 1990).

### **1.5.- MEDIDAS DE DISPERSIÓN**

Tratan de evaluar la distribución de los valores alrededor de un valor central. (Hines y Montgomery 2000).

- a) La varianza y la desviación típica son las medidas de dispersión de uso más común.

La varianza es la media aritmética de los cuadrados de las diferencias de cada valor con respecto a la media de la serie.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}$$

La desviación típica o desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza.

Dado que las variables climáticas son muestras relativamente reducidas de poblaciones bastantes más numerosas, tanto la desviación como la varianza son valores estimados, por lo que en el denominador el total de la serie se acorta en una unidad. La fórmula es:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

b) Coeficiente de Variación (CV) resulta de comparar la desviación típica con la media, generalmente expresada en porcentaje:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100$$

## **1.6.- DISTRIBUCIÓN DE LAPLACE-GAUSS O LEY NORMAL**

Se afirma que una variable aleatoria X tiene distribución normal con media  $\mu (-\infty < \mu < \infty)$  y varianza  $\sigma^2 > 0$  si tiene la función de densidad:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2}$$

(Hines *et al* 2000)

Se representa mediante una curva acampanada con un máximo central la cual se aproxima asintóticamente al eje de las abscisas. La media ( $\mu$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) son los dos parámetros que la definen. El área total comprendida entre la curva y el eje mide la probabilidad de que la variable de media  $\mu$  está comprendida entre  $-\infty$  y  $+\infty$  siendo la suma total de las probabilidades.

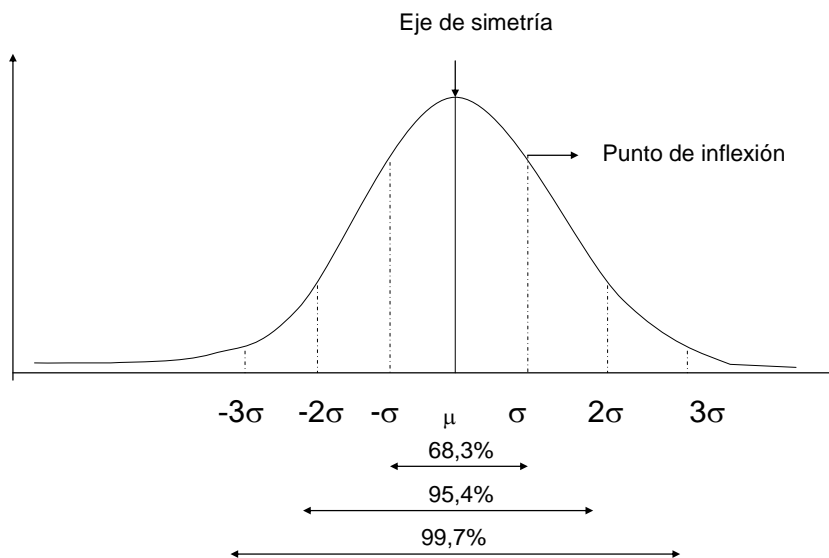


Figura N° 3. Curva de distribución normal de probabilidades (Grupo Chadule, 1994).

La función de distribución de esta ley muestra que:

- En el intervalo comprendido entre  $\mu \pm \sigma$ , se concentra el 68% de todos los valores de la variable.
- El intervalo  $\mu \pm 2\sigma$ , contiene el 95,4% de los valores.

- c) En el intervalo  $\mu \pm 3\sigma$  se sitúa el 99,7%

A fin de hacer extensibles los resultados a cualquier serie, con independencia del valor absoluto de su media y su desviación, los datos reales se transforman en valores centrados, respecto a la media y reducidos en relación a la desviación a través de

$$z = \frac{(x_i - \mu)}{\sigma}$$

Algunas características destacadas de esta nueva variable tipificada son:

- a) Expresa todos los valores de una variable, independientemente de la unidad de medida.
- b) La media es 0 y la desviación típica 1
- c) Es una medida de la dispersión no del conjunto de la serie, sino de cada uno de los valores.

La distribución normal tipificada proporciona directamente la probabilidad de obtener un valor inferior o superior a una  $Z$  determinada, así como la probabilidad de que, se encuentre entre dos valores de  $Z$ . (Mendoza 2005).

## **1.7.- DISTRIBUCIÓN GAMMA**

En climatología existe un gran número de variables como la precipitación, la velocidad del viento y la insolación cuyo límite inferior en numerosos casos es cero. En estos casos los datos no se ajustan a una distribución normal, por lo que se ha investigado sobre el ajuste a alguna otra distribución. La gamma ha sido una

de las más usadas para ajustar los datos de precipitación (Puche, 1987) citado por Mendoza (2005). Esta distribución es asimétrica, extendida a la derecha ya que sus límites varían de  $0$  a  $+\infty$ .

La distribución gamma es definida por su función de densidad de probabilidad

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Para una lámina  $x > 0$

Dónde: los parámetros que la definen son  $\beta$  (parámetro de escala) y  $\alpha$  (parámetro de forma),  $\Gamma(\alpha)$  es la función gamma de  $\alpha$  y  $x$  es el valor de la precipitación (Edwards y McKee, 1997).

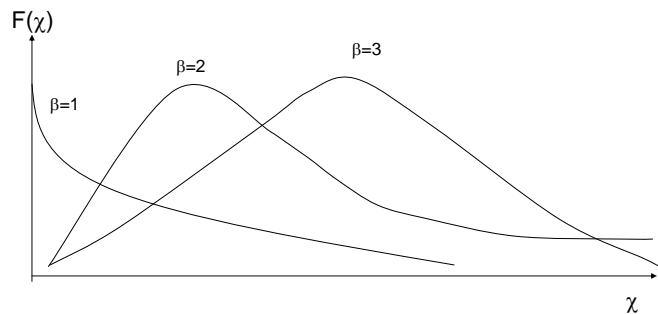


Figura N° 4. Distribución gamma para  $\alpha = 1$  (Fuente: Hines y Montgomery 2000).

Conociendo ambos parámetros puede obtenerse, como en el caso de la distribución normal, la probabilidad mediante tablas elaboradas por Pearson en las que  $\alpha = \gamma - 1$ .

Así mismo es preciso conocer:

- a) La frecuencia de casos con lluvia cero.
- b) La frecuencia con lluvia mayor a cero.

## **1.8.- ESTACIONES METEOROLÓGICAS**

Según Angaramo (2008), una estación meteorológica es un lugar escogido adecuadamente para colocar los diferentes instrumentos que permiten medir las distintas variables que afectan al estado de la atmósfera. Es decir, es un lugar que nos permite la observación de los fenómenos atmosféricos y donde hay aparatos que miden las variables atmosféricas. Muchos de estos han de estar al aire libre, pero otros, aunque también han de estar al aire libre, deben estar protegidos de las radiaciones solares para que estas no les alteren los datos, el aire debe circular por dicho interior. Los que han de estar protegidos de las inclemencias del tiempo, se encuentran dentro de una garita meteorológica.

Una garita meteorológica es una casilla donde se instalan los aparatos del observatorio meteorológico que se deben proteger. Ha de ser una especie de casilla elevada un metro y medio del suelo (como mínimo elevada 120 cm) y con paredes en forma de persiana; éstas han de estar colocadas de manera que priven la entrada de los rayos solares en el interior para que no se altere la temperatura y la humedad. La puerta de la garita ha de estar orientada al norte y la teja debe estar ligeramente inclinada. En su interior están los instrumentos que han de estar protegidos como he dicho antes por aparatos registradores.

### **1.8.1.- CÓMO FUNCIONA**

La mayor parte de la estación meteorológica están automatizadas (E.M.A) requiriendo un mantenimiento ocasional. Existen observatorios meteorológicos sinópticos, que cuentan con personal (observadores), de forma que se pueden

recoger datos relativos a nubes, visibilidad y tiempo presente y pasado. La recogida de estos datos se denomina observaciones sinópticas. Para la medida de variables en mares y océanos se utilizan sistemas dispuestos en boyas meteorológicas.

Otras instalaciones meteorológicas menos comunes disponen de instrumental de sondeo remoto como radar meteorológico para medir la turbulencia atmosférica y la actividad de tormentas. (Angaramo 2008).

### **1.8.2.- INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

Termómetro – Pluviómetro – Psicrómetro – Tanque de evaporación – Heliógrafo  
– Anemómetro – Veleta.

### **1.8.3.- VARIABLES DE MEDIDA**

Termómetro: Medidas de temperaturas en horarios determinados del día.

Pluviómetro: Medida de la cantidad de precipitación.

Psicrómetro: Medida de la humedad relativa del aire y la temperatura del punto de rocío.

Heliógrafo: Medida de las horas del sol.

Anemómetro: Medida de la velocidad del viento.

Veleta: Para registrar la dirección del viento. Angaramo (2008).



## **1.9.- PLUVIÓMETRO**

Angaramo (2008), un pluviómetro es un instrumento que mide la cantidad de agua precipitada de un determinado lugar. La unidad de medida es en milímetros (mm). Una precipitación de 5mm indica que si toda el agua de la lluvia se acumulará en un terreno plano sin escurrirse ni evaporarse, la altura de la capa de agua sería de 5mm. Los milímetros (mm) son equivalentes a los litros por metros cuadrados. El pluviómetro recoge el agua atmosférica en sus diversos estados. El total se denomina Precipitación.

El agua recogida en el depósito se introduce en una probeta graduada, y se determina entonces la cantidad de lluvia caída, es decir, la altura en mm de la capa de agua que se habría podido formar sobre la superficie horizontal e impermeable, de no evaporarse nada.

## **1.10.- EL FENÓMENO ENOS**

Instituto meteorológico nacional (IMN). El ENOS es un ciclo oceánico-atmosférico que se desarrolla en las aguas ecuatoriales del Océano Pacífico Tropical. Consta de dos fases, correspondientes a un ciclo del fenómeno: la fase cálida, conocida popularmente como El Niño y la fase fría, conocida popularmente como La Niña. Las fases están referidas a las temperaturas superficiales y subsuperficiales del Océano Pacífico ecuatorial. Además de estas temperaturas existe otro factor, representado por el Índice de la Oscilación del Sur, que constituye la componente atmosférica del fenómeno.

Ureña (2011). El Niño y La Niña son los nombres de dos fenómenos atmosféricos-oceánicos que se presentan cíclicamente en períodos variables de 2 a 7 años. Tienen mayor incidencia en el océano Pacífico y sus alrededores, a la

latitud del ecuador. Sus efectos son de alcance regional y global, pues transforman el estado del clima de casi toda la Tierra. Por ejemplo, durante el episodio de El Niño 1997-98 la temperatura en Mongolia alcanzó los 42°C y las precipitaciones en el centro de Europa ocasionaron una de las mayores inundaciones del siglo.

Este fenómeno afecta severamente la vida social, económica y política de los países, alterando su ciclo productivo y el crecimiento económico-social. En las áreas normalmente húmedas se originan prolongadas sequías, en las zonas áridas se producen torrenciales lluvias y olas de frío o de calor en distintos lugares del mundo.

Por lo general, esto representa graves pérdidas en las actividades económicas, sobre todo en las actividades primarias, por lo que afectan mucho más a los países en desarrollo donde éstas constituyen la base de su economía. Por ejemplo:

- Las sequías, aumentan la mortandad del ganado y los incendios forestales que contaminan el ambiente y provocan pérdida de la biodiversidad.
- Las lluvias torrenciales provocan graves inundaciones y aluviones de barro y rocas;
- El aumento de la temperatura de las aguas aleja de algunos bancos pesqueros especies ictícolas muy importantes por su valor comercial por lo que se perjudica la actividad pesquera.
- Otra actividad afectada es el turismo, fuente de ingreso para estos países.

Ahora bien, ¿Cómo es la circulación atmosférica-oceánica en tiempos normales?

Los vientos alisios soplan de Este a Oeste y arrastran las aguas cálidas superficiales del océano Pacífico hacia su sector occidental. Por esta razón, en las costas asiáticas y australianas, el mar se encuentra alrededor de 50 cm. más alto y con 70 C a 90 C más de temperatura que en las costas americanas. Esto provoca que:

- Frente a las costas del Sudeste Asiático, durante el verano, haya mayor evaporación de las aguas. Los vientos monzónicos transportan la humedad provocando las lluvias sobre el continente, y permiten la práctica de la agricultura intensiva, que proporciona el alimento de millones de personas;
- Frente a las costas americanas, donde circulan las corrientes frías de California y de Humboldt, se dificulta la evaporación. Esto produce que el clima en las costas sea árido y que las aguas cálidas superficiales sean de poco espesor. Este proceso permite el ascenso de las aguas profundas con los nutrientes que alimentan a la abundante fauna marina, generando una de las áreas pesqueras más productivas del mundo.

### **1.10.1. EL NIÑO**

Ureña (2011). Cuando El Niño se presenta se produce una alteración en la presión atmosférica sobre el océano Pacífico, que disminuye cerca de Tahití y aumenta al norte de Australia. Los vientos alisios se debilitan o incluso desaparecen provocando, tanto en la atmósfera como en los océanos, grandes anomalías. Los vientos alisios no tienen fuerza para arrastrar las aguas cálidas superficiales hacia las costas asiáticas, entonces regresan a las costas americanas formando la contracorriente El Niño. Ello origina efectos atmosféricos y oceánicos contrarios a los tiempos normales. Es decir, en las costas asiáticas aparecen las sequías, los incendios en los bosques, etcétera. A su vez, en las costas americanas se desatan grandes temporales tropicales, que acarrearán aluviones e inundaciones.

### **1.10.2. LA NIÑA**

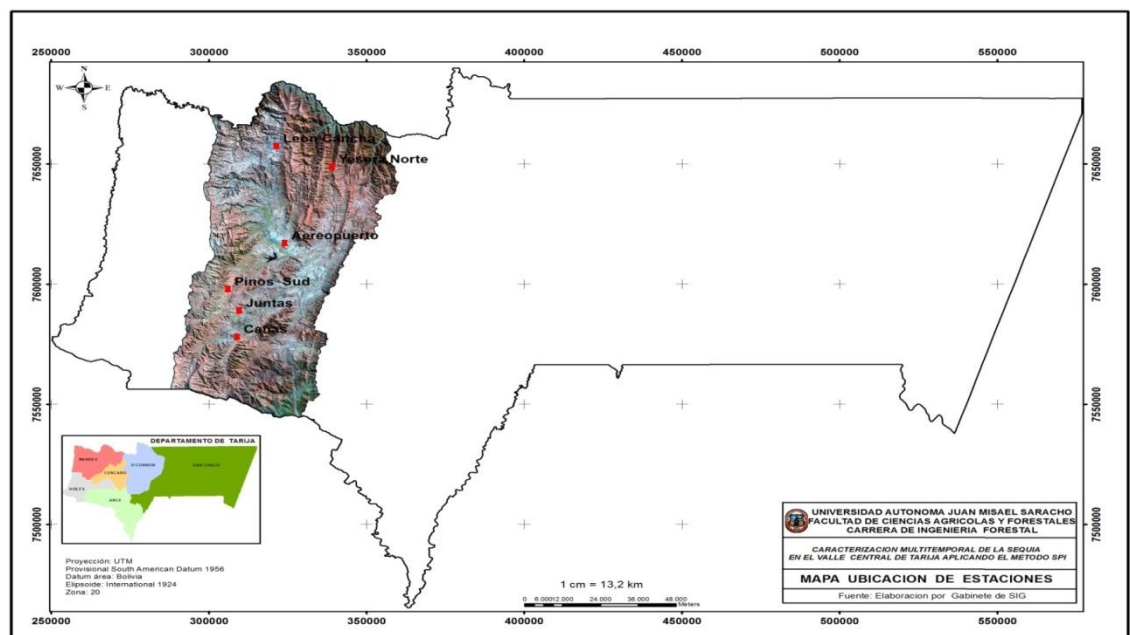
Ureña (2011). La niña por su parte, origina un mecanismo inverso al que produjo El Niño: la presión atmosférica sube en Tahití y baja en Australia, restableciendo la dirección de la circulación normal pero con más fuerza. Los vientos alisios soplan con más intensidad que la normal y arrastran hacia el Pacífico occidental

mayor volumen de agua, provocando que aflore más cantidad de agua fría en el Pacífico oriental. Esto produce precipitaciones superiores a las normales en Asia, Australia e inclusive en África del Sur. Mientras tanto, desciende la temperatura sobre las costas americanas y aumenta la aridez y la frecuencia de los huracanes en la planicie central de Estados Unidos.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.1.- UBICACIÓN

MAPA N° 1. MAPA DE UBICACIÓN



De acuerdo a Alzérreca (1999), el área de estudio comprende los límites naturales de la cuenca del Valle Central de Tarija, es decir por el Norte las cumbres que colindan con la cuenca del río Pilaya, por el Sud con la cuenca del río Orozas, por el Oeste con la cuenca endorreica del altiplano tarijeño y por el este con las cuencas de los ríos Pajonal, Nogal, Papa Chacra y Orozas, alcanzando una extensión total de 630000 Has. De las cuales 40.500 Has son aptas para la agricultura, lo que representa el 26% del área total con potencial agrícola del Departamento.

La altitud más frecuente en el Valle Central es de 1,750 a 2,100 msnm. Aunque. Dentro del perímetro del mismo, se encuentran alturas de hasta 4,614 msnm. Las Coordenadas geográficas de referencia se muestran en cuadro N° 2:

## CUADRO N° 2. COORDENADAS DEL VALLE DE TARIJA

CORDENADAS	UTM		GEOGRÁFICAS	
	MÍNIMA	MÁXIMA	MÍNIMA	MÁXIMA
LATITUD	7545136	7669973	22° 04' 53''	21° 33' 07''
LONGITUD	329237	300641	65° 03' 11''	64° 55' 07''

FUENTE: Ing. Edwin Hiza (Gabinete de SIG)

Administrativamente pertenece a las provincias Cercado, Avilés, Méndez y Arce del departamento de Tarija, que coinciden con los municipios de Cercado, San Lorenzo, Padcaya y Uriondo.

### 2.1.1.- EL MEDIO NATURAL

El aspecto general del Valle Central de Tarija es llano o suavemente ondulado, interrumpiéndose constantemente los llanos y colinas por innumerables quebradas, estrechas y profundas; los terrenos en transición lo constituyen casi en exclusiva, los depósitos procedentes de la denudación de las laderas montañosas y los conos de deyección de sus torrenteras (Alzérreca 1999).

### 2.1.2.- CLIMA

De acuerdo a SENAMHI se tienen las siguientes consideraciones: el Clima en el Valle Central según a la clasificación Climática propuesta por Thornthwaite, es semiárido mesotermal.

#### **2.1.2.1.- TEMPERATURA**

La temperatura media oscila alrededor de los 18.0°C con máximas extremas que sobrepasan los 39.0°C en verano y mínimas absolutas de hasta -9.0°C en invierno, en todo el perímetro del Valle Central esta media puede tener una diferencia de 1.0°C por encima o debajo de la normal.

Con respecto a las heladas podemos indicar que la fecha media de ocurrencia de la primera helada es del 15 de mayo y la última helada el 28 de agosto dándonos un período medio libre de heladas de 260 días.

#### **2.1.2.2.- PRECIPITACIÓN**

La precipitación media en la cuenca es de 712 mm, presenta una variación entre 400 mm en la zona oriental y superior a 1,200 mm en la parte occidental; el 85% de la precipitación está concentrada entre los meses de noviembre a marzo. Las precipitaciones son de origen orográfico, frontal y principalmente convectivo, caracterizadas por tormentas de gran intensidad y corta duración.

#### **2.1.2.3.- HUMEDAD RELATIVA**

La humedad relativa media del Valle Central es del 62 %, la región con mayor humedad atmosférica es Yesera con 68 % y la menos húmeda el CENAVIT con 54%.

En general se presenta una humedad relativamente alta en verano y baja en otoño e invierno y los meses más húmedos son febrero y marzo que en promedio tienen un 73% de humedad relativa.

#### **2.1.2.4.- LA EVAPORACIÓN**

La evaporación media diaria es de 4.41 mm, bajando este promedio los meses de invierno y elevándose en los meses de verano, la evapotranspiración calculada por el método del tanque de evaporación Tipo “A” basándose en los datos de evaporación alcanza los 1.287 mm/año.

#### **2.1.2.5.- LA RADIACIÓN SOLAR**

La radiación solar alcanza un valor promedio de 406.8 cal/cm<sup>2</sup>/mes, alcanzando los meses de invierno 150 cal/cm<sup>2</sup>/mes y sobrepasando los 605 cal/cm<sup>2</sup>/mes en verano.

### **2.1.3.- HIDROLOGÍA**



Desde el punto de vista de la hidrología (Alzérreca, 1999), el Valle Central está formado por cuatro subcuencas las que a su vez cuentan con microcuencas que en su conjunto forman la cuenca del Valle Central de Tarija.

Subcuenca del Alto Guadalquivir: Es la más extensa y accidentada de las cuatro, con una orografía muy complicada y áspera, sobre todo en el norte y noroeste. La subcuenca del río Guadalquivir tiene una pluviometría que oscila entre los 500 mm y los 1,100 mm.

Subcuenca de Tolomosa: Esta subcuenca es la menos extensa de las cuatro; orografía sencilla, con pequeños relieves en el este y muy fuertes en el oeste, la pluviometría varía entre los 500-1,300 mm.

Subcuenca del Camacho: Casi tan extensa como la del alto Guadalquivir, su zona de montaña amplia y maciza, solo interrumpida por los valles del propio río Camacho, cuenta con un largo perímetro de "pie de monte" bastante erosionado, la pluviometría oscila entre los 400 y 1500 mm.

Subcuenca de Santa Ana: La más árida de las cuatro y la que posee la mayor proporción de terrenos de Valle en relación con su superficie, la pluviometría de la subcuenca varía entre los 400 y los 600 mm.

#### **2.1.4.-VEGETACIÓN**

La vegetación natural corresponde a una estepa arbustiva semiseca y vegetación secundaria degradada y de poca cobertura, formando estratos, arbustivos y

herbáceos a lo largo de quebradas, ríos, torrentes y laderas. Las principales especies nativas son el Churqui (*Acacia Caven*), Algarrobo blanco (*Prosopis Alba*), Algarrobo negro (*Prosopis Nigra*), Molle (*Chinus Molle*), Jarca (*Acacia Visco*), Chañar (*Geogroea decorticans*), Pino del cerro (*Podocarpus parlatorei*), Aliso (*Alnus glutinosa*), Chilca (*Baccharis latifolia*), Tusca (*Acacia aroma*), Tola y otras de menor cuantía.

La agricultura en el Valle Central, se desarrolla bajo dos formas de explotación: a temporal o secano y bajo condiciones de riego. En las áreas a secano los cultivos más difundidos son el maíz para grano, el trigo, la papa, arvejas y maní. En las zonas bajo riego se cultivan: maíz para choclo y grano, papa, arveja, hortalizas, maní, alfalfa.

Entre los frutales más importantes podemos indicar la vid, manzana, durazno, frutilla, de los cuales por su valor agroindustrial se destaca la vid (Alzérreca, 1999).

Los principales cultivos de acuerdo a su nivel productivo, rendimiento, área cultivada y precios, se detallan en el cuadro N°3:

### **CUADRO N° 3. PRINCIPALES CULTIVOS EN EL VALLE CENTRAL DE TARIJA**

CULTIVOS	RENDIMIENTO	ÁREA (Ha)
Vid	13,800 Kg/ha	1,680
Durazno	9,200 Kg/ha	460
Maíz	1,200 doc/ha	850
Papa	13,800 Kg/ha	6,015
Tomate	19,200 Kg/ha	301
Arveja	5,520 Kg/ha	430
Cebolla	18,400 Kg/ha	593
Frutilla	20,500 Kg/ha	15

FUENTE. Servicio Departamental. Agropecuario (SEDAG, 2002)

### **2.1.5.- SUELOS**

Los suelos de la zona de acuerdo a la geomorfología, en la parte de valles, son moderadamente desarrollados, moderadamente profundos a profundos, con moderadas a fuertes limitaciones por erosión, originados a partir de sedimentos fluvio lacustres, aluviales y coluviales. (Plan Departamental de Ordenamiento Territorial Tarija).

## **2.2.- MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.2.1.- MATERIALES**

- Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas en el Valle Central de Tarija.
- Computadora
- Calculadora
- Datos meteorológicos de precipitaciones (SENAMHI).
- Programa para análisis estadístico (MICROSOFT OFFICE EXCEL).

## **2.3.- METODOLOGÍA**

### **2.3.1.- SELECCIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS**

Para la caracterización de la sequía en el Valle Central se utiliza el Índice de Precipitación Estandarizada, de aquí en adelante SPI (por sus siglas en inglés). Este índice necesita como único dato para su evaluación, largos registros de precipitación. Los datos de precipitación se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

El Valle Central de Tarija con una extensión de 6300 Km<sup>2</sup>, cuenta con 25 estaciones meteorológicas de las cuales 12 estaciones se encuentran en funcionamiento continuo, de estas 12 estaciones, 6 se tomaron en cuenta para este trabajo ya que contaban con la información de datos necesaria, mientras 13 fueron excluidas por tener pocos años de registro o fueron cerradas por falta de financiamiento, equipamiento y/o personal.

Es importante conocer la densidad de las estaciones en el Valle Central de Tarija, para saber si la cantidad de datos obtenidos de las estaciones son suficientes para determinar las condiciones climáticas del área.

Conociendo el número de estaciones meteorológicas que están en funcionamiento, en des uso y cuantas van a ser utilizadas para este trabajo de investigación, se procede al cálculo que tiene la siguiente relación:

**Superficie del área en estudio/Número de Estaciones**

**CUADRO N° 4. NÚMERO DE ESTACIONES**

• N° de Estaciones en todo el Valle Central	25
• N° de Estaciones paralizadas	13
• N° de Estaciones en funcionamiento	12
• N° de Estaciones en estudio	6
• Superficie del área en estudio	6300 km <sup>2</sup>

- N° de Estaciones en todo el Valle Central = 25

$$6300/25 = 252 \text{ Km}^2$$

- N° de Estaciones sin funcionamiento = 13

$$6300/13 = 484.62\text{km}^2$$

- N° de Estaciones en funcionamiento= 12

$$6300/12 = 525 \text{ Km}^2$$

- N° de Estaciones en estudio = 6

$$6300/6 = 1050 \text{ Km}^2$$

Estudiando la relación de densidad podemos indicar que en el Valle Central las 25 estaciones están ubicadas a una distancia aproximada de 252 Km<sup>2</sup>. Pero solo existen doce estaciones en funcionamiento, esto indica que la distancia aproximada para la ubicación de estas estación esta alrededor de 525 Km<sup>2</sup>. Respecto a la cantidad de estaciones consideradas para este trabajo la distancia entre estación seria de 1050 Km<sup>2</sup>.

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Pizarro (1993) citado por Rodríguez, se ha establecido que para la existencia de una buena red pluviométrica, en terrenos montañosos el ideal debe contar al menos con un pluviómetro cada 25 kilómetros. Esto indica que no contamos con una buena red pluviométrica, que las estaciones meteorológicas en el Valle Central son insuficientes.

#### **CUADRO N° 5 ESTACIONES DEL VALLE CENTRAL DE TARIJA**

<b>N°</b>	<b>ESTACIÓN</b>	<b>UBICACIÓN</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>ALTITUD</b>	<b>SERIE CLIMÁTICA</b>	<b>AÑOS DE REGISTRO</b>
1	Aeropuerto	Cercado	21° 32' 48"	64° 42' 39"	1849	1955 – 2011	57
2	El Tejar	Cercado	21° 32' 35"	64° 43' 16"	1859	1971 – 2011	41
3	Pinos Sud	Cercado	21° 44' 00"	64° 53' 00"	2100	1972 – 2011	40
4	Juntas	Avilés	21° 48' 37"	64° 47' 51"	1882	1976 – 2011	36
5	León Cancha	Méndez	21° 11' 00"	64° 43' 00"	2600	1977 – 2011	35

6	S. Andrés	Cercado	21° 37' 24"	64° 48' 54"	1987	1976 – 2011	36
	S. Jacinto S.	Cercado	21° 36' 37"	64° 43' 12"	1820	1975 – 2011	37
8	Yesera Norte	Cercado	21° 22' 20"	64° 33' 03"	2277	1977 – 2011	35
9	Cañas	Arce	21° 54' 08"	64° 51' 03"	2078	1978 - 2011	34
10	Tucumillas	Méndez	21° 27' 40"	64° 49' 52"	2557	1977 – 2011	35
11	Cenavit	Avilés	21° 41' 31"	64° 39' 29"	1730	1990 – 2011	22
12	Chocloca	Avilés	21° 44' 53"	64° 43' 46"	1795	1975 – 2011	37
13	Coimata	Méndez	21° 29' 57"	64° 47' 20"	2027	1980 – 2011	32
14	S. Quebrada	Méndez	21° 23' 11"	64° 40' 52"	2145	1986 - 2011	26
15	Trancas	Méndez	21° 18' 29"	64° 48' 57"	2198	1984 – 2011	28
16	Turumayo	Cercado	21° 33' 24"	64° 46' 42"	1978	1999 – 2011	13
17	La Merced	Arce	22° 01' 29"	64° 40' 36"	1509	1999 – 2011	13
18	Canasmoro	Méndez	21° 21' 00"	64° 45' 00"	2080	1974 – 2003	30
19	Padcaya	Arce	21° 53' 00"	64° 43' 00"	2010	1976 – 2003	28
20	Gamoneda	Cercado	21° 29' 00"	64° 38' 00"	2150	1980 – 2003	24
21	Junacas	Cercado	21° 26' 00"	64° 28' 00"	2300	1978 – 2003	26
22	L. Centro	Avilés	21° 39' 00"	64° 32' 00"	2080	1979 – 2003	25
23	Rejara	Arce	22° 01' 00"	64° 59' 00"	3000	1980 – 2003	24
24	S. Cumbre	Méndez	21° 29' 30"	64° 58' 55"	3820	1981 – 1999	19
25	Huacata	Méndez	21° 14' 19"	64° 50' 43"	2858	2002 - 2008	7

### 2.3.1.1.- ACOPIO DE INFORMACIÓN DE PRECIPITACIÓN:

La información fue acopiada de la institución especializada como es el SENHAMI.

### **2.3.2 PROCESAMIENTO DE DATOS**

#### **2.3.3.-CÁLCULO DE LOS VALORES TRIMESTRAL, SEMESTRAL, ANUAL, AÑO Y MEDIO Y DOS AÑOS.**

Para cada tres meses se determinó el valor que llamaremos trimestral, el cual corresponde a los valores de precipitación mensuales acumulados de los dos meses previos y el mes en cuestión por ejemplo la suma de las precipitaciones de noviembre y diciembre del año 2007 y enero del año 2008, fue asignada como el valor trimestral de enero de 2008, la suma de la precipitación del mes de diciembre del año 2007, enero y febrero del año 2008 fue asignada a febrero de 2008 y así sucesivamente. Lo que se denomina **suma imbricada**.

Los valores semestrales se calcularon de la misma manera que los trimestrales. El valor semestral para un mes particular, corresponde a los valores mensuales acumulados de los cinco meses previos y el mes en cuestión. El mismo procedimiento se realiza para la agrupación de 12, 18 y 24 meses.

#### **2.3.4.- EL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO (SPI)**

El SPI se calculó siguiendo el procedimiento desarrollado por McKee *et al* (1993), el cual consiste en ajustar los datos de precipitación a una función de densidad de probabilidad gamma y luego transformarlos a una función de densidad de probabilidad normal estandarizada con media 0 y varianza 1.



Los parámetros de forma  $\alpha$  y de escala  $\beta$  de la distribución gamma se calcularon para cada estación, para cada mes y para cada escala de tiempo (trimestral, semestral, anual, año y medio y dos años) a través de las soluciones de máxima verosimilitud (McKee, 1993):

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}$$

dónde:

$$A = \ln \bar{x} - \frac{\sum \ln x}{n}$$

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

dónde:  $H(x)$  es la probabilidad de tener una lámina de precipitación menor o igual a un valor de  $x$ ,  $G(x)$  es la función Gamma Incompleta y  $q$  es la probabilidad de no tener precipitación.

En la siguiente figura se muestra gráficamente el procedimiento de obtención del SPI para un mes particular. Para una lámina  $x$  dada (1) la probabilidad acumulada obtenida de la distribución gamma (2) es transformada a los valores equivalentes de una variable aleatoria normal estandarizada  $Z$  de media cero y varianza uno (3), esta variable es el SPI.

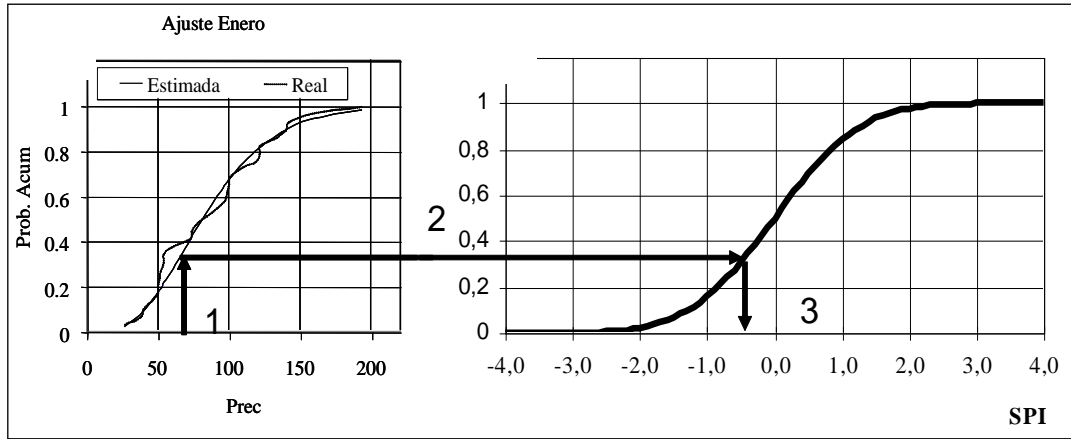


Figura 5. Ejemplo de transformación de una distribución gamma ajustada a una distribución normal estandarizada (Fuente: Mckee 1993).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. SELECCIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

El total de estaciones meteorológicas emplazadas en el Valle Central de Tarija son 25, sin embargo varias de ellas están fuera de operación o bien poseen un registro de pocos años.

Luego de un análisis de consistencia de la información, extensión de la serie y proximidad entre estas, se seleccionaron 6 estaciones para el presente estudio.

**CUADRO N° 6 ESTACIONES SELECCIONADAS.**

N°	Estación	Ubicación	Serie	Años de	Operador
1	Aeropuerto	Cercado	1955 – 2011	57	AASANA
2	Juntas	Avilés	1976 – 2011	36	SENAMHI
3	León Cancha	Méndez	1977 – 2011	35	SENAMHI
4	Cañas	Arce	1978 – 2011	34	SENAMHI
5	Pinos Sud	Cercado	1972 – 2011	40	SENAMHI
6	Yesera Norte	Cercado	1977 – 2011	35	SENAMHI

El cuadro N° 6 presenta las estaciones seleccionadas, las mismas presentan períodos de registros mayores a 30 años, cumpliéndose de esta manera la recomendación de la OMM para este tipo de estudios.

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Pizarro (1993) citado por Rodríguez, se ha establecido que para la existencia de una buena red pluviométrica, en terrenos montañosos lo ideal sería contar al menos con un pluviómetro cada 25 kilómetros. Esto indica que no contamos con una buena red pluviométrica, que las estaciones meteorológicas en el Valle Central son

insuficientes. (Revisar el subtítulo 2.3.1 Selección de las Estaciones Meteorológicas Pag-41).

### **3.2. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA Y HOMOGENEIDAD DE LOS DATOS PLUVIOMÉTRICOS.**

La información pluviométrica de cada estación fue analizada en su consistencia y homogeneidad de los datos por el método de la Prueba de RUN TES obteniendo los resultados que se presentan en el cuadro N° 7.

**CUADRO 7. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA**

<b>ESTACIÓN</b>	<b>LÍMITE INFERIOR</b>	<b>LÍMITE SUPERIOR</b>	<b>N° DE CAMBIOS</b>	<b>ALTERNANCIA (U) RUN TES</b>
El Aeropuerto	24.7	32.4	30	HOMOGENEA
Pinos Sud	17	23	19	HOMOGENEA
Juntas	15.2	20.8	18	HOMOGENEA
León Cancha	14.75	20.3	17	HOMOGENEA
Cañas	14.3	19.7	16	HOMOGENEA
Yesera N	14.7	20.5	18	HOMOGENEA

El Cuadro N° 7, muestra que los datos de las estaciones elegidas para el presente trabajo tienen una distribución homogénea, por lo que es posible utilizar dicha información.

### **3.3. DETERMINACIÓN DEL SPI A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES.**

McKee. Desarrolló el Índice de Precipitación estandarizada (SPI por sus siglas en inglés) para cuantificar el déficit de precipitación acumulada para múltiples escalas de tiempo o períodos de antelación.

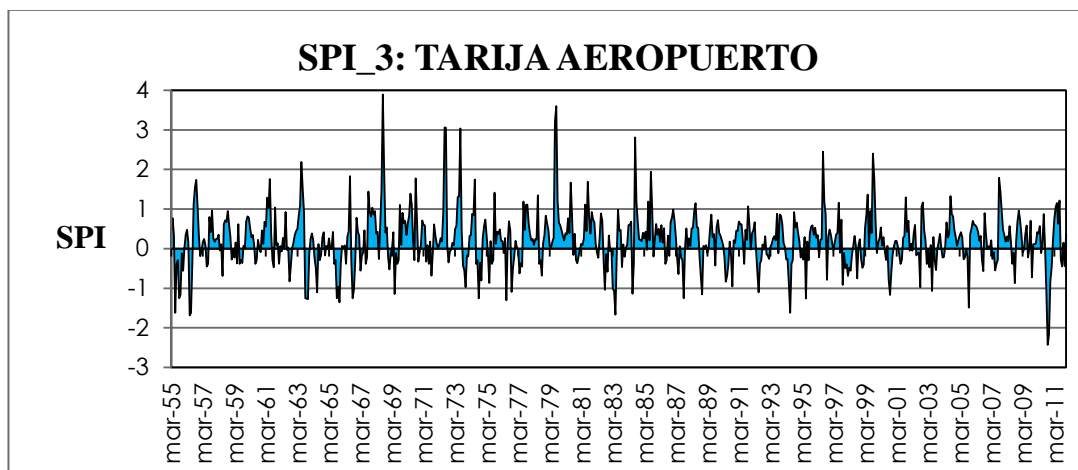
En las siguientes gráficas conoceremos como los valores del SPI presentan alta sensibilidad a los cambios de la precipitación acumulada durante el periodo trimestral, por lo cual cambian de positivo a negativo en cortos periodos de tiempo.

En series de tiempo de seis meses en adelante cada nuevo registro de precipitación tiene menor incidencia en el total acumulado del periodo correspondiente, por lo cual los valores del SPI se estabilizan y definen con mayor claridad el déficit de la lluvia.

Otra característica es la alta ocurrencia de eventos de sequía de corta duración en las escalas de corto plazo; en escalas de tiempo mayor el número de eventos de sequía se reduce, pero su duración aumenta.

### **3.3.1 SPI\_3, SPI\_6, SPI\_12, SPI\_18, SPI\_24 ESTACION DEL AEROPUERTO**

#### **FIGURA N°6 SPI\_3**



En la figura 6 se presentan eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-55, jun-58, sep-62, oct-65, marz-67, ene-69, sep-71, oct-nov-73, nov-74, may-75, nov-76, abr-77, sep-78, nov-82, may-87, oct-88, may-jun-oct-90, may-92, may-94, oct-96, oct-97, feb-abr-sep-98, sep-nov-00, sep-02, sep-03, sep-06, jun-07, sep-08, oct-09, dic-10.

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en sep-oct-55, sep-oct-nov-63, jun-64, sep-nov-65, sep-oct-66, may-69, sep-74, jun-oct-76, sep-82, mar-abr-83, jun-84, sep-87, nov-88, jun-92, jun-95, oct-00, jun-03, oct-05, sep-10.

Los eventos de **sequía severa** son menos frecuentes y se presentaron en jun-55, may-jun-56, may-83 y jun-94.

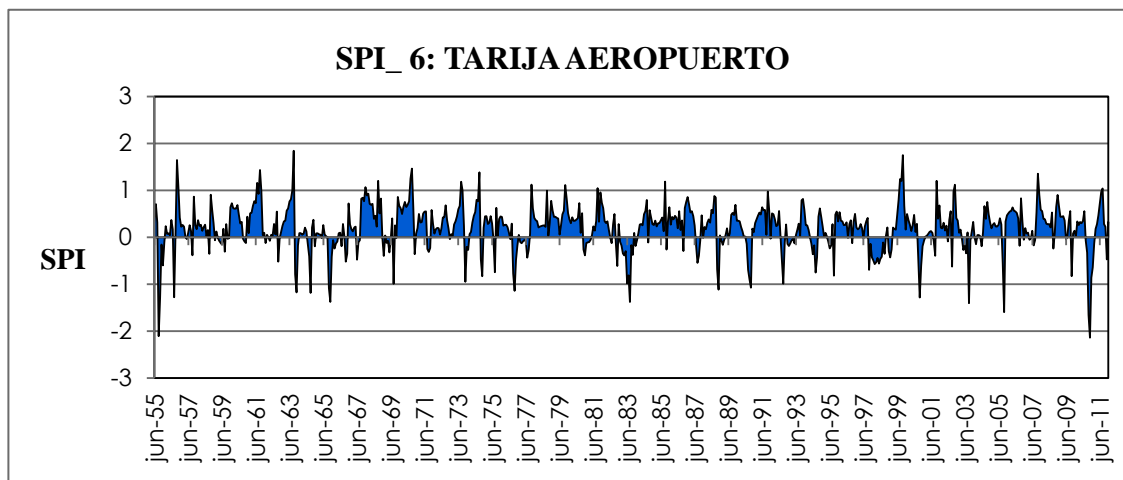
Se presentaron 2 eventos de **sequía extrema** en octubre de 2010 y noviembre del mismo año.

La escala temporal en esta figura es de tres meses, ya que se considera que un déficit o exceso de precipitación de esta duración tienen consecuencias negativas significativas en la producción agrícola.

En la figura N°6 de la estación del Aeropuerto se observa que hay casi la misma cantidad de periodos húmedos como secos, enfocándose solo en los periodos

secos las intensidades de SPI\_3 denotan que hay más eventos de sequía leve (-0.5 a -0.99) y sequía moderada (-1 a -1.49), los cuales se caracterizan por ser de corta duración, se puede distinguir también sequía severa (-1.5 a -1.99) y si se observa toda la serie desde el año 1955 hasta 2011 se destaca el año 2010 porque se presentan sequías extremas (valor menor a -2).

**FIGURA N°7 SPI\_6**



La figura N° 7, presenta los eventos de sequía en períodos de 6 meses en la estación del Aeropuerto, compara la precipitación para ese lapso, con los mismos 6 meses del período histórico.

El SPI de 6 meses indica tendencias a mediano plazo esta agrupación es la que mejor refleja la Sequía Hidrológica (embalses, aguas superficiales y aguas subterráneas).

En la figura N° 7 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-55, oct-62, oct-63, oct-66, nov-73, nov-74, ago-75, sep-76, nov-82, jun-jul-83, ago-87, oct-88, ago-sep-90, sep-92, ago-94, sep-95, oct-97, feb-mar-may-98, nov-00, sep-02, sep-05, oct-09, dic-10 y ene-11.

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en oct-55, ago-56, nov-63, sep-64, oct-nov-65, oct-76, ago-83, nov-88, oct-90, oct-00 y sep-03

Los eventos de **sequía severa** son menos frecuentes y se presentan en octubre de 2005 y octubre de 2010.

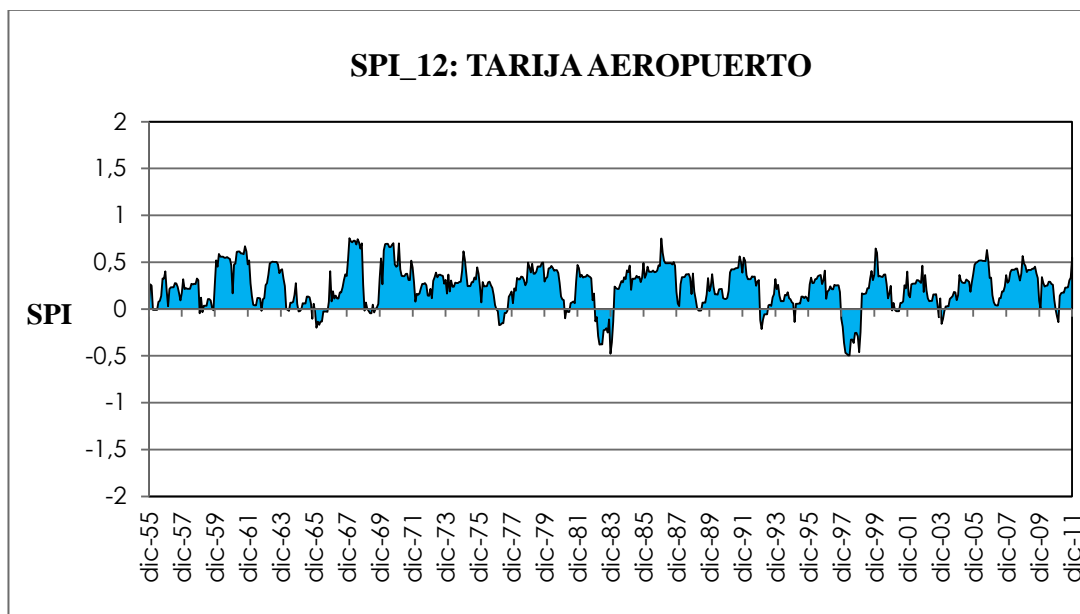
Se presentan 2 eventos de **Sequía extrema** en el mes de septiembre de 1955 y noviembre de 2010.

En la figura N°7 de la estación del Aeropuerto se puede observar que hay más periodos húmedos que secos, teniendo en cuenta los periodos secos las intensidades de SPI\_6 denotan que hay más eventos de sequía leve (-0.5 a -0.99) y sequia moderada.

En cuanto a la sequía severa está se presenta en el semestre mayo-octubre 2005 y mayo-octubre del 2010; por último se presentan eventos de sequía extrema en el semestre abril-septiembre 1955 y mayo-octubre del 2010.

**FIGURA N°8. SPI\_12**

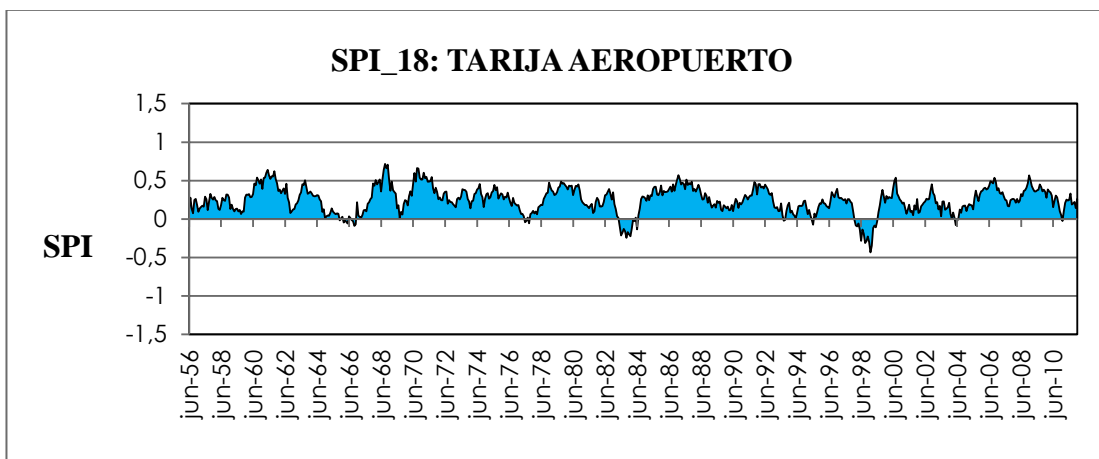




La figura N°. 8 muestra que no se presentan sequías moderadas, severas o extremas en la estación del Aeropuerto de Tarija en periodos de 12 meses, tan solo se presentan sequías leves durante los años 1983 y 1998, los mismos que coinciden con los eventos del fenómeno del niño severo que se reportaron en esos años.

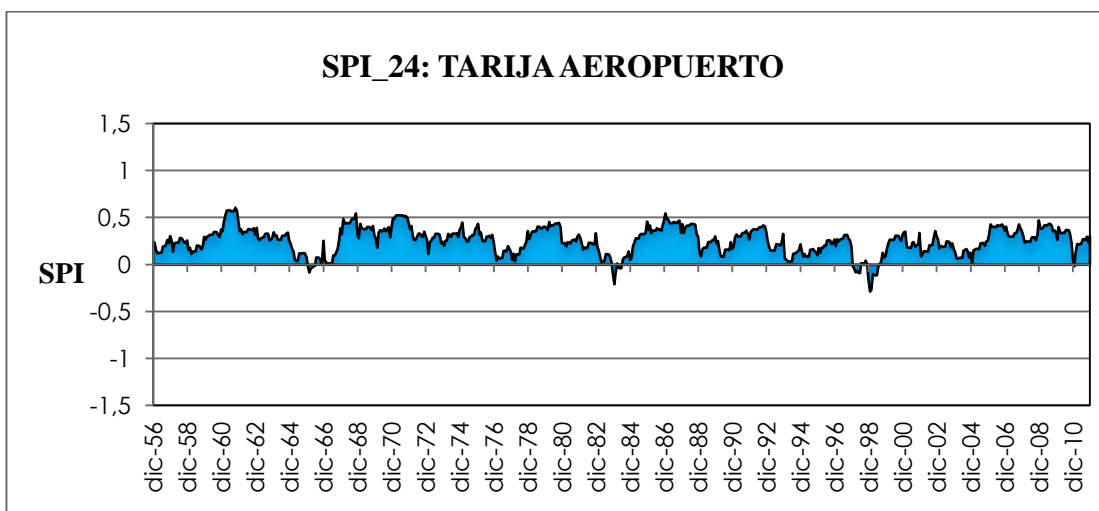
También se destaca que la sequía extrema del semestre may-oct 2010, se atenúa hasta desaparecer esa condición luego de las precipitaciones de los meses de verano.

**FIGURA N°9 SPI\_18**



En la figura N°. 9, se observa que aún se presenta una condición de sequía aunque muy leve durante los años 1983-1984 y 1998-1999.

**FIGURA N°10 SPI\_24**

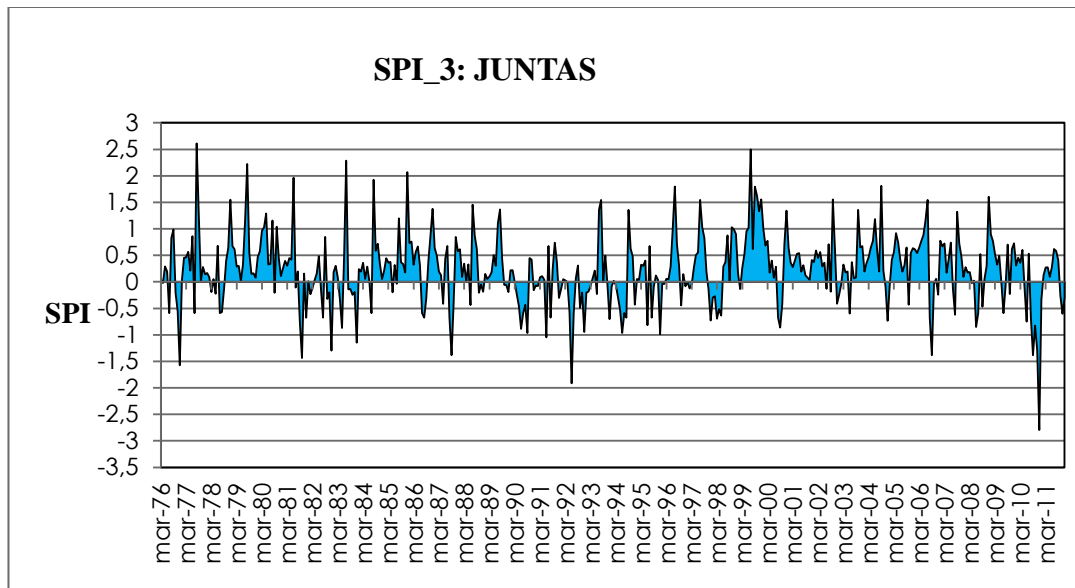


En la Figura N°. 10, el SPI para 24 meses presenta valores positivos, es decir hay predominancia de periodos húmedos; es posible todavía observar sequías muy leves en los años 1983-1984 y 1998-1999.

De acuerdo a los datos del SPI\_18 y SPI\_24 e incluso SPI\_12, en la estación del Aeropuerto de Tarija, no se presentan sequías de duración prolongada, siendo las más frecuentes las sequías de corta duración en periodos de 3 y 6 meses.

### 3.3.2 SPI\_3, SPI\_6, SPI\_12, SPI\_18, SPI\_24 ESTACION DE JUNTAS

FIGURA N° 11 SPI\_3



En la figura N°11 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: jul-nov-76, jul-77, jul-ago-78, sep-dic-81, ago-82, may-83, jul-84, jul-ago-86, ago-87, jun-jul-sep-90, ago-91, may-jul-dic-92, dic-93, may-jun-jul-ago-94, jun-ago-dic-95, dic-97, mar-abr-may-98, ago-sep-00, jun-03, dic-04, ago-06, ago-07, jun-jul-08, jul-09, jun-ago-oct-10 y nov-11.

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en con menor frecuencia en oct-81, dic-82, dic-83, sep-87, jun-91, sep-06, sep-nov-10.

Se presentaron 2 eventos de **sequía severa** en los meses de diciembre de 1976 y junio de 1992.

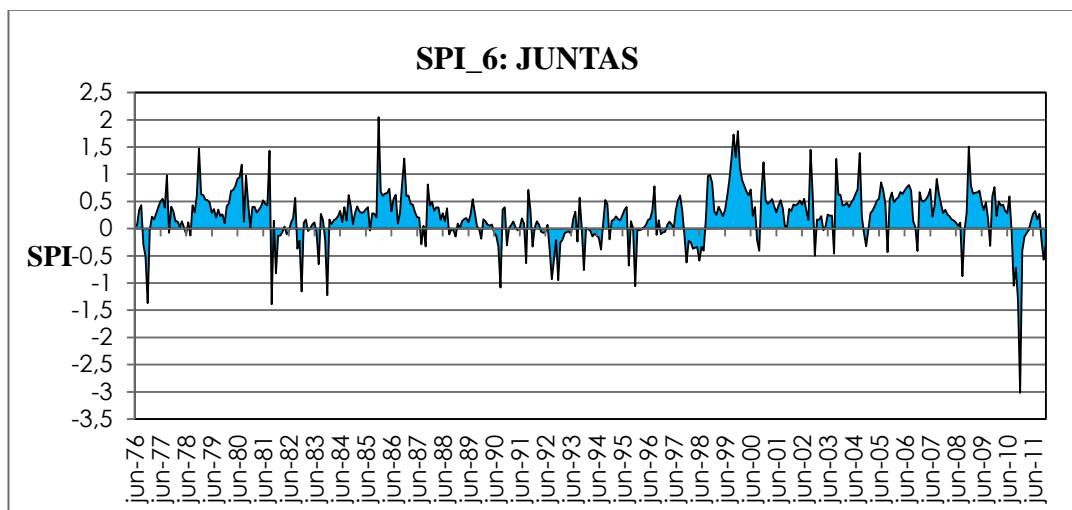
En el mes de diciembre de 2010 tenemos un evento de **sequía extrema**.

En la figura N°11 de la estación de Juntas se puede observar que hay casi la misma cantidad de periodos húmedos como secos, enfocándose solo en los periodos secos las intensidades de SPI\_3 denotan que hay más eventos de sequía leve (**-0.5 a -0.9**), en cuanto a la sequía moderada (**-1 a -1.49**) se observa menos casos, estos eventos de sequía leve y moderada los cuales se caracterizan de corta duración.

Se puede ver también sequía severa (-1,5 a -1,99), en el mes de diciembre de 1976 y junio de 1992.

Observando toda la serie de estudio desde el año 1976 hasta 2011 se destaca el año 2010 en el mes de diciembre una sequía extrema (menores a -2) está se viene tornando de leve a moderada desde el mes de agosto hasta volverse sequía extrema en diciembre. Es el único suceso de sequía extrema que se presenta en los 36 años de registro (1976-2011).

**FIGURA N° 12 SPI\_6**



En la figura N°12 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: nov-76, dic-81, ago-83, sep-91, sep-oct-dic-92, dic-93, sep-95, dic-97, jun-98, sep-08, oct-10 y nov-11.

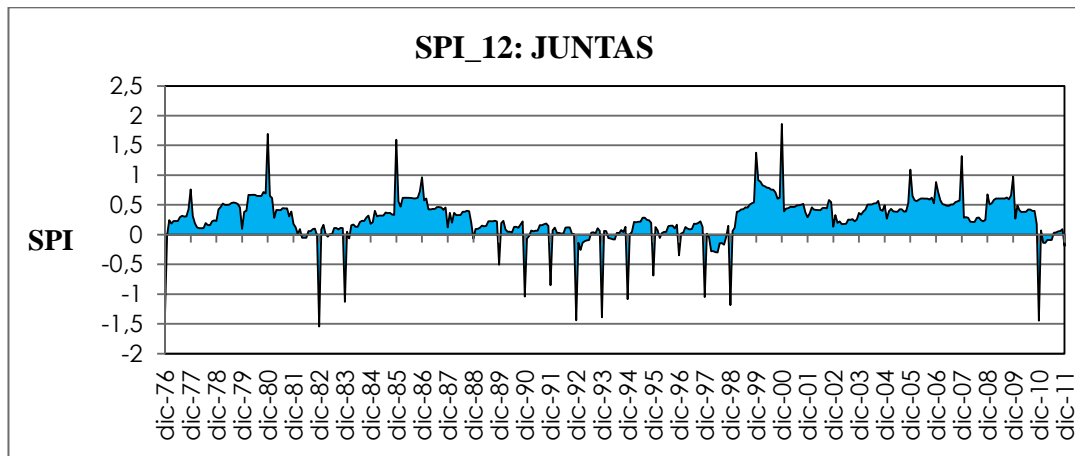
Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-76, oct-81, dic-82, dic-83, sep-90, dic-95, sep-10 y nov-10.

Se presenta un evento de **sequía extrema** en el mes de diciembre del año 2010.

En la estación de Juntas con agrupación SPI\_6 compara la precipitación para ese lapso, con los mismos 6 meses del período histórico. El SPI de 6 meses indica tendencias a mediano plazo esta agrupación es la que mejor refleja la Sequía Hidrológica (embalses, aguas superficiales y aguas subterráneas).

En la figura N° 12 de la estación de Juntas se puede observar que hay más periodos húmedos que secos, teniendo en cuenta los periodos secos las intensidades de SPI\_6 denotan que hay más eventos de sequía leve (-0.5 a -0.99) y en cuanto a sequía moderada (-1 a 1.49) que presenta menos casos, no se manifiesta eventos de sequía severa (-1.5 a -1.49), pero si un evento de sequía extrema (menor a -2) que tiene mayores efectos, esta se presenta en el mes de diciembre de 2010. Esta sequía se viene tornando desde el mes de septiembre hasta diciembre, es el único periodo en el cual este fenómeno se manifiesta como sequía extrema en los 36 años (1976-2011).

**FIGURA N° 13 SPI\_12**



En esta figura los eventos de **sequía leve** son menos frecuentes y se presentan en el mes diciembre de 1989, diciembre de 1991 y en el mes diciembre 1995.

Los sucesos de **sequía moderada** se presentaron con mayor frecuencia en los siguientes periodos y años: dic-76, dic-83, dic-90, dic-92, dic-93, dic-94, dic-97, dic-98 y dic-10.

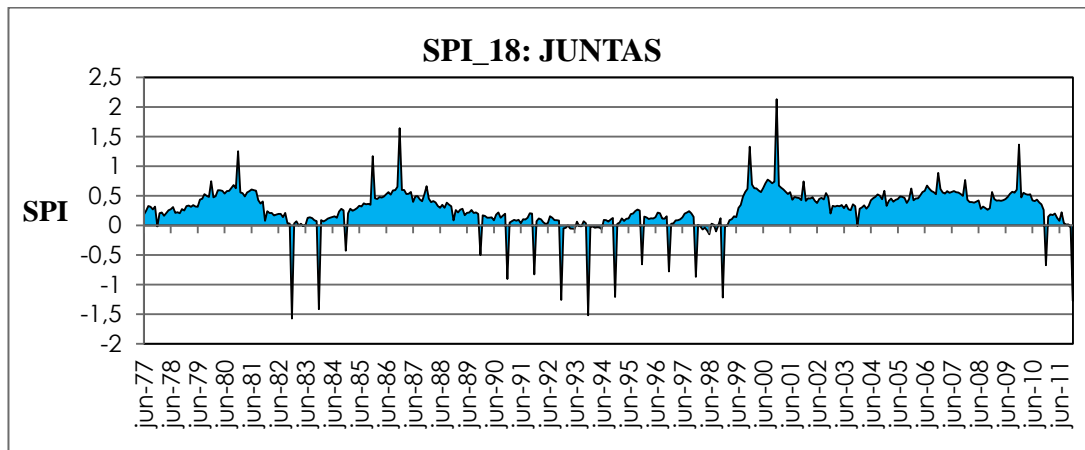
Y por último se observa un evento de **sequía severa** en el mes de diciembre de 1982.

En esta figura se distingue mejor lo dicho anteriormente que en series de tiempo de seis meses en adelante cada nuevo registro de precipitación tiene menor incidencia en el total acumulado del periodo correspondiente, por lo cual los valores del SPI se estabilizan y definen con mayor claridad el déficit de la lluvia.

En este grafico se observa más sequía moderada (-1 a -1.49) y en el mes de diciembre de 1982 existe sequía severa (-1.5 a -1.99), no se observa sequía extrema.

Los años más afectados por la sequía fueron el año 1982 -1983, la década de los 1990 y el año 2010.

**FIGURA N°14 SPI\_18**



En la figura N° 14 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-89, dic-90, dic-91, dic-95, dic-96, dic-97 y dic-10.

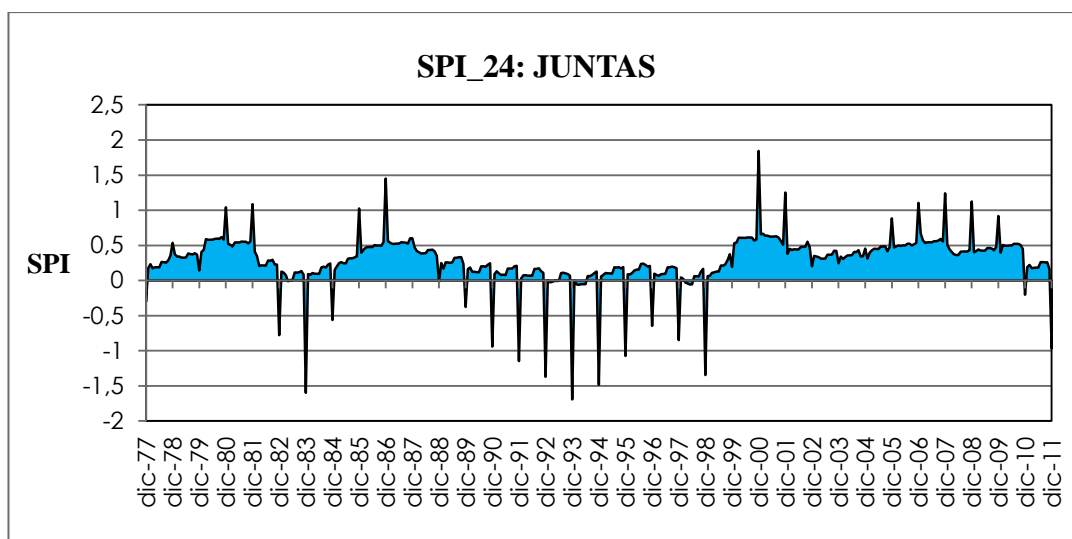
Los eventos de **sequía moderada** son menos frecuentes y se presentaron en dic-83, dic-92, dic-94, dic-98 y dic-11.

Se presentaron 2 eventos de **sequía severa** en el mes de diciembre 1982 y en diciembre de 1993.

También observamos tenemos más períodos de precipitación que tiempos de sequía, aunque también observamos dos años en los cuales existe sequia severa (-1.49 a -1.99) en diciembre del 1982 y 1983.

La sequía leve (-0.5 a -0.99) y moderada (-1 a -1.49) se presentan casi con la misma frecuencia, la década de 1990 es la más afectada por la sequía.

**FIGURA N°15 SPI\_24**



En la figura N°15 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-82, dic-84, dic-90, dic-96, dic-97 y dic-11.

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-91, dic-92, dic-94, dic-95 y dic-98.

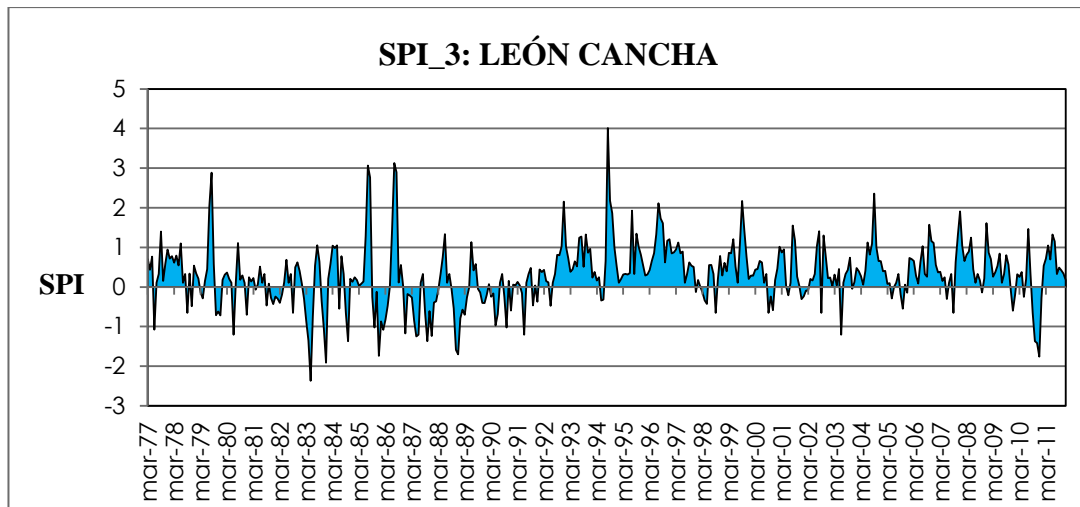
Los eventos de **sequía severa** son menos frecuentes y se presentaron en el mes de diciembre de 1983 y diciembre 1993.

En la estación de Juntas SPI\_24 distinguimos que presenta sequia leve (-0.50 a -0.99) el mes de diciembre de 1982 y ya en diciembre del año 1983 reaparece como sequia severa (-1.5 a -1.99), retornando a sequia leve en el año 1984. Esta agrupación también se ve afectada por la sequía la década de 1990 viéndose más afectado el año 1993 con una sequía severa.

### 3.3.3 SPI\_3, SPI\_6, SPI\_12, SPI\_18, SPI\_24 ESTACION DE LEÓN CANCHA



**FIGURA N°16 SPI\_3**



En la figura 16 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años sep-78, oct-nov-dic-79, dic-80, sep-82, mar-jun-83, jun-sep-84, oct-85, ene-mar-86, abr-sep-nov-87, oct-88, ene-feb-mar-89, may-jun-dic-90, jun-91, sep-98, sep-nov-00, sep-02, oct-05, sep-07, dic-09 y sep-10.

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en jun-77, jun-80, abr-nov-83, oct-84, oct-85, feb-86, dic-86, may-jun-oct-dic-87, oct-90, jun-91, jun-03, oct-nov-10.

Los eventos de **sequía severa** son menos frecuentes y se presentaron en dic-83, dic-85, nov-dic-88 y dic-10.

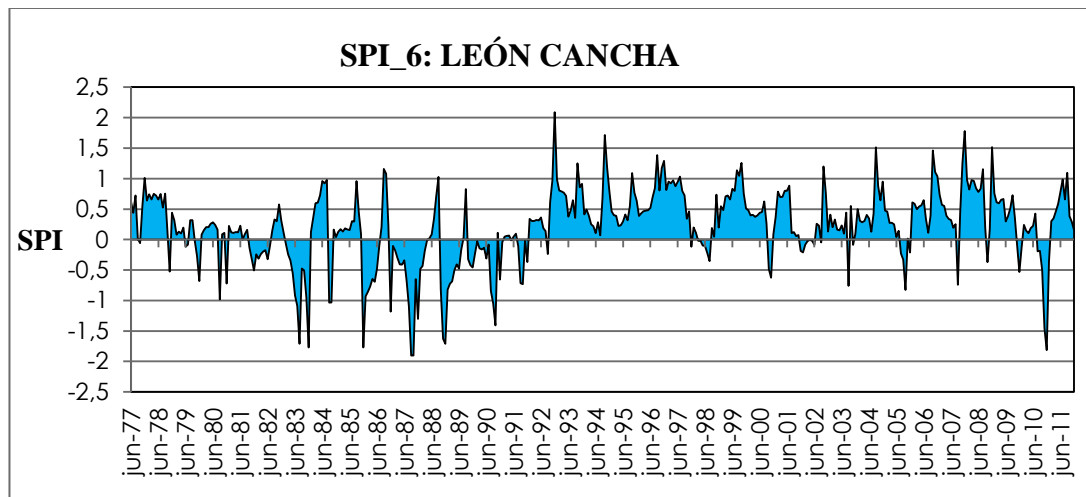
Se presentaron 1 eventos de **sequía extrema** en el mes de mayo de 1983.

En la figura N°16 de la estación del León Cancha se puede observar que hay periodos húmedos como secos en si las intensidades de SPI\_3 denotan que hay más eventos de sequía leve (0 a -0.5) y sequia moderada (-0.5 a -0.99) mientras que en la categoría severa (-1,50 a -1,99) y extrema (menores a -2) no se presentan muchos casos.

Hay que resaltar que en el mes de noviembre del año 1983 se nota sequia moderada volviéndose sequia severa en diciembre del mismo año.

Analizando toda la serie de registro vemos que en la década de 1980 es la más afectada por este fenómeno, y en el año 2010 se observa sequía en los meses septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

**FIGURA N° 17 SPI\_6**



En la figura N°17 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años Nov-78, dic-79, Sep-dic-80, dic-81, may-jun-oct-nov-83, ene-feb-mar-abr-may-86, jul-nov-87, oct-88, ene-feb-mar-89, ago-dic-90, sep-oct-91, nov-00, sep-03, oct-05, sep-07, dic-09 y oct-10.

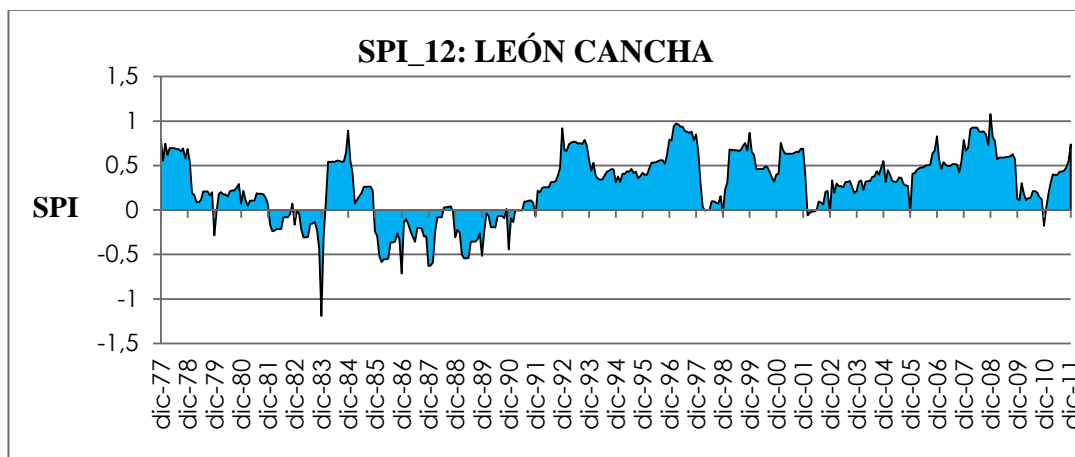
Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en jul-83, sep-oct-84 dic-86, ago-dic-87, sep-oct-90 y nov-10.

Se presenta **sequía severa** en los años: ago-dic-83, dic-85, sep-oct-87 nov-dic-88 y dic-10.

Analizando la serie de registro se puede observar que la década de 1980 es la más afectada por la sequía, los años más afectados son el año 1983 – 1987 1988.

En el año 2010 se observa una sequía severa (-1.5 a -1.99) que empieza con una sequía leve (-0.5 a -0.99) en el mes de octubre finalizando en el mes de diciembre del mismo año.

**FIGURA N°18 SPI\_12**



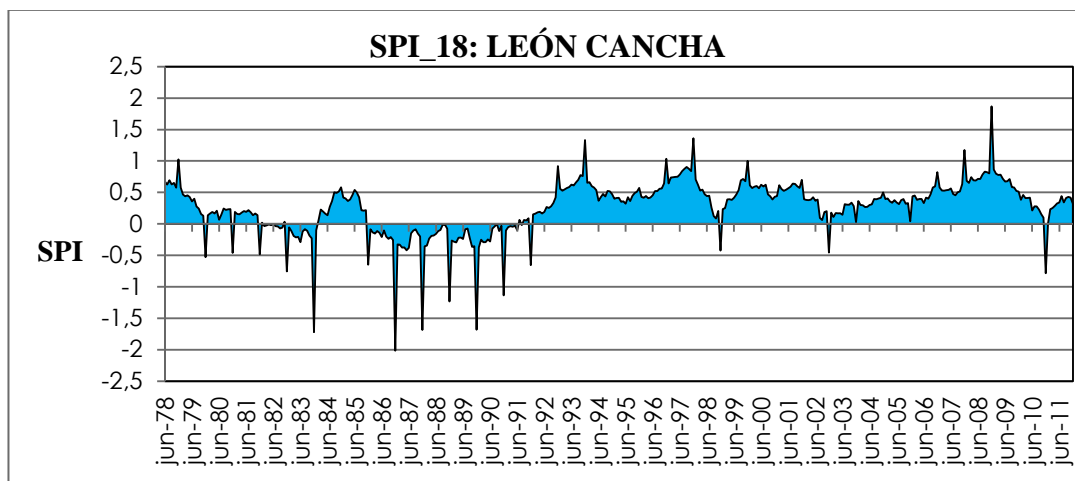
En la figura N°18 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: feb-mar-abr-may-jun-dic-86, dic-87, ene-feb-88, mar-abr-may-jun-dic-89.

Solo se observa un caso de **sequía moderada** en el mes de diciembre 1983.

En la estación de León Cancha SPI\_12 observamos más periodos húmedos que secos, entre los periodos secos, la década de 1980 es la que presenta más eventos de sequía leve (-0.5 a -0.99) y un solo caso de sequía moderada en diciembre del año 1983.

No se observa sequia severa (-1.5 a -1.99) ni sequía extrema (menor a -2).

**FIGURA N°19 SPI\_18**



En la figura N°19 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años dic-79, dic-82, dic-85, dic-91y dic-10.

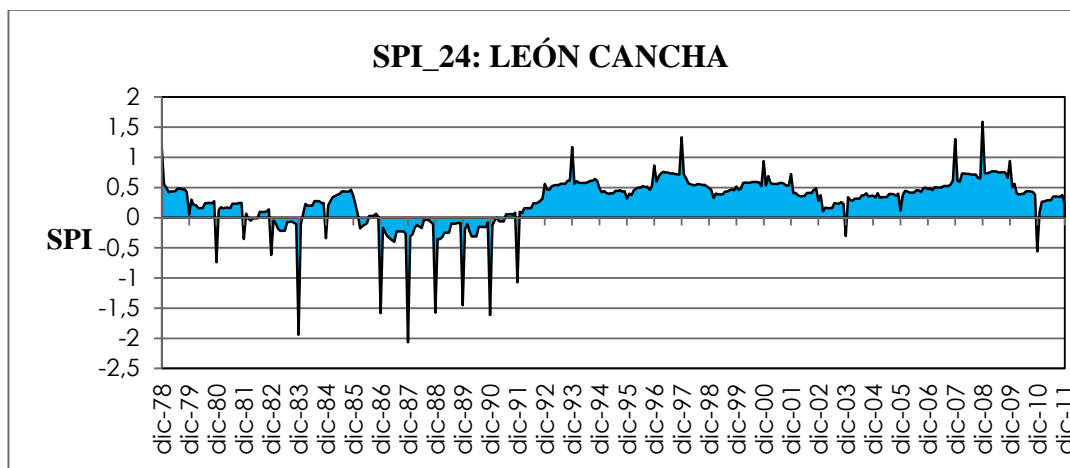
Se presentaron 2 eventos de **sequía moderada** en el mes de diciembre 1988, y en el mes diciembre 1990,

Se observa tres eventos de **Sequia severa** los cuales se presentan en los meses de diciembre de 1983, diciembre de 1987 y diciembre de 1989.

En el mes de diciembre de 1986 se presenta un evento de **sequía extrema** el cual coincide con los eventos del fenómeno del niño severo que se reportan en ese año.

En esta figura observamos que el primer evento se **sequia severa** (-1.5 a -1.99) empieza en el mes de diciembre del año 1983 y en el año 1986 se presenta una sequía extrema (menor a -2), de aquí en adelante las sequias se frecuentan hasta el año 1990.

**FIGURA N°20 SPI\_24**



Se presentan tres eventos de **sequía leve** en los meses de diciembre de 1980, diciembre de 1982 y diciembre de 2010.

Los eventos de **sequía moderada** son menos frecuentes y se presentan en diciembre 1989 y diciembre 1991.

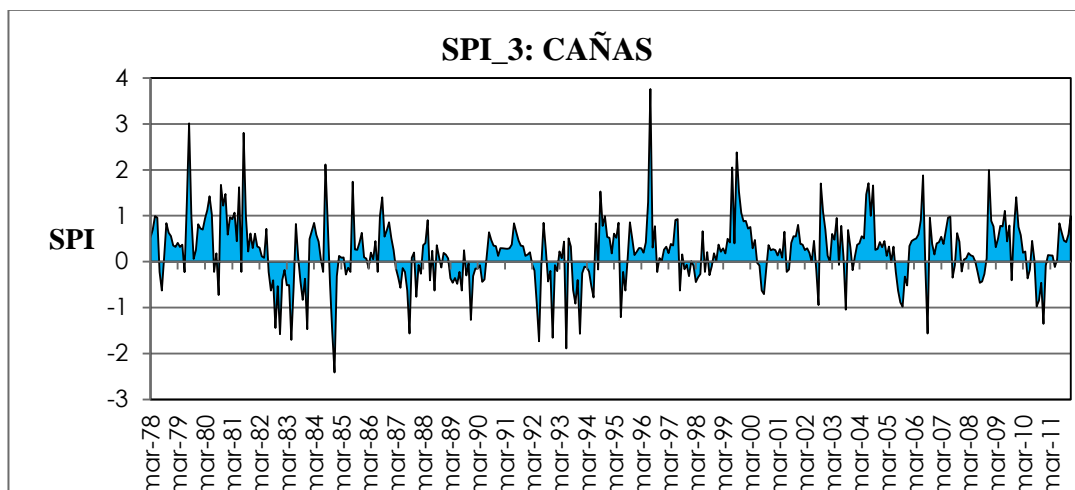
Los eventos de **sequía severa** son más frecuentes y se presentaron en dic-83, dic-86, dic-88 y dic-90.

Se observa un evento de **sequía extrema** en el mes de diciembre del año 1987.

En esta figura con agrupación de 24 meses es muy parecida a la gráfica N° 19 con agrupación de 18 meses donde a partir del año 1986 las sequías se van presentando con mayor reiteración hasta el año 1991. El año que fue más afectado es el año 1987 ya que se presenta una sequía extrema.

### 3.3.4 SPI\_3, SPI\_6, SPI\_12, SPI\_18 Y SPI\_24 ESTACION DE CAÑAS

FIGURA N°21 SPI\_3



En la figura N° 21 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: Ago-78, sep-80, ago-nov-82, mar-abr-jun-oct-83, may-ago-dic-87, ago-88, ago-89, may-92, sep-oct-93, may-jun-94, ago-95, ago-97, ago-sep-00, sep-02, ago-sep-oct-dic-05 y sep-oct-10.

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en oct-82, dic-83, dic-89, jun-95, sep-03, dic-10.

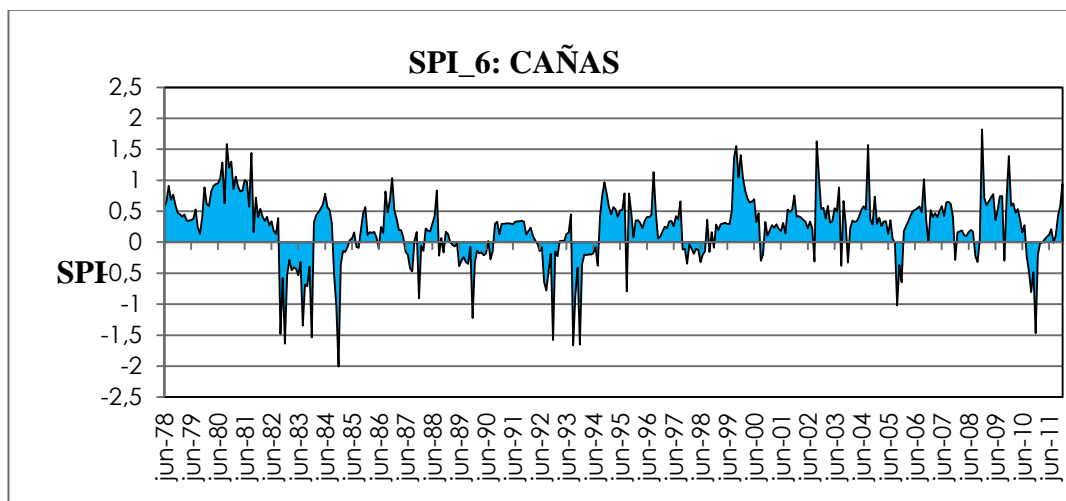
Los eventos de **sequía severa** se presentaron en dic-82, may-83, nov-84, sep-87, jun-dic-92, jun-dic-93, sep-06.

Se presenta 1 evento de **Sequía extrema** en el mes de diciembre de 1984.

En esta figura existe un dominio de sequía leve con un 64% el año más afectado es el año 1984 ya que se presenta una sequía extrema.

En la figura N°21 de la estación del Cañas se puede observar que hay periodos húmedos como secos en si las intensidades de SPI\_3 denotan que hay más eventos de sequía leve (0 a -0.5) y sequia severa (-1.5 a -1.99) mientras que en la categoría moderada (-0,50 a -0,99) y extrema (menores a -2) no se presentan muchos casos.

**FIGURA N° 22 SPI\_6**



En la figura 22 se presentan los eventos de **Sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: nov-82, ene-jun-sep-oct-83, oct-84, dic-87, ago-sep-92, oct-93, sep-95, dic-05 y oct-10.

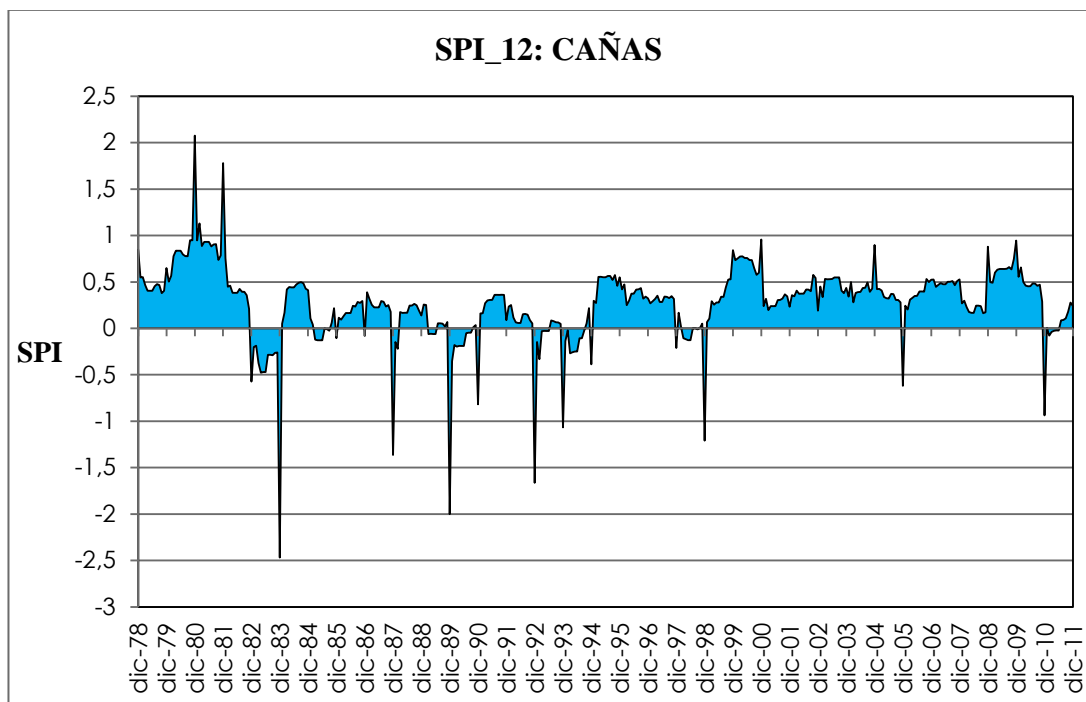
Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en oct-82, ago-83, nov-84, dic-89, oct-05 y dic-10.

Los eventos de **Sequía severa** se presentaron en dic-82, dic-83, dic-92 y sep-dic-93,

Solo se presenta 1 evento de **sequía extrema** en el mes de diciembre 1984.

En la figura N° 22 de la estación de Cañas se observa una sequía que empieza en noviembre de 1982 hasta octubre de 1983, una sequía extrema en diciembre de 1984, en el año 1992 también se observa periodos de sequía tanto leve como moderada y en el año 2010 hay sequia leve y moderada.

**FIGURA N° 23 SPI\_12**



En la figura N° 23 se presentan los eventos de **Sequia leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-82, dic-90, dic-05 y dic-10.

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-87, dic-93, dic-98

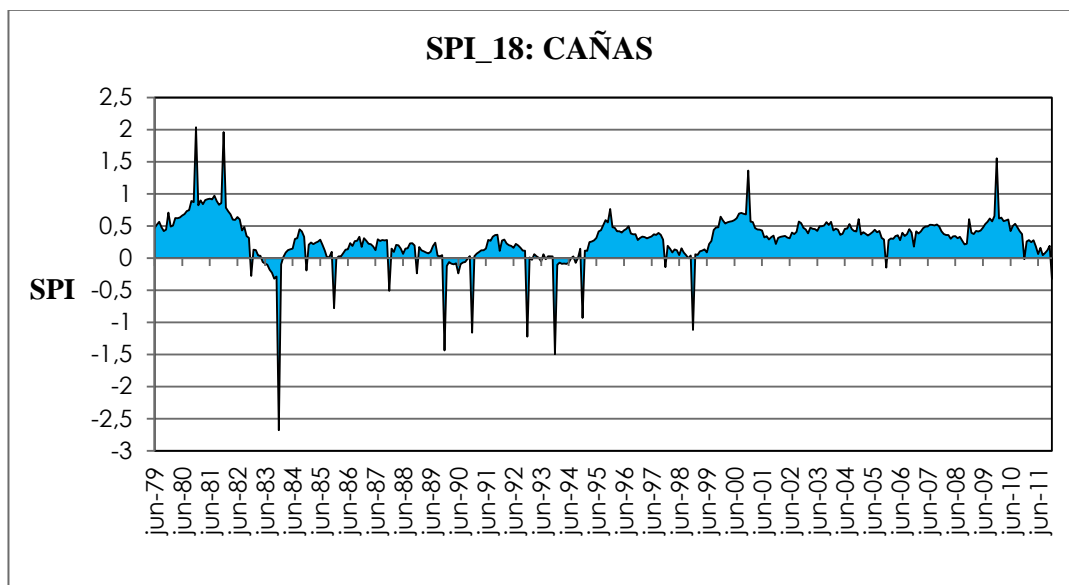
Solo se observa un evento de **sequía severa** y se presenta en el mes diciembre-92.

Se presentaron 2 eventos de **Sequia extrema** en diciembre-83 y diciembre-89.

En esta figura también hay más periodos húmedos que secos en periodos con mayor duración empieza en diciembre de 1982 con una sequía leve tornándose a sequia severa en diciembre de 1983.

**FIGURA N°24 SPI\_18**





En la figura 24 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-85, dic-87 y dic-94.

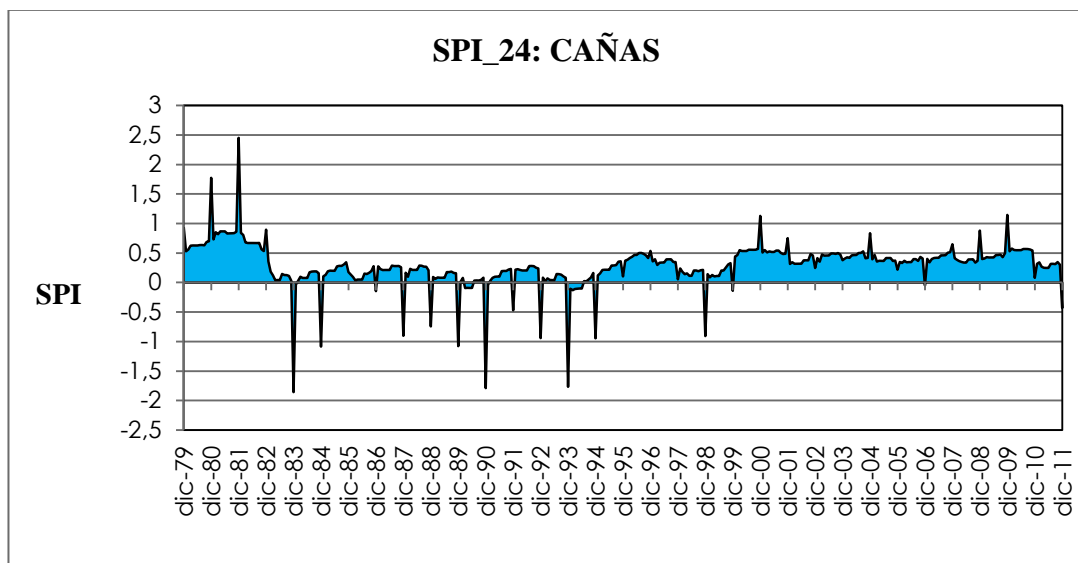
Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-89, dic-90, dic-92 y dic-98.

No se presentas eventos de **sequía severa**.

Si observamos un evento de **sequía extrema** en diciembre en 1983.

En esta figura se observa sequía extrema (SPI menores a -2) en diciembre del año 1983 la cual no tiene mucha duración, pero la intensidad predominante es la moderada (SPI entre -1 a -1.49) en el año 1989, 1990, 1992 y 1998.

**FIGURA N° 25 SPI\_24**



En la figura 25 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-87, dic-88, dic-92, dic-94 y dic-98.

Se presentaron 2 eventos de **sequía moderada** en dic-84, dic-89,

Los eventos de **sequía severa** se presentaron en dic-83, dic-90 y dic-93.

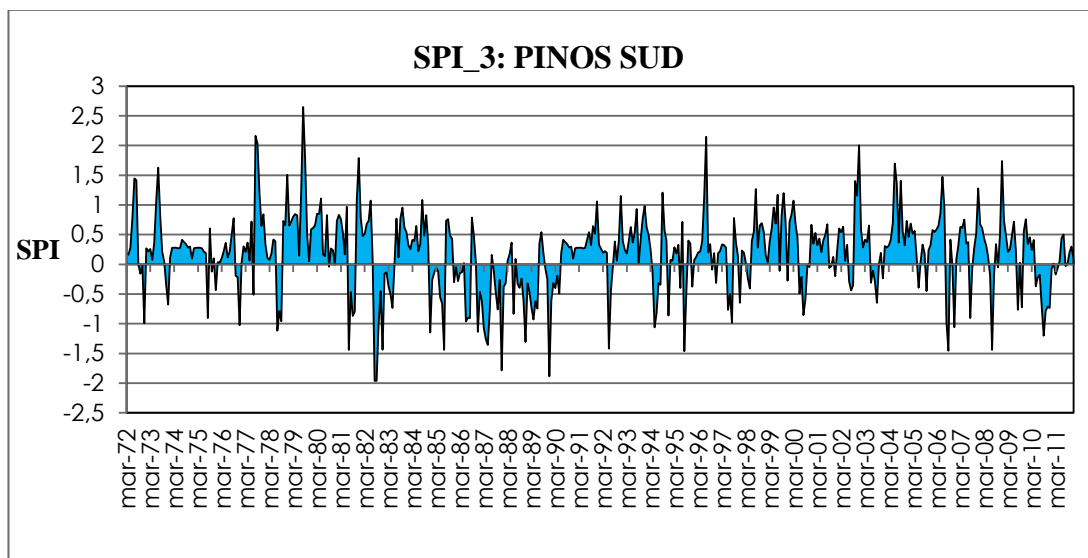
No se presentaron eventos de **sequía extrema**.

La estación de Cañas con SPI<sub>24</sub> indica eventos de sequía con corta duración pero las intensidades van entre sequía moderada y severa.

En cuanto a los periodos secos se observa sequía severa (-1.5 a -1.99) en el año 1983-1990 y 1993, se puede decir que la sequía presentada en el año 1983 se repite luego de una década.

### 3.3.5.- SPI<sub>3</sub>, SPI<sub>6</sub>, SPI<sub>12</sub>, SPI<sub>18</sub> Y SPI<sub>24</sub> ESTACION DE PINOS SUD

FIGURA N°26 SPI<sub>3</sub>



En la figura 26 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: Dic-73, ago-75, jul-77, ago-sep-78, sep-oct-81, abr-may-83, may-jun-85, jun-jul-ago-86, feb-jun-oct-87, jun-nov-88, mar-abr-may-jun-89, ene-90, jun-dic-94, jun-ago-dic-97, ago-sep-00, sep-03, ago-06, ago-07, ago-oct-09, ago-oct-nov-dic-10.

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-76, jul-78, jul-81, oct-dic-82, dic-84, jul-85, dic-86, mar-abr-may-87, dic-88, jun-92, may-94, ago-95, sep-dic-06, jul-08 y sep-10.

Los eventos de **sequía severa** se presentaron en Ago-sep-82 y Dic-87, dic-89.

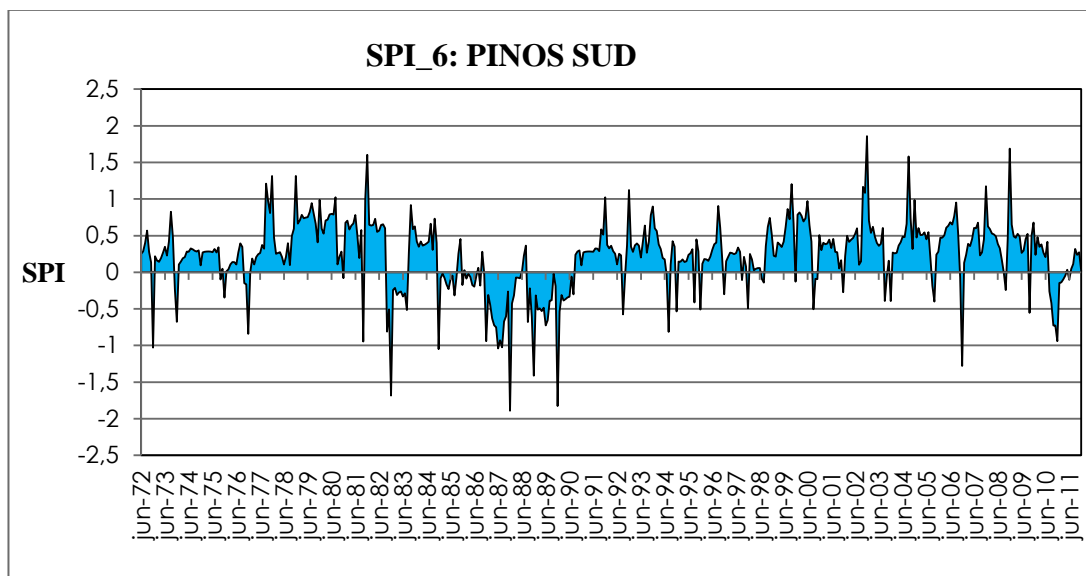
No se presentan eventos de **sequía extrema**:

En esta estación se observa más sequía leve (-0.5 a -0.99) y en menor predominancia sequía moderada (-1 a -1.49).

En los años 1982 y 1983 se observa sequía tanto leve, moderada y llega ser una sequía severa, al igual que los años 1985 a 1990.

Otro periodo de sequía tenemos en el año 2010 que empieza en agosto hasta diciembre del mismo año.

**FIGURA N°27 SPI\_6**



En la figura 27 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-73, dic-76, oct-81, oct-nov-82, ago-83, dic-86, mar-abr-may-jul-sep-oct-87, sep-nov-88, feb-abr-jun-jul-89, ene-90, sep-92, ago-dic-94, dic-95, sep-00, oct-09 y oct-nov-dic-10.

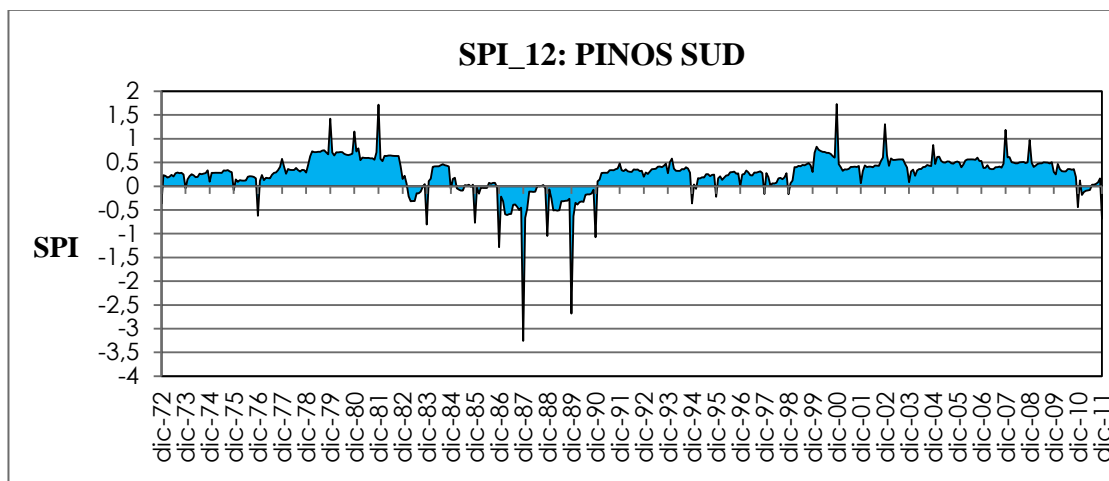
Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-72, dic-84, jun-ago-87, dic-88 y dic-06.

Los eventos de **sequía severa** se presentaron en dic-82, dic-87 y dic-89.

No se presenta eventos de **sequía extrema**.

En la presente figura se observa que hay más casos de sequía leve con un 76%, en una menor incidencia sequía moderada y severa y la ausencia de la sequía extrema. Se observa una sequía de larga duración en el año 1987 que transcurre desde el mes de marzo hasta el mes de diciembre, en su la época que se observa los eventos de sequía son a partir del año 1982 a 1990.

**FIGURA N°28 SPI\_12**



En la figura 28 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-76, dic-83, dic-85, mar-abr-may-jun-oct-87, ene-88, mar-abr-may-jun-89, ene-90 y dic-11

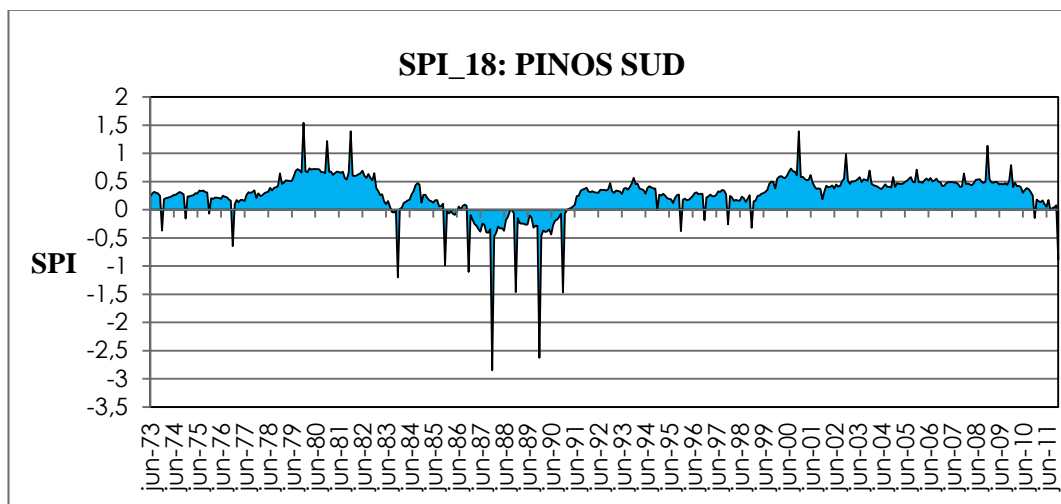
Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-86, dic-88, dic-90.

No se observa eventos de **sequía severa**.

Se presentaron 2 eventos de **Sequía extrema** en dic-87, dic-89.

En la agrupación anual de la estación de Pinos Sud se observa claramente dos subperíodos de sequía los cuales presentan sequia leve por mucho tiempo y de ahí se origina una sequía extrema, los años más afectados por la sequía son a partir del año 1985 hasta 1990.

**FIGURA N°29 SPI\_18**



En la figura 29 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-76, dic-85, dic-11

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-83, dic-86, dic-88 y dic-90.

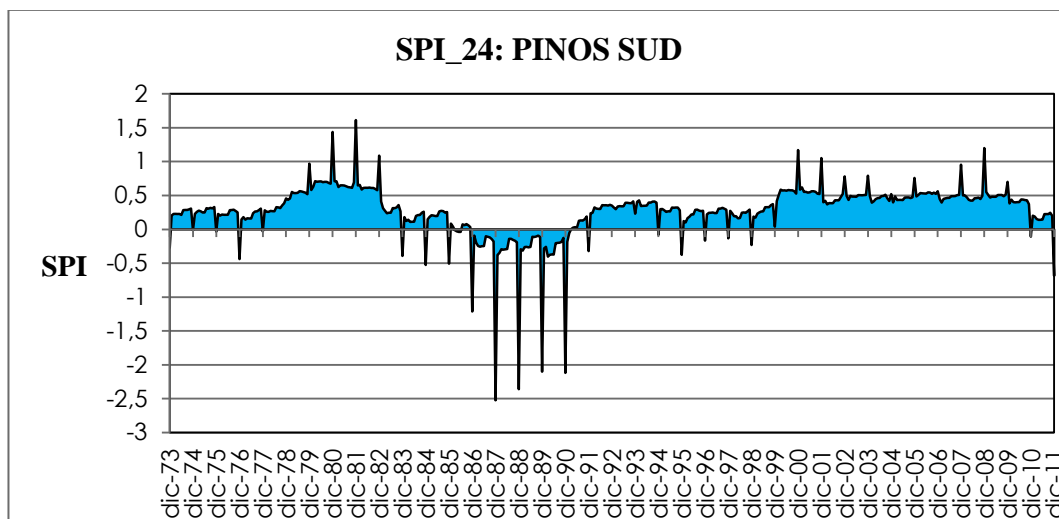
No se observa eventos de **sequía severa**.

Se presentaron 2 eventos de **sequía extrema** en dic-87 y dic-89.

En la agrupación 18 meses de la estación de Pinos Sud se observa dos casos claros de sequía extrema en los años 1987 y 1989, no se presentan sequías severas y la sequía con mayor predominancia es la sequía moderada.

En la estación de Pinos Sud se observa claramente dos subperiodos de sequía en el año 1986 a 1991, que va desde de sequía sequia leve (-0.5 a -0.99) por mucho tiempo y de ahí se origina una sequía moderada (-1 a -1.49) a sequía extrema.

**FIGURA N°30 SPI\_2**



En la figura 30 se presentan los eventos de **Sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-84 y dic-85 y dic-11

Se presenta 1 evento de **sequía moderada** en el mes de diciembre del año 1986,

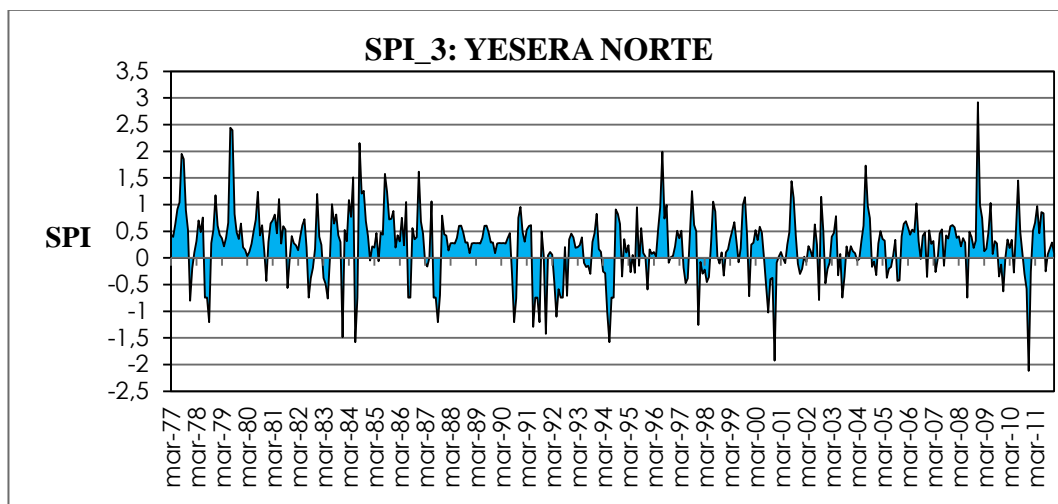
No se presentan eventos de **sequía severa**.

Los eventos de **sequía extrema** se presentaron en dic-87, dic-88, dic-89 y dic-90.

En la presente figura la sequía extrema (menor a -2) es dominante por 4 años seguidos entre los años 1987 a 1990, son los años más afectados por la sequía en esta agrupación.

### 3.3.6.- SPI\_3, SPI\_6, SPI\_12, SPI\_18 Y SPI\_24 ESTACION DE YESERA NORTE

**FIGURA N°31 SPI\_3**



En la figura 31 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-77, jul-ago-78, oct-81, ago-82, may-83, jul-84, jul-ago-86, jul-ago-oct-87, oct-90, jul-ago-91, jun-jul-ago-oct-92, jul-ago-94, dic-95, dic-99, ago-00, sep-02, ago-03, jul-08, dic-09 y nov-10.

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en sep-78, dic-83, sep-87, sep-90, jun-sep-dic-91, may-92, may-94, dic-97 y sep-00.

Los eventos de **sequía severa** se presentaron en jun-84, jun-94, dic-00.

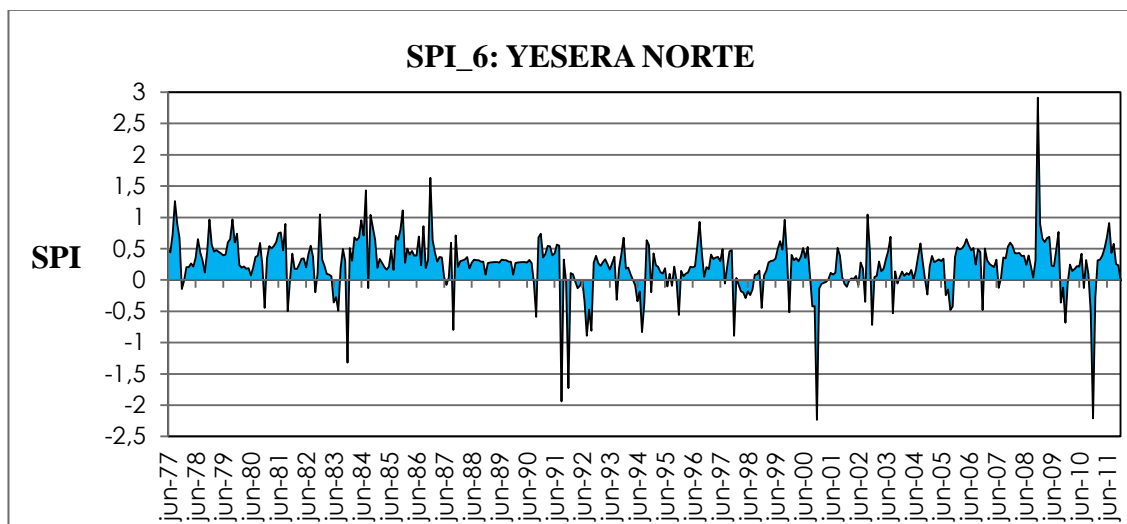
Se observó un evento **Sequía extrema** en el mes de diciembre de 2010.

Esta figura presenta gran densidad de sequía leve (0,5-0,99), y se observa una diferencia marcada en cuanto a la frecuencia entre sequias leve/moderada y sequia severa/extrema

En la estación de Yesera Norte con SPI\_3 tiene mayor predominancia en sequia leve en casi todos los años donde existe sequia leve hay sequia moderada y solo en los años 1984, 1994, 2000 hay sequia severa. En el año 2010 hay una sequía extrema..

**FIGURA N°32 SPI\_6**





En la figura 32 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: oct-87, oct-90, ago-oct-92, ago-94, dic-95, dic-97, dic-99, dic-02, sep-03, dic-09 y nov-10.

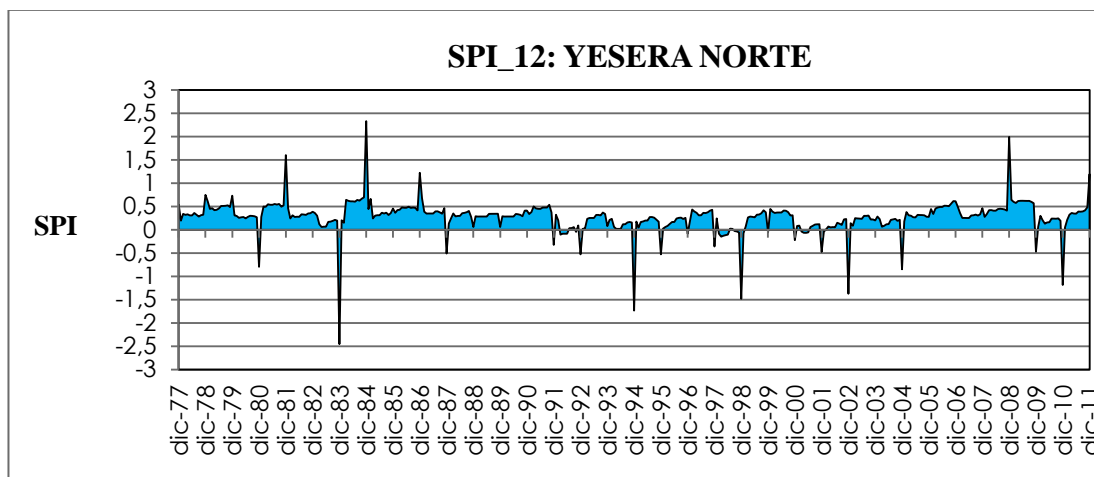
Se observa un evento de **sequía moderada** en el mes de diciembre 1983.

Se observa **sequía severa** en el mes de septiembre y diciembre 1991.

Se observa **sequía extrema** en el mes diciembre de 2000 y noviembre de 2010.

En la agrupación semestral de la estación de Yesera Norte se observa más periodos húmedos que secos, se distingue más sequia leve (-0.5 a -0.99), en el año 1983 hay sequia moderada, sequia severa en el mes de septiembre a diciembre de 1991 y por ultimo sequía extrema en el año 2000 y 2010. Analizando toda la figura se observa que cada 10 años hay un evento de sequía.

**FIGURA N°33 SPI\_12**



En la figura 33 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-80, dic-87, dic-92, dic-95 y dic-04.

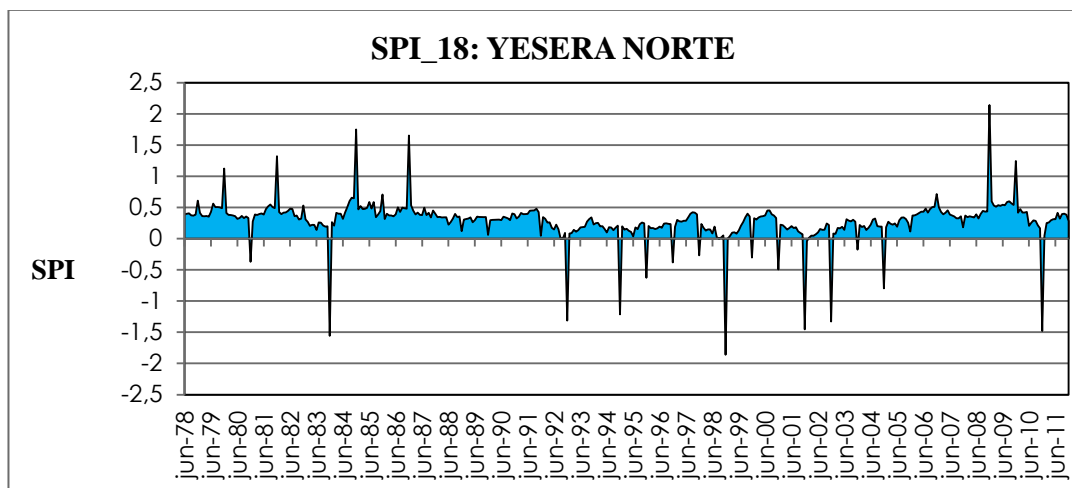
Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-98, dic-02 y dic-10.

**Sequía severa** en el mes de diciembre de 1994.

**Sequía extrema** en el mes de diciembre de 1983.

En la presente figura se observa una densidad de sequía menor, observando sequía extrema en el año 1983 y sequía severa en el año 1994. Dando una revisada visual a la figura notaremos que después de haber sucedido el primer evento pasan aproximadamente 12 años para que se dé el segundo caso de sequía (1994).

**FIGURA N°34 SPI\_18**



En la figura 34 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-95 y dic-04.

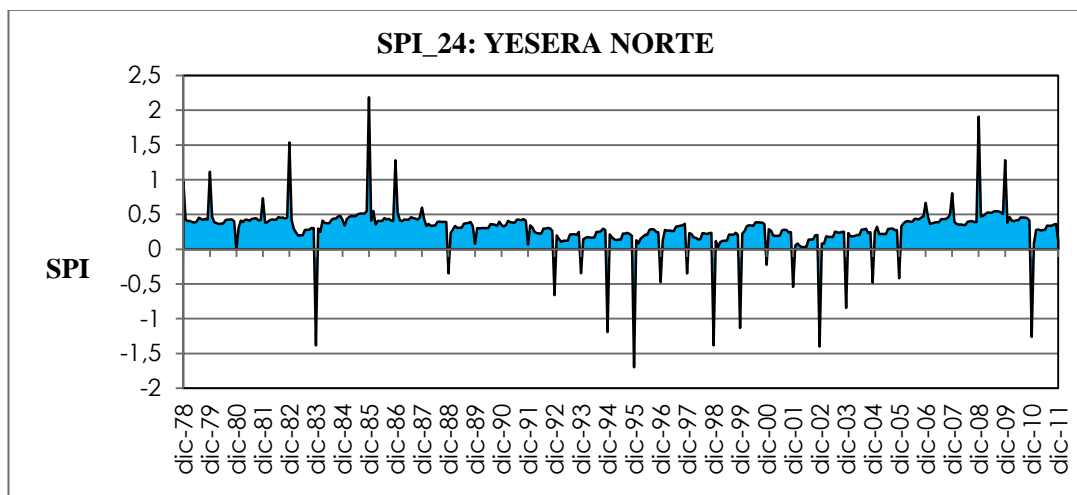
Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-92, dic-94, dic-01, dic-02 y dic-10.

Los eventos de **sequía severa** se presentaron en dic-83 y dic-98.

No se observan eventos de **sequía extrema**.

En la estación de Yesera Norte se observa que el primer caso de sequía moderada se da en diciembre de 1993. Las intensidades SPI<sub>18</sub>, disminuye en esta agrupación de 18 meses, los años que se muestran afectados por la sequía son 1983-1992-1994-1995-1998-2001-2002-2004 y 2010, pero en el año 1983 y 1998 presenta sequía severa (-1.5 a -1.99).

**FIGURA N°35 SPI<sub>24</sub>**



En la figura 35 se presentan los eventos de **sequía leve**: los cuales corresponden a los siguientes períodos y años: dic-92, dic-01 y dic-03.

Los eventos de **sequía moderada** se presentaron en dic-83, dic-94, dic-98, dic-99, dic-02 y dic-10.

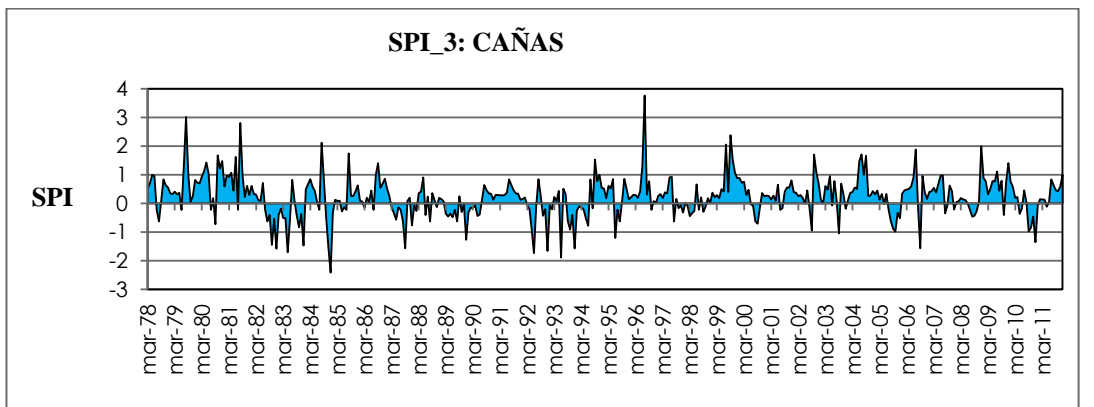
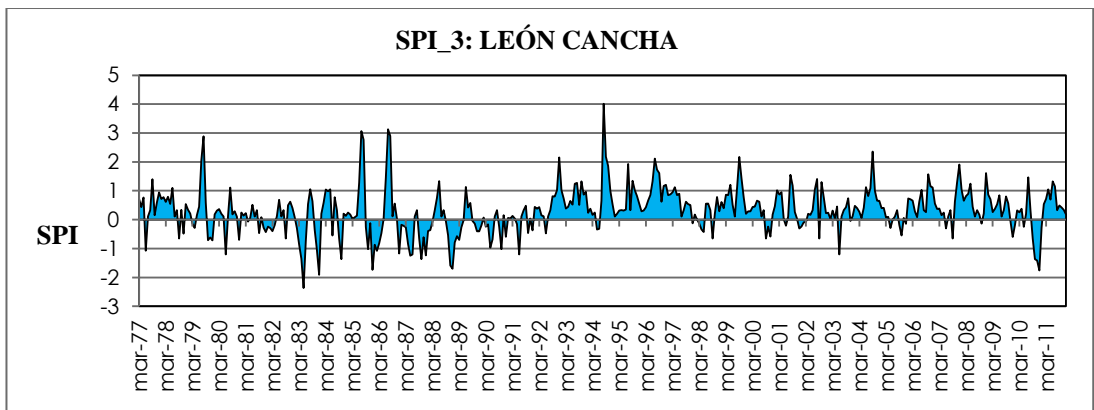
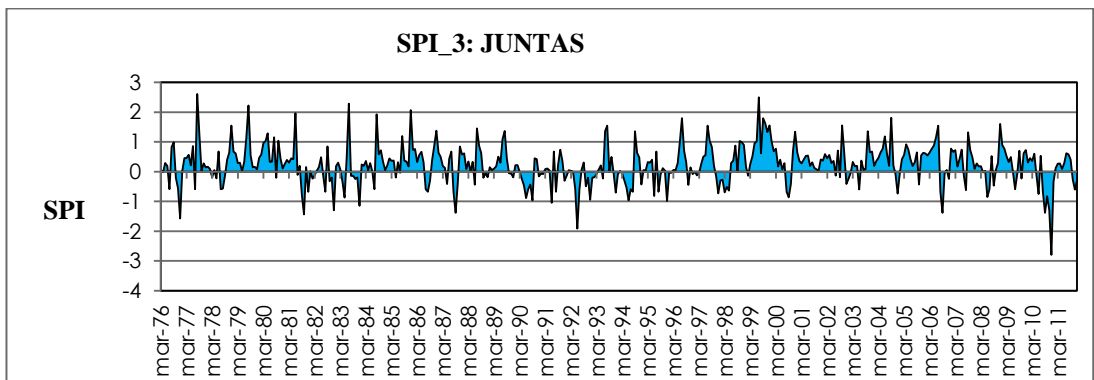
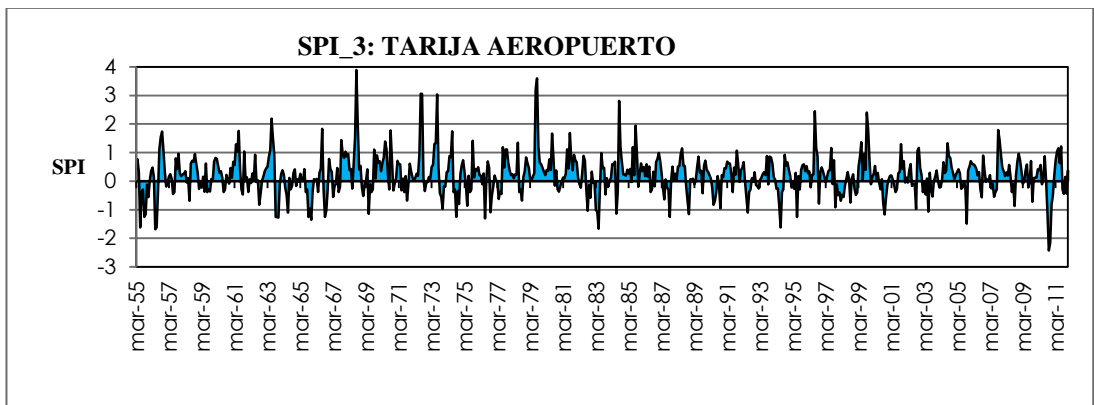
Se observa un evento de **sequía severa** en el mes de diciembre de 1995.

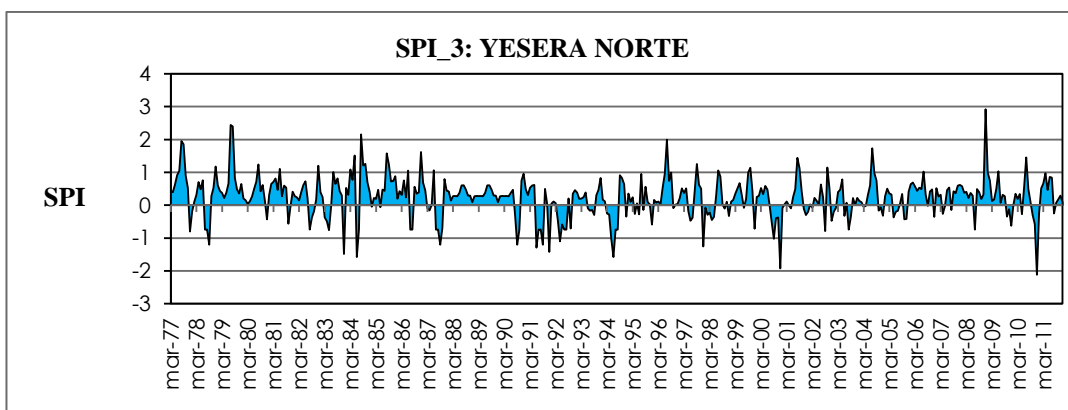
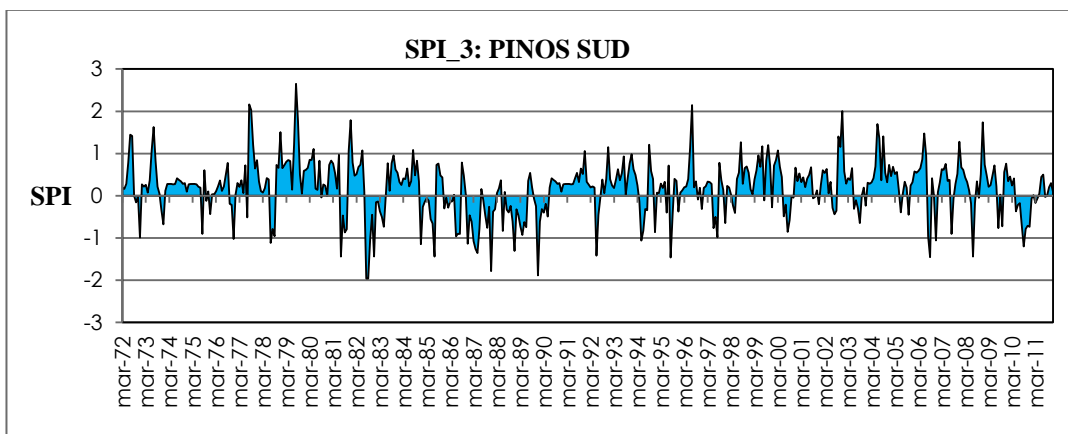
No se presentan eventos de **sequía extrema**.

Analizando la figura distinguimos que el primer periodo de sequía que se observa en mes de diciembre del año 1983 con una sequía moderada (-1 a -1.49) de ahí retorna con un casos de sequias desde el año 1992 hasta el año 2003 presentando una sequía severa (-1.5 a -1.99) en diciembre de 1995. La categoría con mayor frecuencia es la sequía moderada presentándose en un 60%. También se observa una sequía moderada en diciembre de 2010.

### 3.4.- AGRUPACIÓN SPI RESPECTO A LAS ESCALAS DE TIEMPO.

#### 3.4.1.- AGRUPACIÓN TRIMESTRAL: SPI\_3





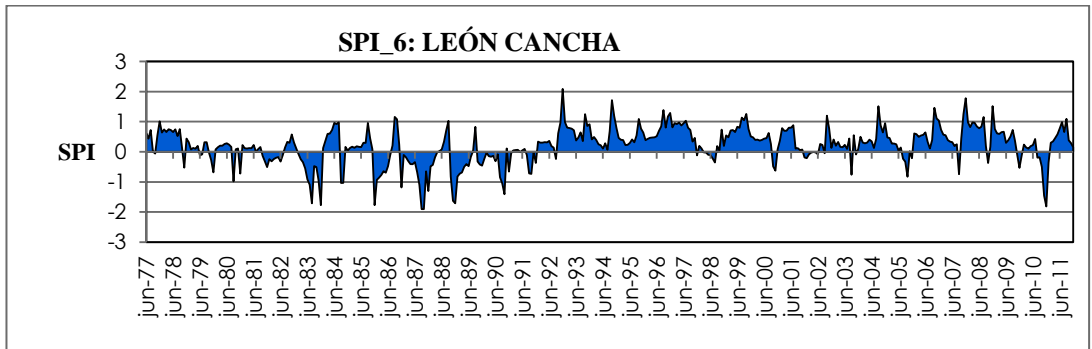
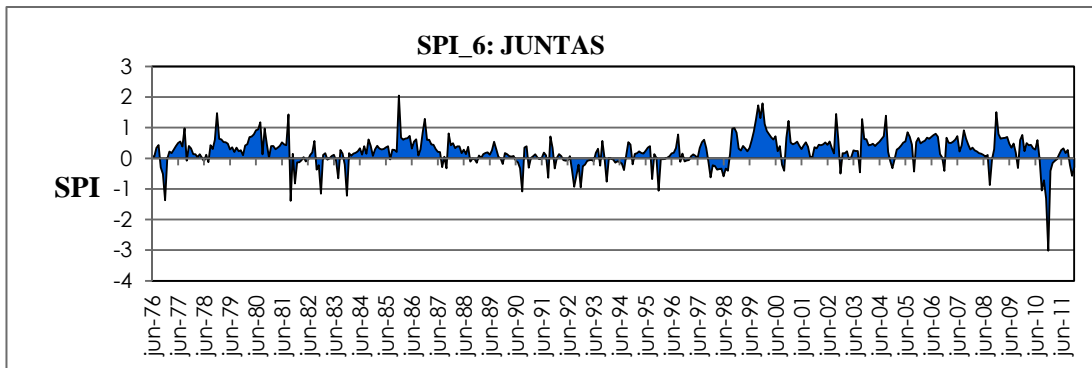
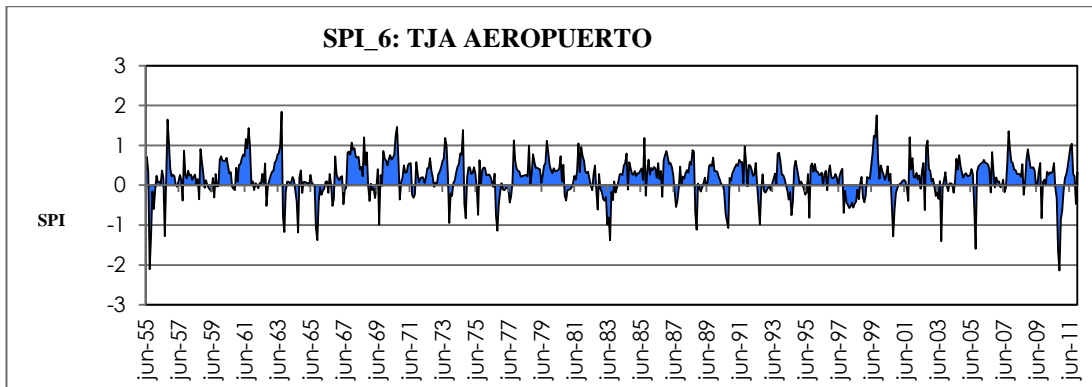
Comparando las anteriores seis figuras vemos como los valores del SPI presentan alta sensibilidad a los cambios de la precipitación acumulada durante el periodo trimestral, por lo cual cambian de positivo a negativo en cortos periodos de tiempo.

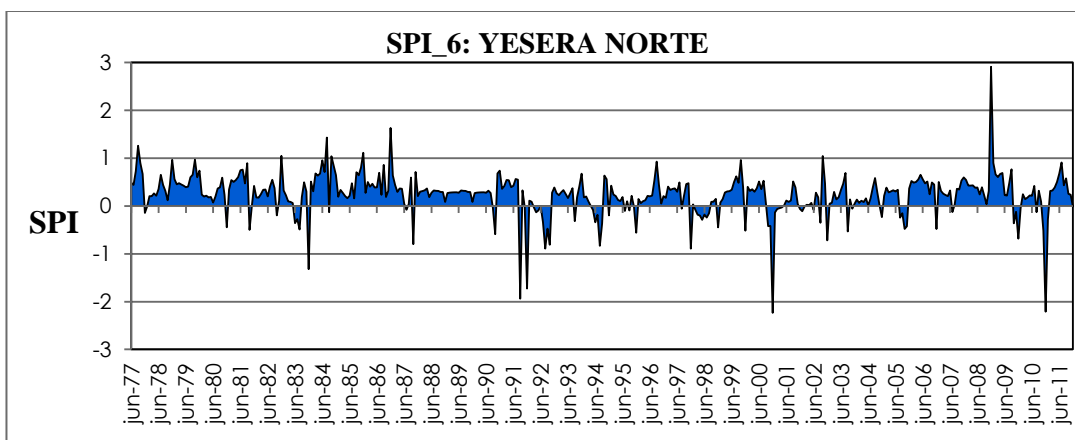
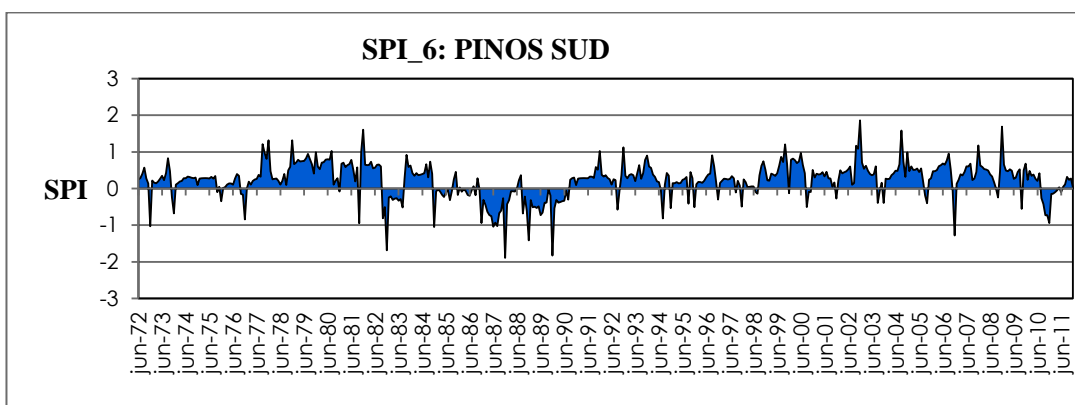
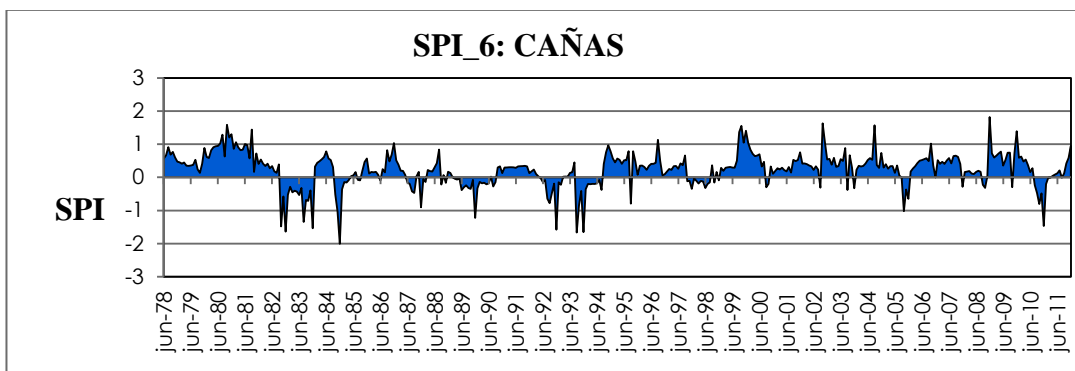
Un aspecto importante analizando con mayor detenimiento en cada escala de tiempo fue la distribución en la serie histórica que se mantuvieron las condiciones de sequía. Los años en los que se distingue este evento son el año 1982- 1989 en las estaciones de Pinos Sud y León Cancha, en Cañas solo se observa en el año 1982-1985.

En la estación de Cañas y Yesera Norte notamos un parecido en las figuras en los años 1992 a 1995.

Pero el evento de sequía que resalta en todas las estaciones es en al año 2010.

### 3.4.2.- AGRUPACIÓN SEMESTRAL: SPI\_6





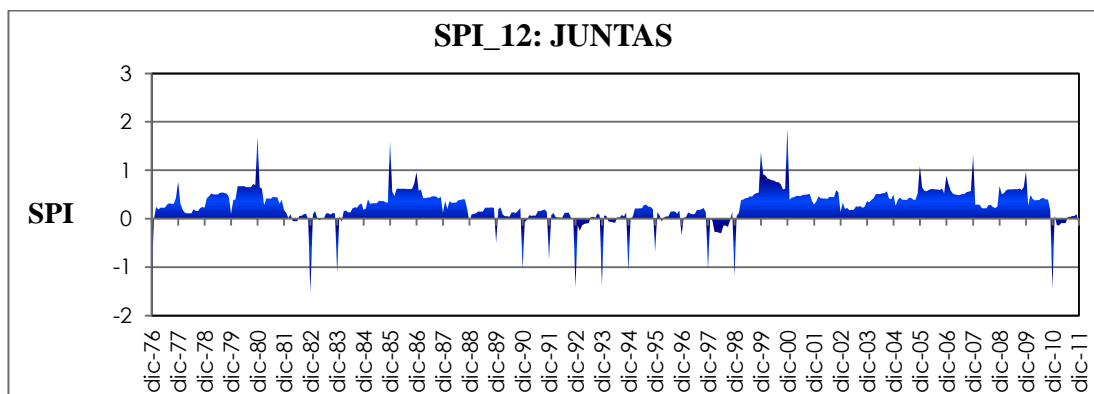
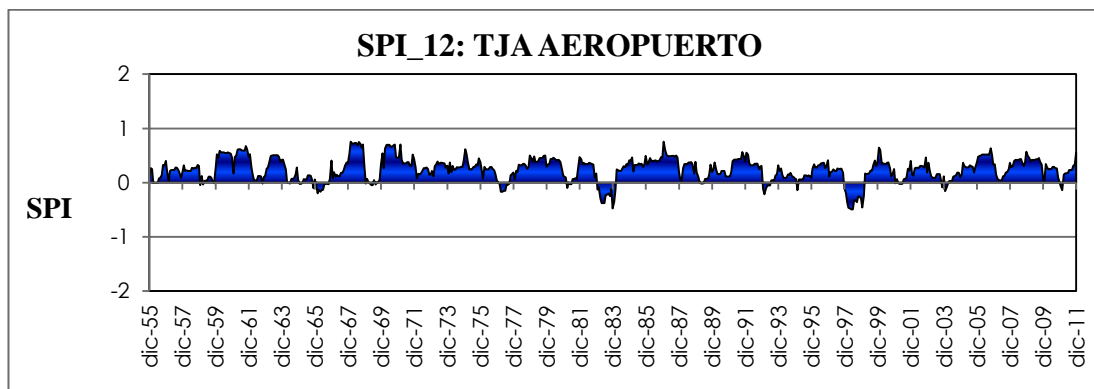
En series de tiempo de seis meses en adelante cada nuevo registro de precipitación tiene menor incidencia en el total acumulado del periodo correspondiente, por lo cual los valores del SPI se estabilizan y definen con mayor claridad el déficit de la lluvia. Otra característica es la alta ocurrencia de eventos de sequía de corta duración en las escalas de corto plazo; en escalas de tiempo mayor el número de eventos de sequía se reduce, pero su duración aumenta.

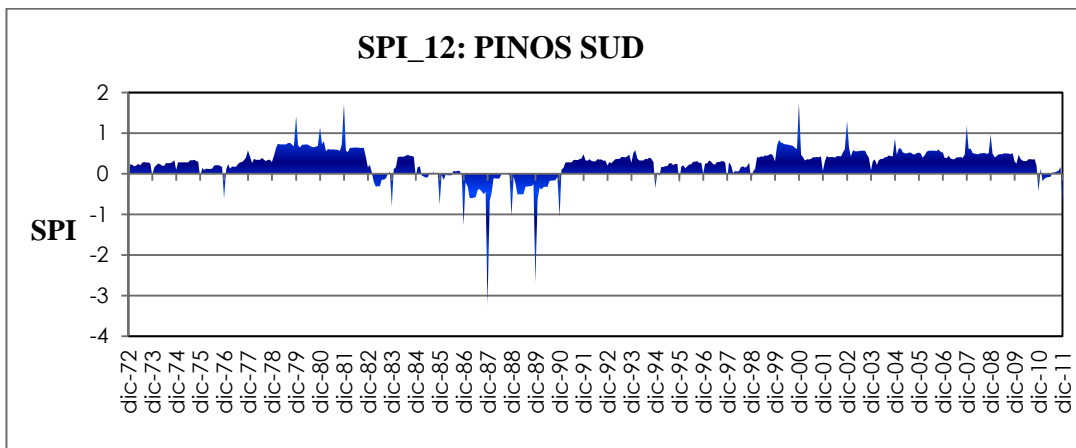
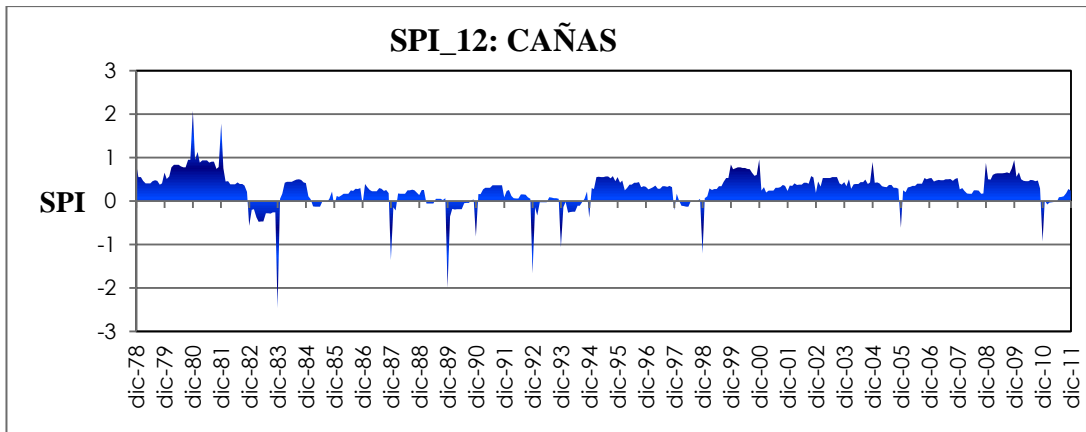
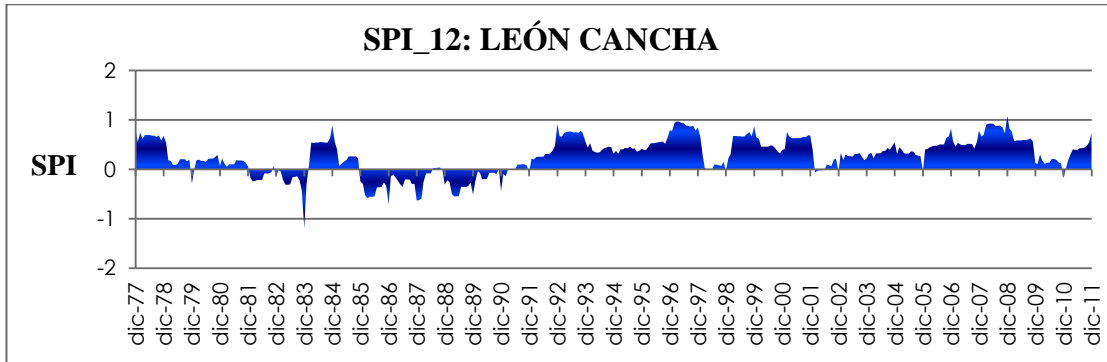


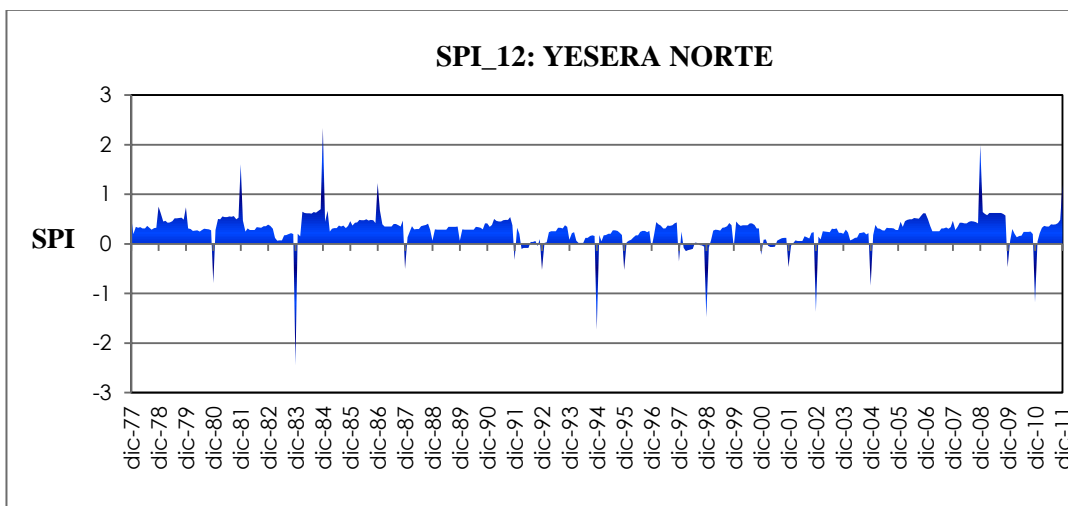
Observando las seis estaciones observamos claramente que en el año 2010 existe sequía. En algunas estaciones manifestándose como sequía moderada y en otras sequía extrema.

La estación de León Cancha con la de Pinos Sud presenta sequía en los años 1982 – 1990, Cañas también tiene sequía en el año 1982 – 1984. En estas tres estaciones se observan sequías con mayor duración en diversos años.

### 3.4.3.- AGRUPACIÓN ANUAL: SPI\_12

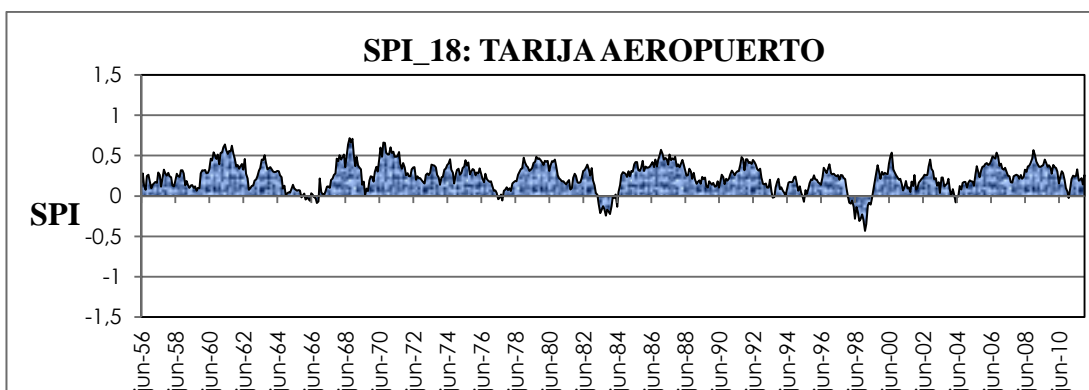


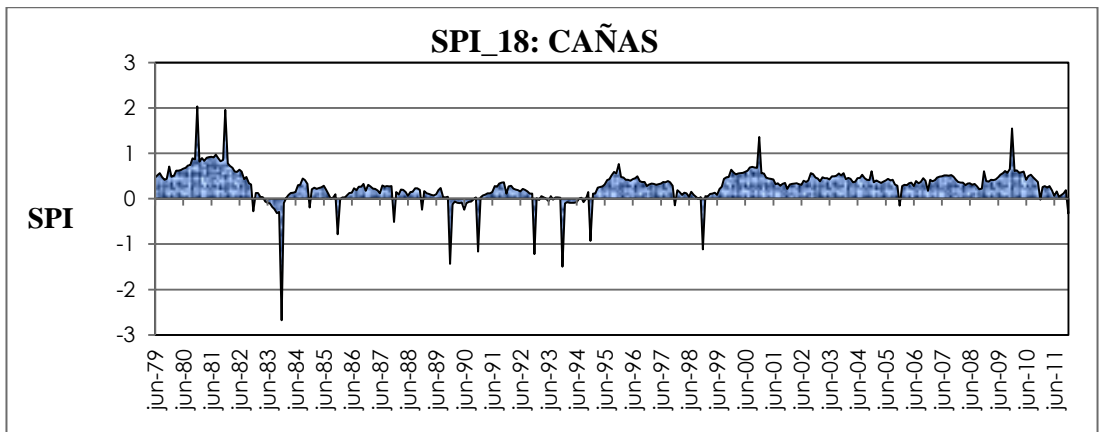
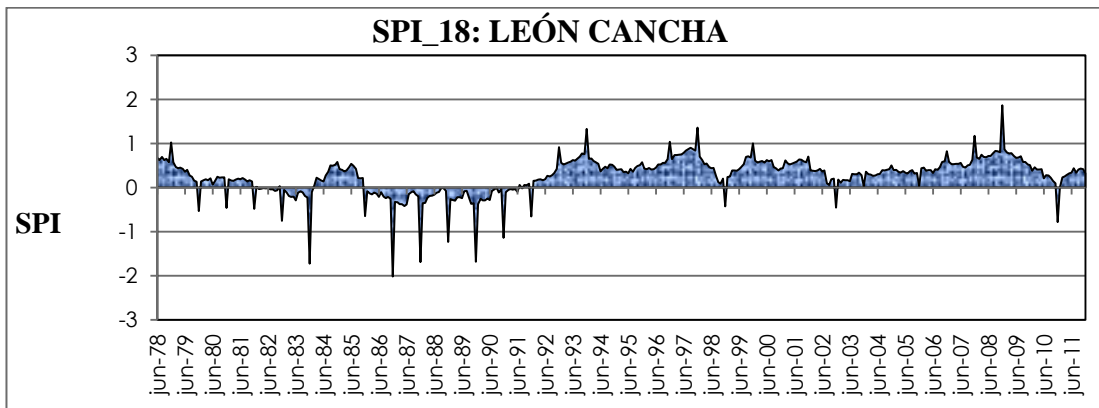
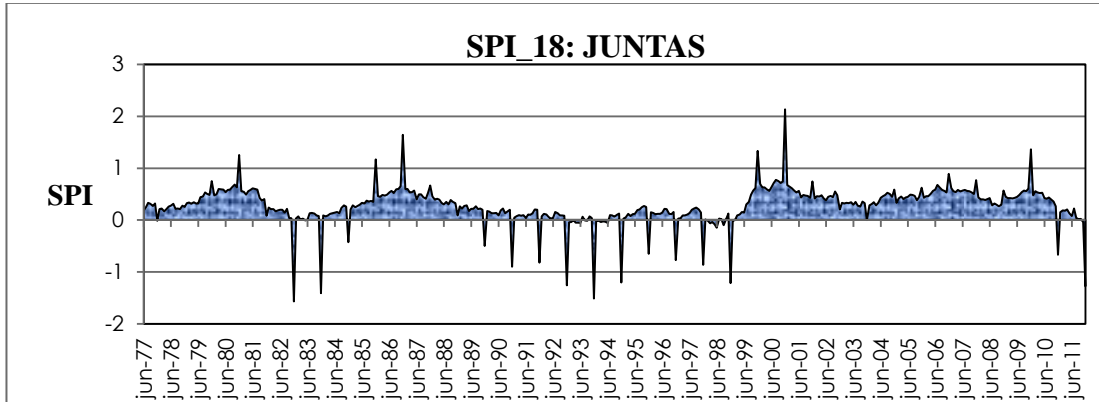


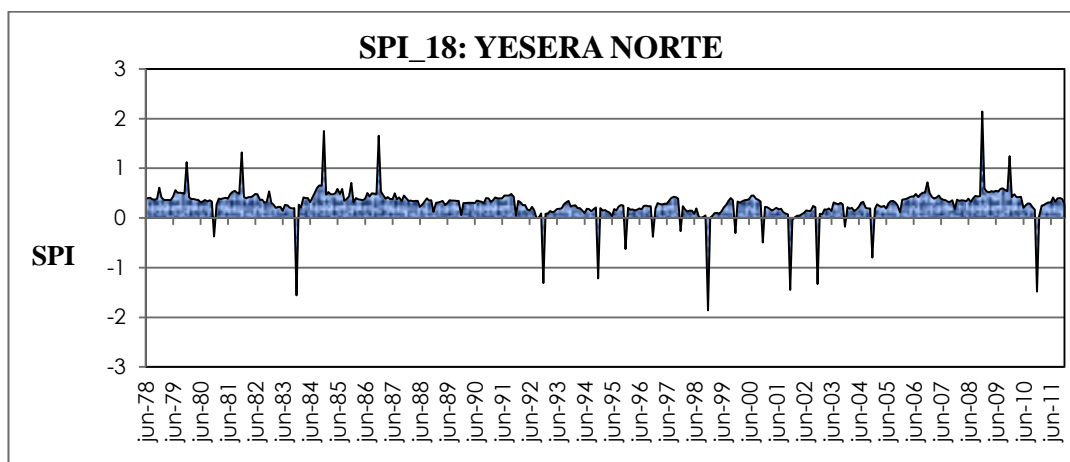
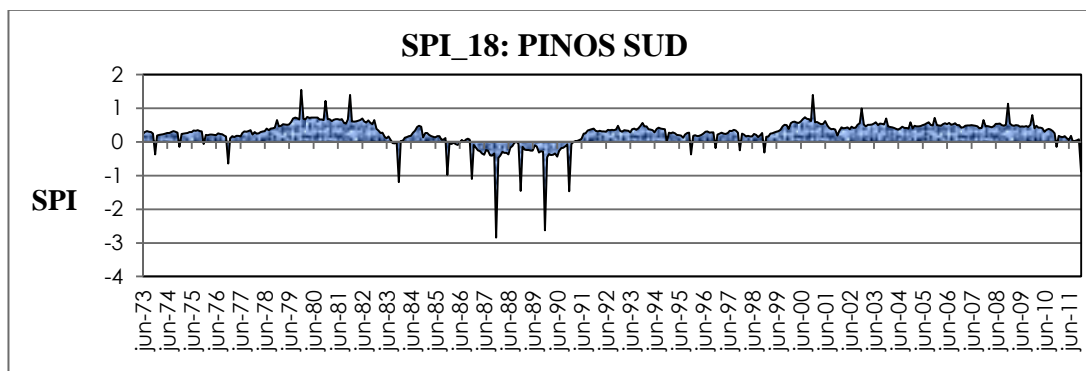


En la escala de tiempo Anual se observa que la estación del Aeropuerto presenta sequías muy leves en el año 1983 y 1997, pero examinando las cinco estaciones se distingue mucho una de otra, los años que presentan sequía en la mayoría de las estaciones son el año 1982-1983 en la estación de Juntas, León Cancha, Cañas y Yesera Norte. En la estación de Juntas se presenta este fenómeno con mayor intensidad en la década de los 1990. En la estación de Pinos Sud los años más afectados son 1986-1990.

#### 3.4.4.- AGRUPACIÓN 18 MESES: SPI\_18



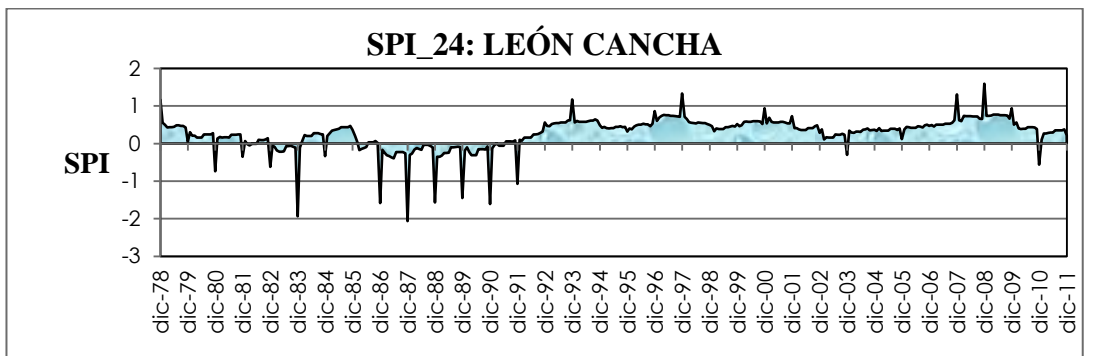
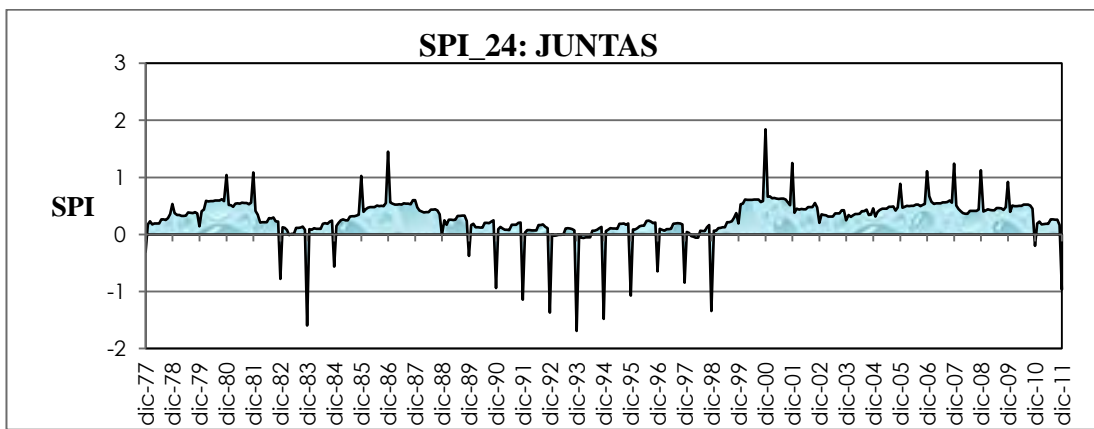


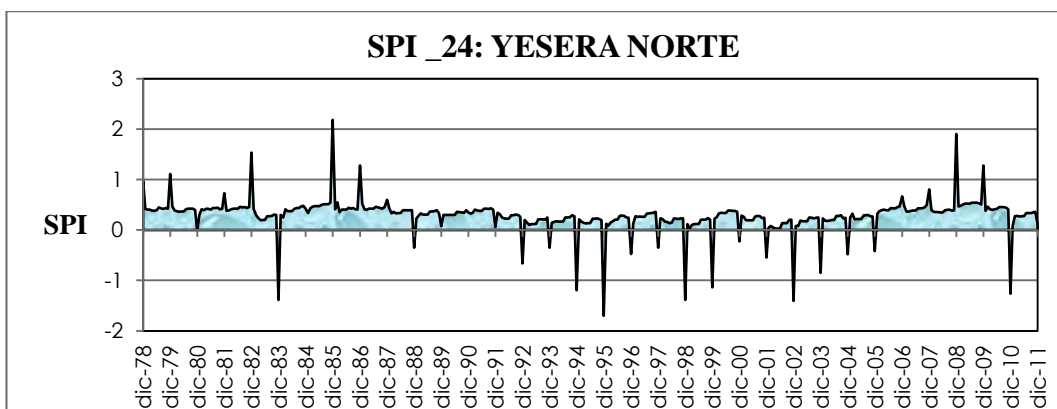
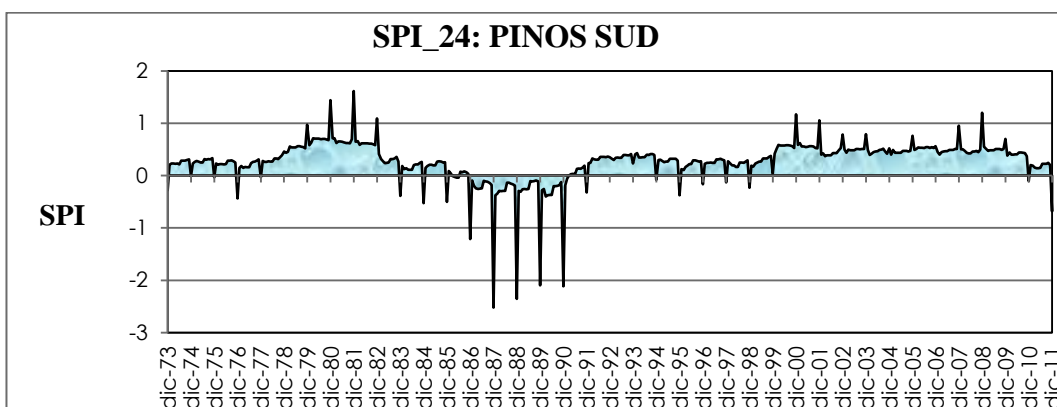
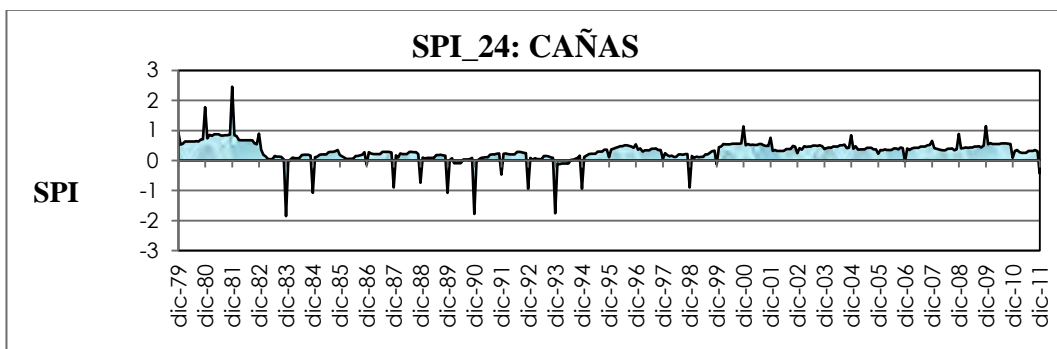


En la escala de tiempo 18 meses se observa que la estación del Aeropuerto presenta sequías muy leves, en las estaciones de Juntas, León Cancha, Cañas y Yesera Norte se observa sequía en el año 1983.

Las estaciones de Pinos Sud y León Cancha presentan sequía en los años 1986-1991. En general las gráficas no tienen mucho parecido pero si coinciden en muchos años en los que hay sequía.

### 3.4.5.- AGRUPACIÓN 24 MESES: SPI\_24





En esta escala de tiempo de 24 meses la estación de León Cancha y Pinos Sud tienen mucho parecido en los años que existe sequía 1986- 1991. En cuatro estaciones se tiene sequía en el año 1983 estas estaciones son: Juntas, León Cancha, Cañas y Yesera Norte

Finalmente se analiza la existencia de posibles relaciones entre las anomalías de precipitación de la región de estudio con las anomalías de temperatura superficial del Océano Pacífico que están relacionadas con la ocurrencia del fenómeno El Niño - Oscilación Sur (ENOS). Esta relación solo se la hace con la estación del Aeropuerto. A continuación se analiza la existencia de posibles relaciones:  
Cuadro N° 8

<b>AÑO</b>	<b>SEQUIA LEVE</b>	<b>S.MODERADA</b>	<b>SEQUIA SEVERA</b>	<b>S.EXTREMA</b>	<b>ENOS</b>
1955	✓	✓	✓		✓
1956			✓		✓
1958	✓				✓
1962	✓				
1963		✓			
1964		✓			✓
1965	✓	✓			✓
1966		✓			✓
1967	✓				
1969	✓	✓			✓
1971	✓				✓
1973	✓				✓
1974	✓	✓			✓
1975	✓				✓
1976	✓	✓			✓
1977	✓				✓
1978	✓				
1982	✓	✓			✓
1983		✓	✓		✓
1984		✓			
1987	✓	✓			✓
1988	✓	✓			
1990	✓				
1992	✓	✓			✓
1994	✓		✓		✓
1995		✓			✓
1996	✓				✓
1997	✓				✓
1998	✓				✓
2000	✓	✓			✓
2002	✓				
2003	✓	✓			
2005		✓			
2006	✓				
2007	✓				
2008	✓				
2009	✓				
2010	✓	✓		✓	✓



#### **4.1.- CONCLUSIONES**

De acuerdo a los resultados alcanzados en el presente trabajo de tesis, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. El SPI presenta cambios notables de acuerdo a la cantidad de precipitación acumulada. En general se distinguen períodos húmedos, cuando el valor de SPI es positivo, y periodos secos, cuando el valor de SPI es negativo.
2. El SPI sea 3, 6, 12, 18 ó 24 meses de agrupación, muestra que la condición de sequía puede ser evidente para un mes o varios meses, es decir que el déficit de precipitación puede evidenciarse para un solo mes, desapareciendo esa condición en el mes subsiguiente sí se presentaran precipitaciones normales. En otros casos la condición de sequía puede extenderse por varios meses. Por este motivo, el SPI es una buena herramienta para monitorear la sequía en las diferentes escalas de tiempo.
3. En el SPI\_3, para tres meses, la sequía leve es la que con mayor frecuencia se presenta, los eventos de sequía moderada y severa son menos frecuentes y solo en el año 2010 se presentó un evento de sequía extrema. En la comparación de SPI-3, cada una de las estaciones analizadas tiene un comportamiento particular, encontrándose pocas similitudes entre sí, solo en eventos extremos como del 2010 existen coincidencias.
4. En el SPI-6, los eventos de sequía tienen un comportamiento, similar al SPI-3, donde los eventos de sequía leve son los más frecuentes y los de sequía extrema son escasos. En series de tiempo de seis meses o más, cada nuevo registro de precipitación tiene menor incidencia en el total acumulado del periodo correspondiente, por lo cual los valores del SPI se estabilizan y definen con mayor claridad los eventos de sequía.

5. Los SPI-12, 18 y 24, muestran que la estación del Aeropuerto presenta sequías muy leves que se extienden de manera continua durante los años 1982, 1983 y parte de 1984, de igual manera durante los años 1997 y 1998, coincidiendo con los eventos del fenómeno de El Niño considerados severos. En las otras estaciones, a diferencia del aeropuerto se presentan condiciones de sequía que se manifiestan de manera puntual en uno o dos meses.
6. Los SPI-12, 18 y 24, reflejan que en el Valle Central de Tarija se presentan eventos de sequía que comprometen largos períodos de tiempo, de hasta 2 años, lo que se constituye en una sequía económica.
7. El SPI-3 es el que mejor relaciona el efecto de la sequía en la ocurrencia de incendios forestales y la agricultura.
8. El SPI-3-6 es un índice muy sensible a las más leves variaciones de precipitación en el período seco, por lo que su utilización para estas magnitudes de tiempo debe ser muy criteriosa en zonas con precipitaciones marcadamente estacionales como es el Valle central de Tarija.

#### **4.2.- RECOMENDACIONES**

- Emplear el índice SPI en las unidades de Gestión de Riesgos de la Gobernación y Municipios, por considerarse una herramienta apropiada para monitorear la sequía meteorológica.
- Es necesario que se pruebe la aplicabilidad del SPI en otras zonas del Departamento de Tarija.
- Realizar otros estudios utilizando tan solo los meses del periodo húmedo, para verificar si el SPI se adecúa mejor cuando se atenúa la estacionalidad de las precipitaciones.
- Sensibilizar a las autoridades Departamentales para que se amplíe y mejore la red de estaciones meteorológicas.