

CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Definición de sequía

Cada disciplina incorpora diferentes factores físicos, biológicos y socioeconómicos en su concepción de la sequía. Debido a ello, existe una considerable confusión acerca de lo que exactamente constituye o define a una sequía según Glantz y Katz (1977).

La falta de una definición precisa y objetiva en situaciones específicas ha sido un obstáculo para entender la sequía, lo cual ha conducido a una falta de tomas de decisiones y de acciones por parte de los políticos y gerente para mitigar los efectos de la sequía, citado por Wilhite y Glantz (1985).

Un error que se presenta al referirse al concepto de sequía es que se suele confundirlo con el concepto de *aridez*. Por esta razón es importante hacer claridad en que la *aridez* se refiere a la “característica que define a un clima concreto, el estado permanente de bajas precipitaciones de algunas áreas de la tierra (Ej. Un desierto es una zona árida porque normalmente no llueve). En cambio, una sequía es un estado temporal de bajas precipitaciones fuera de lo que se considera normal para una zona determinada, Moreno M., (2004).

Existen en la bibliografía una cantidad apreciable de definiciones, de forma muy general, el vocabulario Meteorológico Internacional de la Organización Meteorológica Mundial define la sequía como *la ausencia prolongada o el déficit notable de la precipitación* (OMM, 1992). Como puede observarse en esta definición, para cada región la “ausencia prolongada” puede significar diferentes periodos de

tiempo, así como el “déficit notable” puede significar láminas de precipitación diferente; es así como, la diversidad de regímenes de precipitación y de disponibilidad de humedad justifica la gran variedad de definiciones de sequía.

Se pueden encontrar, por ejemplo:

- La Organización meteorológica Mundial (OMM, 1992), define a la sequía como:
“Un periodo de tiempo con condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitación cause un grave desequilibrio hidrológico”.
- Fernández, F (1991) define al fenómeno de la siguiente manera: “sequía se corresponde con una situación de déficit de agua, suficiente para afectar adversamente a la vegetación, a los animales, al hombre y su actividad, en una región determinada. Se trata de un fenómeno de desarrollo lento y amplia cobertura. Lo importante son sus consecuencias, no sus causas y propiedades. Se diferencia de otros desastres naturales de carácter repetitivo, breve o violento en que la sequía es gradual y de gran persistencia.
- La Organización de las Naciones Unidas, en su documento de la Convención de Lucha Contra la Desertificación (ONU, 1994) define a la sequía como:
“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 tierra”.

En las definiciones se observan algunos aspectos comunes y otros diferentes; un común denominador común en ellas es la “escasez de precipitación”, con respecto a un comportamiento “normal” de la misma, considerando “comportamiento normal” a valores promedio de una serie de tiempo histórica.

Wilhite y Glantz (1985) analizaron más de 150 definiciones en su estudio de clasificación de sequía. En la literatura se pueden encontrar resúmenes de definiciones e índices de sequía los cuales agrupan a definiciones desarrolladas en todo el mundo e índices utilizados para monitorear y evaluar la sequía (OMM, 1975) citada Dracup et al, (1980).

Los índices más utilizados en el mundo, para fines operativos o de investigación, necesitan de técnicas y procedimientos que posibiliten identificar el inicio de la sequía, caracterizar su evolución espacio-temporal y precisar el fin de la misma.

Según el Centro Nacional para la Mitigación de la sequía (2003) las definiciones de sequía son de dos tipos:

- ✓ Definición Conceptual, formuladas en términos generales, ayudan a entender el concepto de sequía. Por ejemplo, una definición conceptual es: “la sequía es el periodo de déficit de agua que da como resultado un daño extensivo a los cultivos, evidenciado en una menor producción”. Estas definiciones pueden ser también importantes a la hora de establecer políticas sobre sequía.
- ✓ Definición Operacional, las definiciones operacionales ayudan a entender el principio, final, y el grado de severidad de una sequía. Por ejemplo, para

determinar el inicio de una sequía, las definiciones operacionales especifican el grado de desviación del promedio de precipitación u otras variables climáticas a lo largo de algunos periodos de tiempo. Esto se realiza usualmente comparando la situación actual con el promedio histórico (basado generalmente en un periodo de registro de 30 años). Estas definiciones pueden ser usadas también para analizar la frecuencia y duración de la sequía para un periodo de tiempo dado; sin embargo, requieren datos del tiempo en escalas diarias, mensuales, anuales, etc., y posiblemente datos de los impactos, dependiendo de la naturaleza de la definición que se esté aplicando. Desarrollar la climatología sobre sequía para una región provee un mejor entendimiento de sus características y de la probabilidad de ocurrencia en varios niveles de severidad. Por lo general las definiciones operacionales de sequía se establecen para evaluar la *sequía meteorológica*, la cual usualmente se define sobre la base de los grados de sequedad en comparación con una cantidad de lluvia “normal” o promedio y sólo toma en cuenta registros de precipitación.

La mayoría de las definiciones de sequía son bastante antropocéntricas. Lo anterior se refleja en lo que sostienen algunos científicos, que una sequía es tal cuando el fenómeno tiene efectos adversos sobre el hombre. De esta manera, si se presenta un periodo de precipitación nula o escasa en comparación con los registros normales de lluvia para una zona determinada que afecte a los ecosistemas locales pero que no llegue a tener consecuencias sobre el hombre y sus actividades no se debe considerar como una sequía; sin embargo, si se presentan las mismas condiciones de

precipitación nula o baja y se llegan a observar consecuencias sobre el hombre o sus actividades, se debe considerar que ocurrió una sequía (NDMC, 2003).

1.2. Clases de Sequía

Wilhite y Glantz, (1985), en su trabajo “Understanding and Defining Drought” define cuatro tipos de sequía, atendiendo a sus orígenes y sus efectos, y son:

- a) *sequía meteorológica*: Está referida al grado de desviación de la precipitación en comparación a un comportamiento “normal”, de una serie de tiempo preestablecida. Sin embargo, la magnitud de la desviación y del tiempo no son fijos, más bien dependen de la forma como regionalmente evalúan el fenómeno. Hay coincidencia al señalar a la sequía meteorológica como la primera indicadora del fenómeno sequía.
- b) *sequía agrícola*: Está relacionada con la sequía meteorológica y su impacto en los cultivos, considera el proceso en términos de balance de humedad, es decir evalúa la evapotranspiración real, potencial, el déficit de agua en el suelo que a su vez depende de las características físicas del mismo, y considera la especificidad del cultivo en cuanto a sus requerimientos de humedad, en función de la etapa de crecimiento y la biología de la planta, y plantea que este tipo de sequía puede presentarse posterior a la presencia de una sequía meteorológica.
- c) *sequía Hidrológica*: Está referida a los efectos de periodos de precipitación relativamente cortos, es decir a los escurrimientos a nivel de superficie y

subsuelo, su impacto se ve reflejado en la recarga de los acuíferos, lagos, presas, su impacto es de largo plazo, es decir, en tanto la sequía agrícola presenta un efecto inmediato en los cultivos, la sequía hidrológica puede afectar a la producción de varios años, la producción hidroeléctrica o la extracción del agua del subsuelo.

- d) *sequía Socioeconómica*: Se plantea en términos de suministro de agua y demanda por grupos humanos, por lo tanto, está muy relacionada con los efectos de corto y largo plazo de los otros tipos de sequía. La sequía ocurre cuando la demanda de agua de un grupo social, en un lugar determinado excede el suministro, es decir, es una combinación entre disminución de la precipitación y el crecimiento de las necesidades de la población o de las actividades productivas.

En este sentido el Centro Nacional para la Mitigación de la sequía (NDMC por sus siglas en inglés) señala que la sucesión de los tipos de sequía es: la *sequía meteorológica o climática* puede causar *sequía hidrológica*. La frecuencia y severidad de la sequía hidrológica usualmente son definidas a escala de cuenca o cuerpo de agua. Luego de que los cuerpos de agua se ven mermados por la disminución en los montos de precipitación, se ven afectados los cultivos (*sequía agrícola*) lo cual vincula varias de las características de la sequía meteorológica con impactos agrícolas (NDMC, 2003). Es decir, se puede considerar sequía agrícola cuando la cantidad y la distribución de las lluvias, los recursos hídricos superficiales y sub superficiales, las reservas de agua del suelo y las pérdidas por evaporación se

combinan de tal forma que el rendimiento de los cultivos y de la cría de animales, disminuye notablemente (OMM, 1993). Cabe destacar con respecto a este último punto que la sequía agrícola puede ocurrir antes que la sequía hidrológica si nos referimos al efecto de la disminución o mala distribución de las precipitaciones en agricultura de secano, mientras que si nos referimos a los impactos en la agricultura bajo riego, los efectos se presentaran una vez mermados los caudales de río o niveles de embalse, en este caso la sequía agrícola se presenta después de la sequía hidrológica.

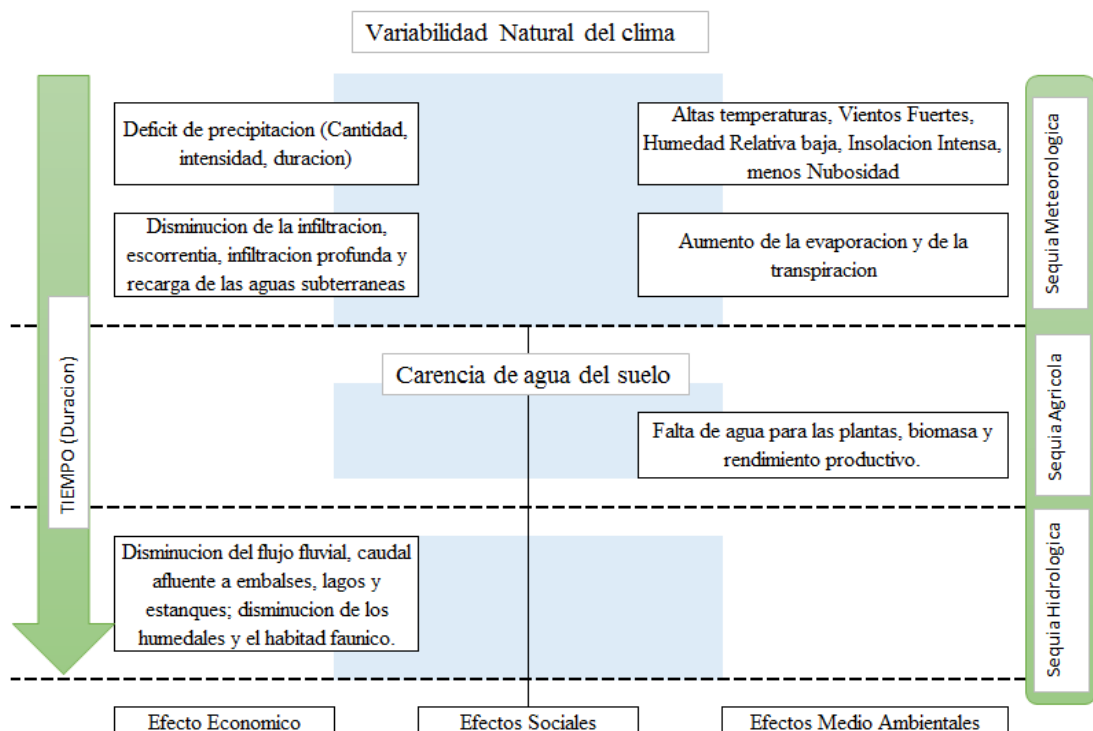


TABLA N° 1 Secuencia de sucesos de sequía y de sus efectos para tipos de sequía comunmente aceptados. Todas las sequias son consecuencia de un deficit de precipitacion o de sequia meteorologica, que a su vez puede provocar otros tipos de sequia y efectos (fuente: Centro Nacional de Mitigacion de Sequia, Universidad de Nebraska-Lincoln, Estados Unidos de America).

Sobre la interrelación entre los tipos de sequía algunos autores afirman que establecer una relación entre sequía agrícola y los otros tipos de sequía es una tarea compleja ya

que puede haber un impacto negativo en los cultivos por una distribución inadecuada de la precipitación, sin que necesariamente haya ocurrido sequía meteorológica o hidrológica, citado por Martelo y Puche (2004); la relación entre las diferentes categorías de sequía puede observarse en el Tabla N° 1.

Li (1993) expreso que, si bien los cuatro tipos de sequía enumerados se distinguen por distintas características de formación, los factores que afectan a cada tipo de sequía están correlacionados, siendo la sequía meteorológica la más importante por cuanto todos los tipos de sequía se derivan de ésta.

1.3. Variables útiles en el análisis de sequía

Según Cadena, M. (2005), las variables más utilizadas para la caracterización de la sequía son:

1. Precipitación; un buen índice de sequía necesariamente debe incluir la precipitación dentro de los cálculos para su medición, debido a que es común para todos los tipos de sequía el hecho de que se originan por una deficiencia de precipitación generada por un patrón climático inusual. Esta variable representa la cantidad de lluvia en milímetros (mm), registrada diariamente en la estación meteorológica; parámetro utilizado por los métodos de Palmer, Deciles o el SPI.
2. La evapotranspiración potencial o de referencia (ET_o); equivale a la cantidad máxima de agua capaz de ser perdida por la vegetación cuando es ilimitada la cantidad de agua suministrada al suelo; se calcula con base a información de

temperatura, tensión de vapor, horas sol y velocidad del viento, según la ecuación de Penman- Monteith, (IDEAM, 2000).

3. Temperatura del aire; la temperatura junto con las demás variables climáticas es necesaria en el cálculo de la evapotranspiración potencial cuando se utiliza el método del Índice de Disponibilidad Hídrica. El uso de modelos basados en la temperatura media ha proveído información valiosa en el estudio de la sequía, ya que se aplica en la medición de la evaporación dentro del índice de sequía.
4. Humedad Relativa, varias pruebas han incorporado dentro de los índices de humedad mediciones de déficit de saturación, como un indicador de la potencia de la sequía. Ejemplos son las relaciones del tipo Delton usados para estimar la evaporación del agua, la relación Popov (1984) usando la depresión del bulbo húmedo y la relación Ivanov (1984) el cual incorpora la humedad y la temperatura (OMM, 1975).
5. Velocidad del Viento; la sequía atmosférica, es un término utilizado para indicar una sequía anormal del aire. En la literatura rusa la palabra sukhovei, es usada para describir un caso particular de sequía atmosférica en el cual los efectos dañinos de alto déficit de vapor son intensificados por una temperatura más alta que lo usual y un periodo extenso de vientos fuertes a moderados (OMM, 1975).
6. Horas sol; las operaciones agrícolas incrementan la productividad general, pero causa otros cambios los cuales no son siempre benéficos, particularmente

en áreas propensas a sequía. Los principales efectos son exponer a los suelos protegidos por el momento a la radiación, el viento y la lluvia. La radiación sobre una superficie vegetal es un ingrediente esencial para una buena producción y con agua adecuada mantiene la transpiración de vapor. Sin embargo, una vez el suelo este descubierto por sequía, está expuesto a radiación directa y suceden marcados cambio en el balance de calor. El suelo llega a ser mucho más caliente durante el día y más frío durante la noche y estos rápidos cambios resultan en otros cambios físicos incluyendo la desintegración de las partículas del suelo y de aquí el riesgo a la erosión.

7. Capacidad de almacenamiento del suelo; las propiedades físicas que afectan la retención de agua son la textura y la estructura de los suelos, influenciadas por los contenidos de materia orgánica. La capacidad de almacenamiento se basa en los volúmenes de porosidad que poseen diferentes texturas. Los suelos de muy alta capacidad de almacenamiento son aquéllos que se caracterizan por texturas finas a muy finas como las arcillosas y además porque la profundidad del perfil del supera los 1.5 m. Mientras que los suelos muy superficiales con profundidades siempre menores de 40 cm y características de textura gruesas como franco – arenosas o arenosas, definen unidades de almacenamiento muy bajas.

Las anteriores variables combinadas dentro de los métodos de cálculo permiten establecer en términos generales, la intensidad, duración y la superficie afectada por la sequía. El comienzo y el final de la sequía son muy difíciles de establecer, por su

vaguedad respecto al tiempo. El comienzo de la sequía, por ejemplo, no coincide con la terminación de la última lluvia ya que está directamente relacionada con el contenido de humedad del suelo. Por esta razón, es difícil validar índices estadísticos, que se limitan al análisis probabilístico de la lluvia e incluso aquellos que involucran otras variables para determinar la humedad disponible en el suelo. Lo ideal es combinar estos métodos con imágenes de satélite que muestren las condiciones de la vegetación, para obtener una zonificación de áreas realmente vulnerables, Cadena, M. (2005).

1.4. Causas comunes en el déficit de agua

Al fenómeno de sequía se le conoce más por sus efectos que por sí mismo. El amplio espectro del fenómeno, su persistencia y sus características tan particulares y tan elusivas, podría decirse que aún las definiciones más amplias y completas se quedan cortas en acotar lo que se pretende definir.

Si bien los efectos de una sequía generalizada se dejan sentir y afectan a todo un sistema geográfico, económico, demográfico e hidrológico, en especial, desde el punto de vista de las actividades humanas, cada sector tiene un particular enfoque del problema. Ello plantea la dificultad de llegar a un punto de acuerdo común y general en el que converjan los puntos de vista y las diversas opciones con que el fenómeno es visualizado, entendido y sobre todo afrontado en sus consecuencias.

Entre las causas más relevantes, para que se produzca sequía Magaña et al (1997), Estrada (2001) y Contreras (2003), mencionan las siguientes:

- a) Las manchas solares que alteran la cantidad de energía que llega a la superficie de la Tierra; sin haber una comprobación fehaciente, sino por la coincidencia con que ocurre, es probable que la actividad solar también tenga influencia en la alteración de los movimientos atmosféricos, y con ello en la ocurrencia de la sequía. Se ha observado que la presencia de manchas solares, que ocurren alrededor de cada 11 años, podría ser más circunstancial: la modificación de la tasa con que llega la energía solar a la tierra incide en el cambio de temperatura y presión atmosférica y con ello en que los patrones regulares de circulación se alteren.
- b) Las alteraciones en la circulación de los vientos generados por modificaciones en el albedo superficial o por cambios en la temperatura superficial de los océanos.
- c) La oscilación del Sur *El Niño* (ENSO, por sus siglas en inglés), el término oscilación del Sur se usa dentro del contexto de variaciones climáticas a escala global. Bjerknes en 1967, formuló la hipótesis que gradientes normales de la temperatura superficial del mar, entre el relativamente frío Pacífico Ecuatorial Oriental y las cálidas aguas en el Pacífico Occidental, daban lugar a una célula de circulación caracterizada por flujos Este-Oeste en niveles bajos de la atmosfera en la zona tropical, convección en el Pacífico Occidental, flujos Oeste-Este en alta troposfera y subsidencia en el Pacífico Oriental (IDEAM, 1998). Cuando esta circulación conocida como Walker, se debilita, los vientos Alisios, el afloramiento ecuatorial y las corrientes ecuatoriales

norte y sur se debilitan. Esto trae como resultado una acumulación de aguas cálidas y aumento del nivel del mar y de la temperatura en el Pacífico Oriental. Esta situación en casos extremos se conoce como el fenómeno Cálido del Pacífico (El Niño) y si ocurre lo contrario se conoce como La Niña. Estos fenómenos provocan cambios en la precipitación. El fenómeno del Niño produce alteraciones a escala global, regional y local, las cuales implican el comportamiento de la lluvia con una notoria reducción del acumulado de la precipitación.

- d) Es probable que aun en pequeña escala, las actividades humanas estén influyendo en el mismo fenómeno. Las crecientes concentraciones de CO₂ en la atmósfera y su consecuente calentamiento, la alteración de la capa superior de ozono y el aumento de partículas suspendidas en el aire, producto de la quema de combustibles fósiles, una de cuyas manifestaciones es el *efecto invernadero*, pueden modificar las condiciones normales de humedad y precipitación.

1.5. La vulnerabilidad frente al riesgo de sequía

El consumo humano y los requerimientos de la industria y agricultura exigen la disponibilidad de grandes volúmenes de agua, que se obtienen de diversas fuentes: pozos profundos, ríos, lagos, lagunas artificiales, etc. Estas fuentes de abastecimiento tienen un origen común: Las Precipitaciones, las cuales una vez que fluyen sobre la tierra, constituyen las aguas superficiales o se infiltran para formar las llamadas aguas subterráneas.

Al respecto, Jackson (1989) afirma que la precipitación en sus diferentes tipos (lluvia, nieve o granizo) representa la entrada de agua a la superficie terrestre en la mayor parte del planeta; inclusive, en aquellas partes de la tierra cuyo suplemento de agua depende de ríos y de aguas subterráneas, originadas en otras regiones, la oferta de agua depende de la precipitación en esas regiones.

El estudio de la precipitación y de sus efectos sobre el ambiente presenta una serie de dificultades derivadas de algunos de los rasgos más característicos: su variabilidad, tanto espacial como temporal, y de su duración e intensidad. Estas características hacen que, por ejemplo. Observaciones puntuales de la precipitación generalmente no permitan caracterizar una región, hay lugares en los que estas observaciones son relevantes por la poca información existente en esos lugares y por lo tanto debe tenerse cuidado a la hora de evaluarlas.

Jackson (1989) señala que dada la variedad de orígenes que tiene la lluvia, las características de las precipitaciones (montos, distribución estacional, intensidad y frecuencia de ocurrencia) varían considerablemente en el tiempo y espacio. El carácter de la lluvia puede variar no sólo de un lugar a otro sino también con el tiempo en un lugar particular. Según este autor, los efectos de las características de las lluvias no son constantes, variando no solo con otras condiciones físicas tales como tipo de suelo y relieve, sino también con condiciones económicas, sociales y políticas, más aun, el factor humano varia con el tiempo y no es fácil determinar su influencia sobre los efectos de un cambio en las características de las lluvias.

Según Fernández (1999) la variabilidad de las precipitaciones es el rasgo que mejor define a este elemento climático. Al respecto Jackson (1989) afirma que la variabilidad de la lluvia ha sido materia de muchos comentarios, pero en realidad se han llevado a cabo relativamente pocos análisis cuantitativos de este factor.

La naturaleza crítica de las fuentes de agua y las fluctuaciones en la oferta están ligadas para darle mayor relevancia y por lo tanto recibir mayor atención que en otras regiones. Dada la situación económica en muchas áreas, es difícil evitar que la variabilidad de la precipitación tenga efectos adversos en la sociedad, Jackson (1989), al respecto, Puche, (2004) establece que en algunos casos los impactos de la variabilidad de las precipitaciones son mayores en áreas con una Evapotranspiración (ETo) más alta y en otros casos por problemas socioeconómicos.

El concepto de riesgo natural, tal y como lo define Ortega (1991), hace referencia a la eventualidad de que ocurra un daño para las personas o sus bienes en un espacio afectado por un proceso natural. La tipología de estos eventos es muy amplia y el grupo perteneciente a los procesos climáticos es uno de los más numerosos, Fernández (1999).

Mitchell (1990), establece que el riesgo es la frecuencia de los incidentes que causan pérdida y que para dimensionar correctamente el impacto que pueden generar estos incidentes debe evaluarse el grado de peligro, el cual, además del ya mencionado riesgo, es una función de la exposición, la vulnerabilidad y la respuesta. La exposición es la magnitud de la población y de las estructuras en riesgo. La vulnerabilidad se puede medir en términos de preparación, donde un alto grado de

acciones de preparación, en muchos casos con base a experiencias, da por resultado una vulnerabilidad baja. La respuesta incluye las acciones adoptadas por los directamente afectados y por las dependencias gubernamentales externas para mitigar las pérdidas que podría causar el peligro ambiental.

Es pues pertinente, hablar de peligros naturales para hacer referencia a un acontecimiento extremo en la naturaleza, potencialmente dañino para los seres humanos y que se produce con una frecuencia suficientemente reducida para no ser considerado como parte de la condición o estado normal del medio, pero sin dejar de ser motivo de preocupación en una escala de tiempo humana, según Burton (1996).

La sequía, según la clasificación de Kates y Burton (1964), es un peligro natural de origen meteorológico. El grado de peligro asociado a la ocurrencia de eventos de sequía solo se evaluará en su verdadera dimensión, en la medida en que se tome en cuenta la vulnerabilidad, la exposición y la respuesta, además del riesgo, tal como lo señala Mitchell (1999) para todos los peligros naturales en general.

Existen otros criterios como el de Wilhite y Svoboda (2000) el cual consiste en considerar al riesgo asociado a la sequía como el producto de la probabilidad de ocurrencia a varios niveles de seguridad y de la vulnerabilidad de la sociedad a este evento.

Adaptando el criterio establecido por Mitchell (1999) al estudio de los peligros naturales, se pueden establecer los siguientes pasos para el estudio de la sequía:

- ✓ Evaluación del riesgo

- ✓ Evaluación de la exposición
- ✓ Monitoreo alerta y predicción temprana
- ✓ Estudio de la vulnerabilidad

Una vez ocurrido el peligro viene la fase de estudio de la evaluación de los impactos, respuesta, recuperación y construcción. Nótese que el riesgo es la primera fase en todo este complejo proceso de la evaluación de la sequía.

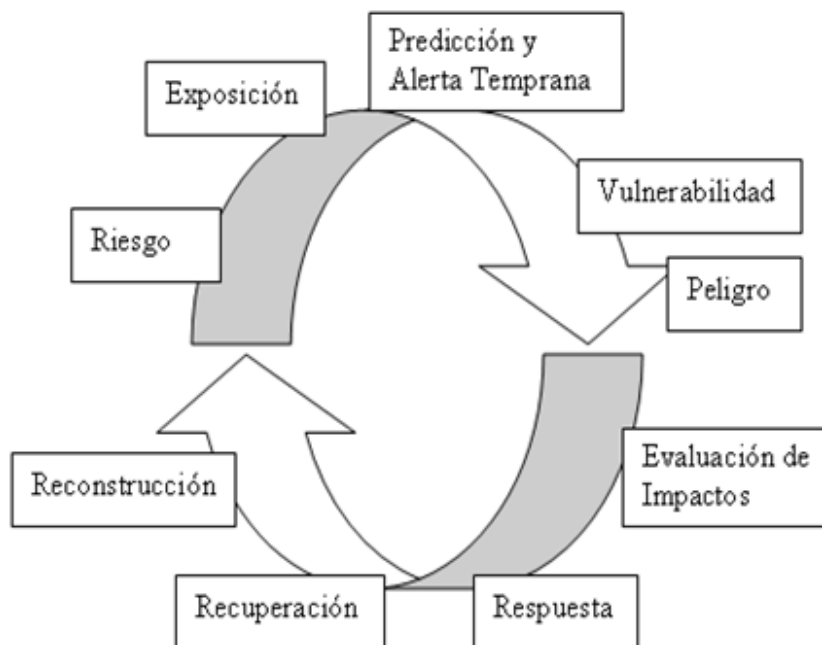


FIGURA N° 1 Ciclo de la Gerencia del Peligro de sequía Modificado Wilhite y Svoboda 2000).

Wilhite y Svoboda (2000) establecen que para estudiar la sequía como cualquier otro peligro natural hay que tomar en cuenta que esta difiere de otros peligros naturales tales como inundaciones, heladas, terremotos, etc., en tres aspectos fundamentales:

- En primer lugar, los efectos de la sequía se acumulan lentamente sobre un periodo considerable de tiempo y pueden permanecer por años por lo que el comienzo y el final de un evento de sequía son difíciles de determinar, Tannehill, (1947). Por el contrario, la mayoría de los peligros naturales presentan un comienzo y un final del evento bien definido lo que permite, en casi todos los casos, medir sus dimensiones ya sea por volumen o energía o midiendo los efectos o los impactos.
- El segundo aspecto, es la ausencia de una definición precisa y universal de la sequía. El hecho de que no exista una escala universal para medirla trae como consecuencia que no exista una definición de sequía que sea válida universalmente. En casi todos los casos de peligros naturales se dispone de escalas que permiten medirlos sobre una base constante en cualquier lugar del mundo; por ejemplo, la escala Richter mide los terremotos en términos de la energía liberada, en ergios; las inundaciones por lo general, se miden en términos de la descarga de agua en un punto determinado del río y del aumento y descenso de los niveles de agua de crecida en un punto determinado, Burton (1999). Por otra parte, existe otro tipo de escalas de medición para estos peligros que involucran un enfoque diferente. Estas tratan de examinar y medir el efecto o impacto. En el caso de los terremotos la escala de este tipo es la de Mercalli Modificada, la cual intenta medir no el terremoto en si sino su efecto en las personas. Existen pocos equivalentes de esta escala para otros peligros naturales. En el caso de sequía el problema aun

es más grave ya que no existe una escala universal que pueda medirla y aunque recientemente el Centro Nacional para la Mitigación de la sequía, Nebraska EUA, y el Consulado de Coordinación de la sequía Oeste, EUA, han desarrollado una metodología para valorar los impactos de la sequía, según Knutson et al, (1998), es decir realizar un análisis interdisciplinario de dichos impactos y las opciones de gerencia disponibles para que esta valoración tenga sentido.

- Por último, los impactos de la sequía no son estructurados. La mayoría de los peligros naturales tienen una estructura de sus impactos. En el caso, por ejemplo, de las inundaciones las personas que están expuestas al riesgo de que ocurra el peligro son aquellas que se encuentran en el lecho de crecida del río, en cambio la sequía puede afectar a cualquier lugar de la tierra en cualquier momento.

Estas particularidades hacen que los problemas de la sequía sean especialmente difíciles de abordar, teniendo la necesidad de desarrollar métodos específicos para la región bajo estudio, ya que las sequías pueden presentar variaciones significativas en cuanto a sus características. Es importante mencionar que incluso la definición de sequía puede variar según la región y el objetivo de estudio.

1.6. Algunas consideraciones sobre los índices de sequia

Analizando los diferentes índices que se han utilizado para establecer definiciones de sequía dentro de programas de monitoreo y alerta temprana o simplemente en estudios del comportamiento histórico de la sequía se observa coincidencia en que la

sequía es una condición de humedad insuficiente causada originalmente por un déficit de precipitación durante un periodo de tiempo. Las dificultades con respecto a la sequía están primeramente relacionadas con el periodo de tiempo durante el cual el déficit se acumula y la conexión entre el déficit de precipitación y el déficit de las fuentes de agua utilizables y los impactos que eso conlleva, citado por McKee et al, (1999).

Es muy conocido que la sequía es un fenómeno de desarrollo gradual (OMM, 1973), que comienza y termina de maneras no bien definidas y su impacto es variado, razones por las cuales algunos autores afirman que obtener conclusiones y recomendar una definición única sobre la base de criterios exclusivamente nacionales es “inútil”. Escoger el índice que nos permite adoptar una definición de sequía es por lo tanto difícil, depende de diferencias regionales y necesidades.

Dracut et al, (1980) establece que, aunque dependiendo de la perspectiva disciplinaria el concepto de sequía cambia, por ejemplo al hidrólogo le interesa el periodo en el cual los caudales del río están por debajo de lo normal, afectando los niveles de embalses y reservorios de agua, al agricultor le interesa el concepto de sequía en el contexto del periodo durante el cual la humedad en el suelo es insuficiente para los cultivos y a los economistas les interesa el periodo durante el cual el suministro de agua es insuficiente para el desarrollo de las actividades económicas. Este autor afirma que estos conjuntos de aspectos se engloban en tres preguntas que se deben responder antes de realizar cualquier estudio de sequía:

- Primero: ¿Cuál la naturaleza del déficit de agua? Si la naturaleza del déficit es de tipo meteorológico puede considerarse un índice que relacione variables climáticas. Conjuntamente con la precipitación, muchos de los índices actuales son calculados a partir de datos de la humedad del suelo, de las salidas y entradas de agua por diferentes vías, de la evaporación y de la evapotranspiración. Muchas de esas variables no son observadas y tienen que ser estimadas de datos de la precipitación o de otras variables climáticas. Durante la estimación una simplificación de la realidad es inevitable ya que estos parámetros son fuertemente dependientes de la naturaleza del suelo y de la topografía las cuales varían ampliamente. También, el hecho importante de que debido a que el aporte de agua incluida en estas variables es pequeño en comparación con la lluvia, puede ser despreciado, citado por Olapio, (1985). Este autor, luego de comparar el PDSI (Palmer, 1965) con RAI (Rooy, 1965) y BMD I (Bhalme y Maher. 1967), concluyo que es mejor usar solo datos de precipitación para propósitos de uso meteorológico. Los datos de precipitación son ampliamente usados para calcular índices de sequía meteorológica ya que son, por lo general, los registros más largos que están disponibles. Los estudios basados en índices que sólo utilizan precipitación no reflejan el espectro de condiciones relacionadas con la sequía, pero sin embargo sirven como una solución pragmática cuando se trata de estudiar la sequía en regiones con poca disponibilidad de datos de otras variables climáticas. Además, si el interés está enfocado en determinar la causa de los

eventos de sequía el estudio debe centrarse en la sequía meteorológica a través de la precipitación u otro elemento climático.

3. Segundo: ¿Cuál es el periodo de agrupación temporal más conveniente para el análisis del tipo de sequía que se quiere estudiar?, luego de seleccionar la naturaleza del déficit de agua que se desea estudiar, el análisis de la sequía amerita decidir sobre el periodo de agrupación temporal que se va a utilizar. El periodo de agrupación varía dependiendo de la finalidad de estudio desde 1 hora o menos para análisis de eventos de inundaciones hasta décadas para estudios de cambio climático. En el caso de la sequía los periodos más comúnmente utilizados son el mes, los montos estacionales y los anuales. Byun et al (1999) afirman que, en algunos casos, la unidad diaria debería ser usada, ya que una región afectada por una situación de sequía puede retornar a la normalidad con solo días de precipitación. Este criterio no es compartido por otros autores entre ellos Wilhite y Svoboda (2000) los cuales aseguran que las sequías generalmente requieren un mínimo de dos o tres meses para establecerse con lo cual un periodo de agrupación diario no tendría sentido. Dracup et al (1980) establece que un aspecto que se ve afectado por el periodo de agrupación de los datos es el grado de correlación entre eventos sucesivos de sequía. Según este autor, en general periodos cortos de agrupación tienden a presentar una correlación mayor entre eventos sucesivos que periodos largos.

- Tercero: ¿Cómo van a ser distinguidos analíticamente los eventos de sequía dentro de una serie de tiempo?; la mayoría de los índices consideran sequía cuando ocurre una deficiencia en un determinado tiempo, sino también la ocurrencia consecutiva de esa deficiencia, por lo tanto, es muy importante determinar cuándo comienza el déficit. Cuánto dura y con qué frecuencia se ha presentado. Al respecto Dracup et al (1980) establece que es muy importante especificar el método a través del cual los eventos de sequía van a ser acotados dentro de la serie de tiempo.

Para Byun et al (1999) la mayoría de los índices valoran la deficiencia con respecto al promedio de un periodo predefinido, sin definir claramente los eventos de sequía dentro de la serie de tiempo.

Cuando se usa el SPI McKee et al (1999) definen un evento de sequía en la serie de tiempo estableciendo que, para cualquier escala de tiempo, es el periodo en el cual el SPI es continuamente negativo y ha alcanzado el valor de -1 o menos. El evento comienza la primera vez que cae por debajo de cero y termina cuando el SPI vuelve a ser cero o un valor positivo, entendiendo que solo será un evento de sequía si durante ese periodo el SPI ha presentado al menos una vez el valor de -1 o menor. Cuando un evento de sequía ocurre, la información importante para el público usuario de ésta, aparte de los problemas relacionados con la predicción, son: el tiempo que ha durado la sequía, cuanto es el déficit de agua ocurrido y, cuanta lluvia es necesaria hoy para retornar a las condiciones normales. La mayoría de los índices

actualmente usados, salvo el SPI y el SPDI, solo utilizan el valor de precipitación y no relacionan el valor del índice con características importantes de la sequía como su duración y severidad, Byun et al, (1999).

1.7. Características de los eventos de sequía

Existen en la literatura diferentes criterios acerca de los componentes de las sequías

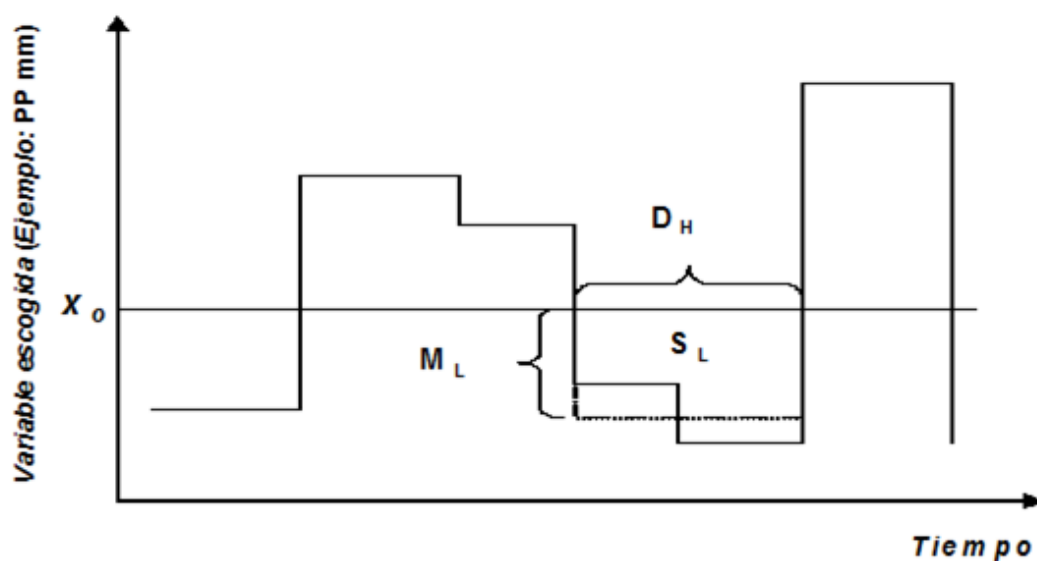


FIGURA N° 2 Parámetros fundamentales de los eventos de sequía (Magnitud M_L , Duración D_L , Severidad S_L). Fuente Dracup et al. (1990).

Dracup et al (1980) afirma que hay tres características que describen los eventos de sequía: Duración, Magnitud y Severidad. Según este autor estas características quedan claramente definidas una vez que se ha seleccionado el nivel de truncado, es decir el nivel que divide a la serie de tiempo en secciones de “por encima de lo normal” y “por debajo de lo normal”. Una vez seleccionado este nivel de truncado, que el autor denomina χ_0 , la magnitud (M_L) se define como el promedio de los valores

de desviación a partir de χ_0 , la duración (D_L) es la distancia o tiempo entre puntos sucesivos de corte de χ_0 , y la severidad (S_L) es la desviación acumulada.

La magnitud, duración y severidad están relacionadas a través de la expresión:

$$S_L = M_L * D_L$$

Por su parte Wilhite y Svoboda (2000) consideran que las sequías difieren una de otras en tres características esenciales: Intensidad, Duración y Cobertura espacial. La intensidad, se refiere al grado del déficit de precipitación o a la severidad de los impactos asociados a ese déficit. La intensidad es generalmente medida a través de las anomalías de algunos índices y está muy seriamente asociada a la duración en la generación del impacto, es decir, un valor de magnitud ocurrido en varios meses causara más impacto que ese mismo valor ocurrido en un solo mes. La duración se refiere a cuánto tiempo se encuentra el índice por debajo de lo normal y la cobertura espacial a cuanta área es afectada por la sequía.

La definición de cada una de estas características está hecha de forma tan general que es difícil ubicar los eventos dentro de la serie de tiempo según criterio establecido por Wilhite y Svoboda (2000) e inclusive es difícil determinar si hay alguna analogía entre la característica “duración”, según estos autores, y la establecida por Dracup et al (1980). Pareciera que la intensidad de Wilhite y Svoboda (2000) está relacionada con la magnitud de Dracup et al (1980) en lo referente a la medición de las anomalías del índice pero en este último está claramente especificado que se refiere al promedio de dichas anomalías en cambio cuando Wilhite y Svoboda (2000) hablan de

intensidad se refieren a la desviación de un solo valor (mensual, trimestral o anual) no del evento, es decir, no de un conjunto de valores consecutivos por debajo de lo normal.

Por otra parte, para McKee et al (1999) las características de las sequías son Intensidad, Duración y Magnitud. Cada una de estas características se presentan como funciones que dependen de la escala de tiempo establecida ya sea explícita o implícitamente. Al igual que los anteriores autores, McKee et al (1999) tienen sus propias definiciones de cada una de estas características, coincidiendo su definición de intensidad con la de Wilhite y Svoboda (2000)

Según McKee et al (1999) la magnitud de un evento de sequía está definida como:

$$MS = - \left(\sum_{j=1}^n SPI_{ij} \right)$$

Donde; j es el primer mes con sequía y n el mes en el que termina la sequía para cualquier escala de tiempo i.

En este caso la magnitud es la suma y no el promedio como en la definición realizada por Dracup et al (1980), y tiene más relación con la severidad definida por este autor.

Según Sazonov (1989), el punto central para los estudiosos de la sequía y de su formación en el tiempo y el espacio es como definirla y seguir su evolución. Al respecto se puede observar que prácticamente todos los autores que han abordado este fenómeno, establecen sus propios puntos de referencia cuando definen la sequía; basados en un conjunto de factores, entre los que figuran, principalmente, objetivos

de sus investigaciones, grado de desarrollo de la temática en el momento de hacer sus trabajos y la factibilidad de las técnicas de análisis disponibles.

Todas estas características hacen que los problemas de sequía sean difíciles de abordar ya que dependiendo de la escala de tiempo establecida se podrán obtener resultados distintos, así como diferentes impactos por lo cual la determinación de la misma debe estar orientada a cumplir con los objetivos propuestos.

1.8. Índices de sequía

Un índice de sequía es un numero sencillo que asimila muchos datos, mediante la aplicación de métodos estadísticos y trata de mostrar de alguna manera una condición de sequía, esta condición será expresada según la definición empleada por Hayes, (2000).

Sánchez (1999), define al índice de sequía como una escala de severidad de la sequía, generalmente adimensional y permite la comparación de las características de las sequias en tiempo y espacio. Los índices se derivan de registros históricos de una o más variables y se combinan para formar alguna escala arbitraria que luego se usa para clasificar las sequías.

Hisdal y Tallaksen (2000) establecen la diferencia entre los términos *índice de sequía* y *evento de sequía* los cuales son frecuentemente confundidos. Un índice de sequía es un número sencillo que caracteriza el comportamiento general de la sequía como una medida puntual. Por otra parte, un evento de sequía es la definición en el tiempo de

cada periodo en que ocurrió sequía, ello incluye el comienzo y el fin de la sequía. La definición de eventos de sequía requiere el uso de índices.

Existe una gran cantidad de índices que miden cuanto se desvía la precipitación de un periodo de tiempo dado de lo históricamente establecido como normal y hay otros que se basan en el concepto de oferta y demanda de la ecuación de balance hídrico. Aunque, entre los mejores índices, no hay alguno inherentemente superior al resto en todas las circunstancias, algunos índices son mejores que otros para ciertos usos, según Hayes, (2000).

1.8.1 Porcentaje de la Normal

El porcentaje de precipitación normal es la relación que existe entre la precipitación acumulada en un periodo dado (mes, bimensual, trimestral, etc.) y la precipitación media del mismo periodo, para una región, expresado de manera porcentual. La precipitación media se le conoce como precipitación normal y se obtiene a partir del valor promedio de las precipitaciones ocurridas en un periodo de 30 años (OMM 1996).

Limites Porcentuales	Clasificación de Sequias
-20.0 % a -30.0 %	Ligera
-30.1 % a -40.0 %	Moderada
-40.1 % a -49.0 %	Fuerte
-49.1 % a -59.0 %	Aguda
<-59.0 %	Intensa

TABLA N° 2 Clasificación de la precipitación según el Índice Porcentual de la Normal. Fuente Hayes (2000).

Los valores porcentuales estimados para cada año indican el déficit (valores negativos) o el excedente (valores positivos) en la precipitación anual ocurrida. Por su parte, valores porcentuales próximos a cero corresponden a valores cercanos al promedio histórico. (sequia.edu. 2000).

Este índice tiene la ventaja de ser sencillo, entendible, se pueden hacer análisis utilizando este índice cuando se trate de una pequeña región o una estación; pero la desventaja es que la precipitación generalmente no se ajusta a una distribución normal. En general, el promedio o la media no es igual a la mediana ni a la moda por lo tanto es muy poco representativo de la situación que normalmente ocurre.

Este índice puede calcularse usando diferentes periodos de agrupación.

1.8.2 Deciles

Este índice, desarrollado por Gibbs y Maher (1967), se basa en las medidas estadísticas denominadas cuantiles. En general el valor de una serie climatológica que es mayor que un porcentaje f de los valores de la serie y menor que un porcentaje $100-f$ de dichos valores constituye el cuantil f de la serie. Así, el primer decil agrupa a los montos de precipitación que ocurren al menos del 10% del total de ocurrencias. El segundo decil es el valor de precipitación por debajo del cual se encuentra el 20% y así sucesivamente hasta el décimo decil, por debajo del cual se encuentra el 100% de los datos.

Los deciles se agrupan en cinco clases que permite determinar periodos secos y húmedos suponiendo que por *muy por debajo* de lo normal corresponde a una

situación de sequía y *muy por encima* de lo normal a una situación de exceso de humedad.

Deciles	Clasificación	Porcentage
1 - 2	Muy por debajo de lo Normal	20 % mas bajo
3 - 4	Por debajo de lo Normal	20 % Cerca del mas bajo
5 - 6	Cerca de lo Normal	20 % del medio
7 - 8	Ligeramente Humedo	20% cerca del mas alto
9 - 10	Ligeramente Seco	20 % mas alto

TABLA N° 3 Clasificación de la precipitación según el Índice Deciles. Fuente Hayes (2000).

Este índice de sequía para la precipitación en un año calendario mostró estrecha relación con la sequía agrícola, independientemente de si la localidad era árida, semiárida, húmeda y a pesar del hecho de que la estación húmeda ocurriera en diferentes momentos del año y en algunos lugares se extendiera de un año a otro, Gibbs, (1987). En la literatura no se encontraron los registros en los que se basa la afirmación realizada por Gibbs por lo que es difícil evaluar en términos cuantitativos lo que significa “estrecha relación” entre la precipitación de un año y sequía agrícola, además se desconoce el indicador utilizado para evaluar sequía agrícola.

Los deciles todavía son ampliamente usados para monitorear la lluvia y preparar alerta a la sequía, inclusive sigue siendo un indicador de la política establecida por el gobierno de Australia para compensar a los agricultores por las pérdidas ocasionadas por eventos de sequía “Circunstancias de sequía extraordinaria” (DEC por su sigla en inglés) citado por Laughlin-Clark (2000). Según esta política el agricultor sólo es objeto de asistencia si la sequía muestra ser un evento que ocurre sólo una vez en 20-25 años (es decir, decil 1-2 para 100 años de registro), Hayes, (2000).

Si se desea trabajar con este índice, pueden escogerse diferentes escalas de trabajo usando una serie de promedios móviles con periodos de agrupación que van desde 1 a 36 meses, según Smith y McKeon, (1998).

El problema de describir la sequía con el índice deciles consiste en que a medida que el tamaño de la muestra disminuye, la probabilidad de encontrar un valor extremo es mayor. Para evaluar sequía que se considera una situación extrema dentro de la variabilidad climática es necesario tener una longitud de registro muy larga para no sobreestimar los casos de sequía, Puche, (2005).

1.8.3 Índice de Precipitación Estandarizada (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 periodos de tiempo, así como también permite monitorear fuentes de agua que responden a déficit de precipitación por largos periodos de tiempo, tales como acuíferos y niveles de embalses, Bordi et al, (2001).

La naturaleza de SPI permite determinar la frecuencia de la sequía o de un evento anormalmente húmedo a una escala de tiempo particular para cualquier localidad en el mundo que tenga registros de precipitación. El cálculo del SPI está basado en largos periodos de registro de precipitación en la escala de tiempo decidida. Estos 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 lluvia, es el principal factor que define si un periodo y área determinados son o no deficientes en agua, con respecto a las condiciones normales de largo plazo. Bajo esta premisa, 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 periodos 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).

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: β es el parámetro de escala; α es el parámetro de forma; $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma de α 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 (anual, semestral, trimestral, mensual,

etc.) y para cada mes del año. Las soluciones de máxima verosimilitud pueden ser usadas para estimar los parámetros α Y β Thom (1996).

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

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 está 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:

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

Donde; $H(x)$ 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 número de aplicaciones usando el SPI alrededor del mundo continúa aumentando, Agnew (2000); Komuscu, (1999). Sin embargo, hay relativamente pocas publicaciones explicando el índice por lo que han ocurrido confusiones con respecto lo que significa. Hayes (2000) aclara que la ecuación dada por Komuscu (1999) y repetida por Agnew (200) en la cual se define el SPI como “*la diferencia entre el valor de precipitación y la media dividida por su desviación estándar*” causa confusión acerca de la naturaleza de SPI. Hayes apunta que Agnew tiene razón al afirmar que esta definición que estandariza la data ha sido llamada “Anomalía estandarizada de la lluvia” por Jones y Hulme (1996). Según este autor, se han utilizado variaciones de las anomalías estandarizadas de la lluvia con conjuntos de datos, especialmente para analizar la lluvia en África, pero esto no es el SPI. Hay una diferencia entre los datos de precipitación estandarizada usando la definición de Agnew (2000) y el SPI. Tanto McKee et al, (1993, 1995) como Komuscu (1999) mencionan que los datos de largo registro usados para determinar el SPI para cualquier escala de tiempo deben ser normalizados primero. El procedimiento de normalizar utilizando una distribución de probabilidad es una característica muy importante del SPI y lo hace único. Edwards y McKee (1997) primero hacen esta importante distinción y dan una descripción detallada de cómo se puede obtener el índice.

Guttman (1999) aplicó diferentes distribuciones de probabilidad a los datos de largo registro y examinó el impacto de seis distribuciones sobre el valor del SPI. La recomendación de Guttman (1999) es que la distribución Pearson tipo III es la que

logra que los datos se ajusten mejor a una distribución normal. El SPI en este trabajo se calculará utilizando la distribución gamma como lo utilizó Edwards y McKee (1997). Por lo tanto, 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 periodos húmedos.

Valor SPI	CATEGORIA	PROBABILIDAD (%)
>2.00	Extremadamente Húmedo	2.3
1.50 a 1.99	Muy Húmedo	4.4
1.00 a 1.49	Moderadamente Húmedo	9.2
0.0 a 0.99	Ligeramente Húmedo	34.1
0.0 a -0.99	Ligeramente Seco	34.1
-1.00 a -1.49	Moderadamente Seco (Sequia Moderada)	9.2
-1.50 a -1.99	Muy Seco (Sequia Severa)	4.4
<-2.00	Extremadamente Seco (Sequia Extrema)	2.3

TABLA N° 4 Clasificación del SPI por categorías y su probabilidad de ocurrencia (Lloyd-Hughes

Dadas las ventajas de este índice (estandariza los valores de precipitación pudiendo comparar diferentes regiones, versatilidad en las escalas y facilidad de cálculo) es ampliamente usado en Estados Unidos, según Hayes, (2000).

Bussay et al (2000) examinaron la capacidad del SPI para monitorear condiciones de sequía hidrológica, condiciones de sequía agrícola y niveles de agua subterránea comparando los valores de SPI para diferentes escalas de tiempo con valores de caudales de río, de humedad del suelo.

1.8.4 Índice de severidad sequía de Palmer (PDSI)

Palmer (1962) desarrollo una metodología general para evaluar las anomalías meteorológicas en términos de un índice el cual permite comparaciones espaciales y temporales de la severidad de la sequía. El concepto principal alrededor de este índice consiste en considerar que la capacidad de precipitación requerida para que una actividad se desarrolle cerca de lo normal, en la economía establecida de un área durante un periodo dado, es dependiente del clima promedio del área y de las condiciones prevalecientes tanto durante, como las que preceden al mes o periodo en cuestión.

Para obtener la precipitación requerida se realiza un balance hídrico, el cual permite calcular valores razonables de la distribución temporal de déficit y de los excesos de humedad.

Consideraciones del Balance hídrico empleado por el PDSI.

Una particularidad del balance hídrico realizado en esta metodología es la aplicación de un procedimiento empírico tratado inicialmente por Marlatt y Kohler (1957), el cual consiste en dividir arbitrariamente al suelo en dos capas: la capa superior y la capa inferior. La capa superior es llamada suelo superficial y se asume tiene 1 pulgada de agua disponible a capacidad de campo. La evapotranspiración ocurre potencialmente desde la capa superior hasta que es consumida toda el agua de la capa; solo después de esto se comienza a consumir el agua presente en la capa sub superficial o inferior.

La Evapotranspiración potencial (PE) empleada en el balance puede ser estimada por cualquiera de los métodos existentes, por ejemplo: Tanque de evaporación, Thornthwaite, Penman Monteith, entre otros.

El agua disponible en el suelo ($S' = S'_s + S'_u$) se considera como la almacenada en la capa superficial (S'_s) y la almacenada en la capa inferior (S'_u) y depende de la precipitación (P), la evapotranspiración potencial (PE) y la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (WC). La capacidad de almacenamiento del suelo en la capa inferior depende de la profundidad efectiva de la zona de raíces y de las características del suelo del área bajo estudio.

La pérdida de agua del suelo ($L = L_s + L_u$) viene dada por la pérdida en la capa superficial (L_s) y en la capa inferior (L_u). La pérdida de humedad (L_u) depende de: el contenido de humedad inicial de la capa superior (S'_s), la precipitación (P), la evapotranspiración potencial (PE) y la capacidad de almacenamiento del suelo (AWC). Las pérdidas de agua L se determinan de la forma siguiente:

$$L_s = \begin{cases} S'_s & \text{si } S'_s < PE - P \\ PE - P & \text{si } PE - P < S'_s \end{cases}$$

$$L_u = \begin{cases} (PE - P - L_s) \frac{S'_u}{AWC} & \text{si } \frac{PE - P - L_s}{AWC} < 1 \\ S'_u & \text{si } \frac{PE - P - L_s}{AWC} > 1 \end{cases}$$

Donde:

L_s = Pérdida de humedad de la capa superficial.

$S's$ = Humedad disponible en la capa superficial al principio del mes.

PE = Evapotranspiración potencial para el mes

P = Precipitación para el mes.

Lu = Perdida de la capa sub superficial.

$S'u$ = Humedad disponible almacenada en la capa sub superficial al principio del mes.

AWC = Agua aprovechable del suelo.

Con referencia a la recarga de agua en el suelo, el balance hídrico presentado por Palmer considera que no hay recarga en la capa inferior hasta tanto la capa superficial no haya llegado a su capacidad de campo. De igual forma se asume que no ocurre escorrentía (RO) hasta después de que ambas capas del suelo alcancen la capacidad de campo.

La evapotranspiración real (ET) ocurre primero desde la capa superficial, y solo después que toda la humedad haya sido removida de esta capa, puede ser removida la humedad de la capa inferior. La ET depende tanto de la precipitación (P) como de la humedad disponible en el suelo (S'). El cálculo de ET se realiza mediante la ecuación:

$$ET = \begin{cases} PE & \text{si } (P > PE) \\ L + P & \text{si } (P < PE) \end{cases}$$

Dónde: PE es la evapotranspiración potencial y L es la perdida de humedad en el suelo ($L = L_s + Lu$) la cual depende a su vez de la disponibilidad de agua (S').

Variables Potenciales

Una vez realizados los balances hídricos partiendo de los supuestos planteados por Palmer, se generan las siguientes variables potenciales para cada mes de cada año:

Recarga Potencial (PR): es definida como la cantidad de humedad requerida para llevar al suelo a la capacidad de campo.

$$PR = AWC - S'$$

Donde S' es la cantidad de humedad disponible en ambas capas del suelo al principio del mes.

Pérdida Potencial (PL): es la cantidad de humedad que pudiera perderse del suelo si la precipitación en el mes considerado fuera cero.

$$PL = PL_s + PL_u$$

Donde:

$$PL_s = \begin{cases} PE & \text{si } (PE < S'_s) \\ S'_s & \text{si } (PE > S'_s) \end{cases}$$

$$PL_u = \frac{(PE - PL_s)}{AWC} S'_u$$

Escorrentía Potencial (PRO): es una medida de la cantidad de agua que se puede perder por no tener capacidad para almacenarla (Ej. El suelo está a la capacidad de campo y cae una lámina superior a PE). La PRO es inversamente proporcional al espacio disponible en el suelo para almacenar agua, es decir, la escorrentía potencial

será pequeña cuando la recarga potencial sea grande y será grande cuando el suelo este a capacidad de campo. La escorrentía potencial es una función de la cantidad de agua aprovechable y puede escribirse como:

$$PRO = AWC - PR = S' \quad 1$$

Coeficientes climáticos:

A partir de los promedios mensuales de las variables potenciales y de las variables reales obtenidas en los balances es posible establecer coeficientes que relacionan los promedios potenciales con los reales. Así para cada una de las variables potenciales, (evapotranspiración potencial, recarga potencial, escorrentía potencial y pérdida potencial) Palmer define un coeficiente climático mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Coef. de Evapotranspiración} = \alpha = \frac{\overline{ET}}{\overline{PE}}$$

$$\text{Coef. de Recarga} = \beta = \frac{\overline{R}}{\overline{PR}}$$

$$\text{Coef. de Escurrimiento} = \gamma = \frac{\overline{RO}}{\overline{PRO}} = \frac{\overline{RO}}{\overline{S'}}$$

$$\text{Coef. de Pérdidas} = \delta = \frac{\overline{L}}{\overline{PL}}$$

Los valores barras se refieren al promedio de todos los valores anuales de evapotranspiración, evapotranspiración potencial, escorrentía, escorrentía potencial, recarga, recarga potencial, pérdida y pérdida potencial.

Valores climáticamente aceptables (CAFEC por sus siglas en ingles).

Los valores climáticamente aceptables son definidos como el valor que deberían tener: la precipitación, la evapotranspiración real, la recarga, la pérdida y la escurrimiento para que se establezcan las condiciones normales. Para ello se procede de la manera siguiente: para cada mes de año se multiplica el valor de PE por el coeficiente α , y se realiza el balance, obteniendo nuevos valores de ET, R, RO, L, PR, PRO y PL. Para cada mes de cada año se multiplica cada variable potencial por su respectivo coeficiente climático con la finalidad de obtener los valores climáticamente aceptables (CAFEC) y sus variables:

$$\text{Evapotranspiración CAFEC} = \hat{ET} = \alpha * PE$$

$$\text{Recarga CAFEC} = \hat{R} = \beta * PR$$

$$\text{Escurrimiento CAFEC} = \hat{RO} = \gamma * PRO$$

$$\text{Pérdida CAFEC} = \hat{L} = \delta * PL$$

Las variables CAFEC permiten determinar la precipitación climáticamente aceptable (\hat{P}), precipitación requerida para que una actividad se desarrolle cerca de lo normal, para cada mes de cada año de todo el registro, a partir de la siguiente expresión:

$$\hat{P} = \hat{ET} + \hat{R} + \hat{RO} - \hat{L}$$

Índice de anomalía hídrica (Z).

Una vez obtenida la precipitación climáticamente aceptable (\hat{P}), se puede determinar el déficit de precipitación o la anomalía de precipitación (d) como la diferencia de la precipitación mensual del año en particular y la precipitación climatológicamente

aceptable del mes en cuestión. A partir de consideraciones prácticas y estadísticas es sabido que un determinado valor de la anomalía de precipitación significa cosas distintas de acuerdo al sitio y época del año en diferentes sitios y diferentes momentos. Esto sugiere que la importancia o el significado de cada diferencia dependen de alguna manera, de la humedad normal del clima para el mes y el lugar que está siendo considerado. Parece razonable que mientras menor sea la oferta con relación a la demanda, mayor significado tiene un déficit dado. Luego de analizar las series de datos de precipitación de 31 condados de Kansas y 12 condados de Iowa y de establecer relaciones entre la oferta y la demanda Palmer (1965) determinó que esa característica climática o factor de ponderación (k) podría ser razonablemente estimada para cada uno de los meses del año como:

$$k = \frac{\overline{PE} + \overline{R}}{\overline{P} + \overline{L}}$$

Donde los valores barras se refieren al promedio de evapotranspiración potencial (\overline{PE}), recarga (\overline{R}), precipitación (\overline{P}) y pérdida (\overline{L}).

El índice de anomalía de humedad mensual z queda definido entonces por:

$$z = d * k$$

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios para Kansas y Iowa Central (Palmer, 1965). Sin embargo, no ocurrió así cuando se obtuvo el índice para otros lugares con climas diferentes. En algunos casos el valor de k sobreestimaba z en una forma irreal. En otros casos lo subestimaba. Debido a esto Palmer realizó el análisis para nueve diferentes áreas de los Estados Unidos. Analizando las características de los valores

originales de k se evidencio que dicho factor debería también considerar la escorrentía promedio \overline{RO} como parte de la demanda y determino que \overline{K} varía inversamente a \overline{D} , la media de los valores absolutos de d.

Después de experimentar con varias relaciones empíricas para la determinación del factor de ponderación Palmer (1965) señala que la siguiente relación, aunque puede ser fortuita, luce razonable:

$$\overline{K} = 1.5 \log_{10} \frac{\frac{\overline{PE} + \overline{R} + \overline{RO}}{\overline{P} + \overline{L}} + 2.80}{\overline{D}} + 0.50$$

Valores del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)

Una vez definido el índice de anomalía hídrica se procede a calcular el valor del PDSI para cada mes de cada año para todo el registro, a partir de la siguiente ecuación:

$$PDSI = X(i) = 0,897 * X(i-1) + \frac{Z}{3}$$

Donde X (i-1) es el valor de PDSI para el mes anterior (cuando el balance se inicia se considera que el valor de X (i-1)= 0, es decir, durante el mes anterior las condiciones son normales) y z es el índice de anomalía de humedad. De acuerdo al PDSI se definen las siguientes categorías:

PDSI	Clasificación de Sequias
4.00 o mas	Extremadamente Húmedo
3.00 a 3.99	Muy Húmedo
2.00 a 2.99	Moderadamente Húmedo
1.00 a 1.99	Ligeramente Húmedo
0.50 a 0.99	Húmedo incipiente
-0.49 a 0.49	Cerca de lo Normal
-0.99 a -0.50	Seco incipiente
-1.99 a -1.00	Ligeramente Seco
-2.99 a -2.00	Moderadamente Seco
-3.99 a -3.00	Severamente seco
-4.00 o menos	Extremadamente Seco

TABLA N° 5 Clasificación de los periodos secos y húmedos según PDSI. Fuente Palmer (1965).

Alley (1984) y Karl y Knight (1985) describen en detalle limitaciones de este índice.

Algunas de éstas son:

- Los valores que cuantifican la sequía y señalan el principio y final de la misma o de los periodos húmedos fueron seleccionados arbitrariamente basados en el estudio de Palmer en Iowa Central y en el oeste de Kansas teniendo poco significado científico.
- Considera la capacidad de almacenamiento de un suelo tipo, lo que aplicado el índice a una división climática puede ser muy general.
- Las dos capas de suelo incluidas en el balance son simplificadas y pueden ser no representativo para la localidad.
- El desfase natural entre la lluvia y la esorrentía no es considerado. En adición, la esorrentía es permitida en el modelo solo hasta que las dos capas,

superficial y sub superficial estén llenas llevando a una subestimación de la escorrentía

- La evapotranspiración potencial es estimada por el método de Thornthwaite. Esta técnica es ampliamente aceptada, pero para la zona intertropical no es adecuada ya que la temperatura no es un buen indicador de lo que pasa con la evapotranspiración.

Muchos otros trabajos han señalado limitaciones del índice de Palmer. Mckee et al, (1995) sugieren que el índice de Palmer es bueno para la agricultura, pero no es adecuado para evaluar la sequía hidrológica resultante de largos periodos de sequía.

Palmer en su trabajo expone que se utilizan otros métodos para la estimación de la evapotranspiración, utilizar otros modelos de almacenamiento del suelo e inclusive hacer los balances con diferente porcentaje de lluvia útil, así como también dividir el área en zonas diferenciadas a través de otro criterio y no en zonas climáticas. Sin embargo, el hacer esos cambios no afecta la base fundamental del planteamiento de Palmer que hace interesante al PDSI, esto es el cálculo de la precipitación climáticamente efectiva.

A partir del índice de Palmer se desarrollan otros índices tal como el índice de humedad del cultivo o Crop moisture Index (CMI por sus siglas en ingles). Este índice fue desarrollado por Palmer (1968) para monitorear semana a semana las condiciones del cultivo usando un procedimiento incluido en el cálculo del PSDI. Palmer utilizó las 344 divisiones climatológicas existentes, que son zonas más o menos homogéneas climatológicamente, Sánchez (1999). Está basado en la

temperatura media y el total de precipitación semanales. Ya que está diseñado para monitorear condiciones de humedad a corto plazo, el CMI puede proporcionar información engañosa acerca de condiciones a largo plazo, Bordi et al, (2001).

1.9. Análisis estadístico utilizado en la descripción de la sequia

Los problemas que continuamente se repiten para el climatólogo, el responsable no solo de la recolección de datos y de su validación sino también de su procesamiento y su distribución, surgen como consecuencia de la enorme cantidad de datos que debe ser procesada (OMM, 1990).

Dado que, como se expresaba anteriormente, la sequía es un desastre natural de origen meteorológico, los problemas inherentes al estudio de las variables del clima en general son problemas presentes en el estudio de la sequía.

Los datos deben ser obtenidos uniformemente tanto en tiempo como espacio, es decir, basados en el mismo criterio, de otra forma las comparaciones pueden ser erróneas (OMM, 1975).

Existen diferentes descriptores estadísticos que permiten a la climatología resumir los datos de manera que puedan proveer información oportuna y sencilla.

1.9.1. 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_j es cada uno de los valores y n el número total de datos de la serie.

Si los valores X_j constituyen una muestra de una población estadística, \bar{X} tal como ha sido definida arriba, 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 periodo de 30 años consecutivos (OMM, 1990).

1.9.2. Medidas de dispersión

Tratan de evaluar la distribución de los valores alrededor de un valor central, según 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 expresado en porcentaje:

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

- c) El coeficiente intercuartilico se establece en relación a la mediana de la serie:

$$Q' = \frac{Q_3 - Q_1}{M_e}$$

Donde:

Q1= cuartil inferior. El 25% de los datos están por debajo de este valor.

Q3= cuartil superior. El 25% de los datos están por encima de este valor.

Me= Mediana

1.9.3. Medida de posición

Las medidas de posición tratan de evaluar la distribución de los valores de una serie tomando en cuenta el conjunto de ellos. Entre estas medidas una muy importante en climatología son los cuantiles. Estos dividen las series en cuatro (cuarteles), cinco (quintiles), diez (deciles) y cien (perceptiles).

Además de ser una medida de posición de los datos, los cuarteles representan valores con determinada probabilidad de ocurrencia por lo que se usan mucho para establecer la precipitación probable a diferentes niveles. En la evaluación de la sequía se utilizan los deciles en varias partes del mundo. Los resultados que se obtienen con estos índices son más próximos a la realidad mientras mayor sea el tamaño de la serie.

Tendencia Central

1.9.4. Curvas de frecuencia

Las curvas de frecuencia muestran gráficamente la distribución de los diferentes elementos que componen una serie y permiten obtener algunos parámetros de gran interés como la probabilidad de aparición de ciertos valores críticos. Del mismo modo, la forma que presenta la distribución permitirá compararla con otros modelos de distribución teóricos, Fernández (1999).

La frecuencia absoluta y relativa son los dos conceptos que permiten definir una serie gráficamente:

- a) *Frecuencia absoluta*: en un conjunto de observaciones formado por N valores, el número de veces que se repite uno de ellos es la frecuencia absoluta de ese valor.
- b) *Frecuencia relativa*: la relación entre la frecuencia absoluta y el conjunto de valores que forman la muestra se denomina frecuencia relativa.
- c) *Frecuencia relativa acumulada*: se obtiene por la adición sucesiva de las frecuencias individuales, calculadas en una serie en que los elementos han sido colocados en orden creciente o decreciente. A partir de ellas se puede determinar la probabilidad de que un valor climatológico se sitúe por encima o por debajo de un intervalo dado o entre dos intervalos. La probabilidad se puede definir como la relación entre el número de casos en que se cumple una condición y el total de casos posibles. Si la serie climática, en lugar de ser una muestra, representara a toda la población, las frecuencias relativas serían la probabilidad, Fernández (1999).

Hay que resaltar que los resultados del análisis de frecuencias que se obtenga a partir de ella serán más cercanos a la realidad en la medida que el tamaño de la serie sea más grande. Es decir, las frecuencias relativas referidas a una muestra pueden generalizarse al conjunto de la población, siempre que la muestra sea representativa de la misma.

También los datos pueden ajustarse a una distribución, aunque la muestra sea representativa, con la finalidad de realizar inferencia estadística.

Las curvas de distribución teóricas más empleadas en climatología son la Gauss y Gamma.

1.9.4.1. Distribución de Laplace-Gauss o ley Normal

Se asevera que una variable aleatoria X tiene distribución normal con media:

μ ($-\infty < \mu < \infty$) y varianza $\sigma^2 > 0$ si tiene la función de densidad.

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

Se representa mediante una curva acampada con un máximo central la cual se aproxima asintóticamente al eje de las abscisas. La media (μ) y la desviación estándar (σ) 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 μ está comprendida entre $-\infty$ y $+\infty$ siendo la suma total de las probabilidades igual a la unidad.

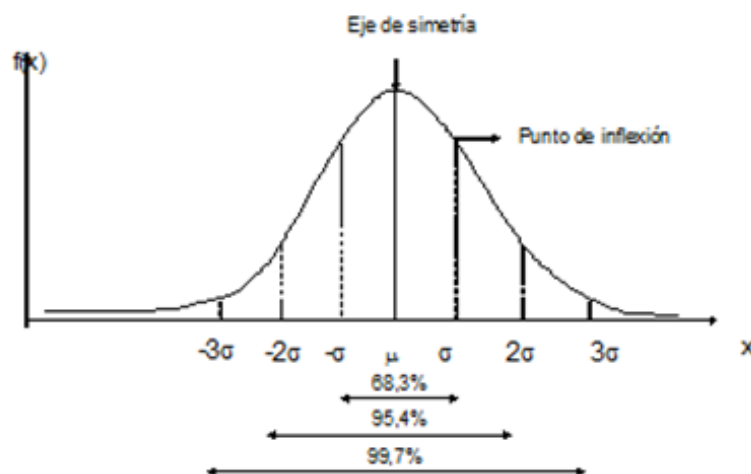


FIGURA N° 3 Curva de Distribución Normal de Probabilidades.
Fuente Grupo Chadule (1994).

La función de distribución de esta ley muestra que:

- a) En el intervalo comprendido entre $\mu \pm \sigma$, se concentra el 68% de todos los valores de la variable.
- b) 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 dos valores de **z**.

1.9.4.2. 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). Esta distribución es asimétrica, extendida a la derecha ya que sus límites varían de 0 a $+\infty$ (Figura N° 4)

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 los parámetros que la definen son β (parámetro de escala) y α (parámetro de forma), $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma de α y X es el valor de la precipitación (Edwards y Mckee, 1997).

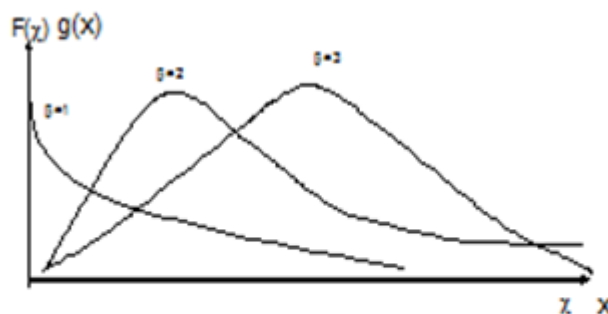


FIGURA N° 4 Distribucion Gamma $\alpha=1$. Fuente Hines y Montgomery (2000).

Conociendo ambos parámetros puede obtenerse, como en el caso de la distribución normal, la probabilidad mediante tablas elaboradas por Persson 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.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. Descripción del área de estudio

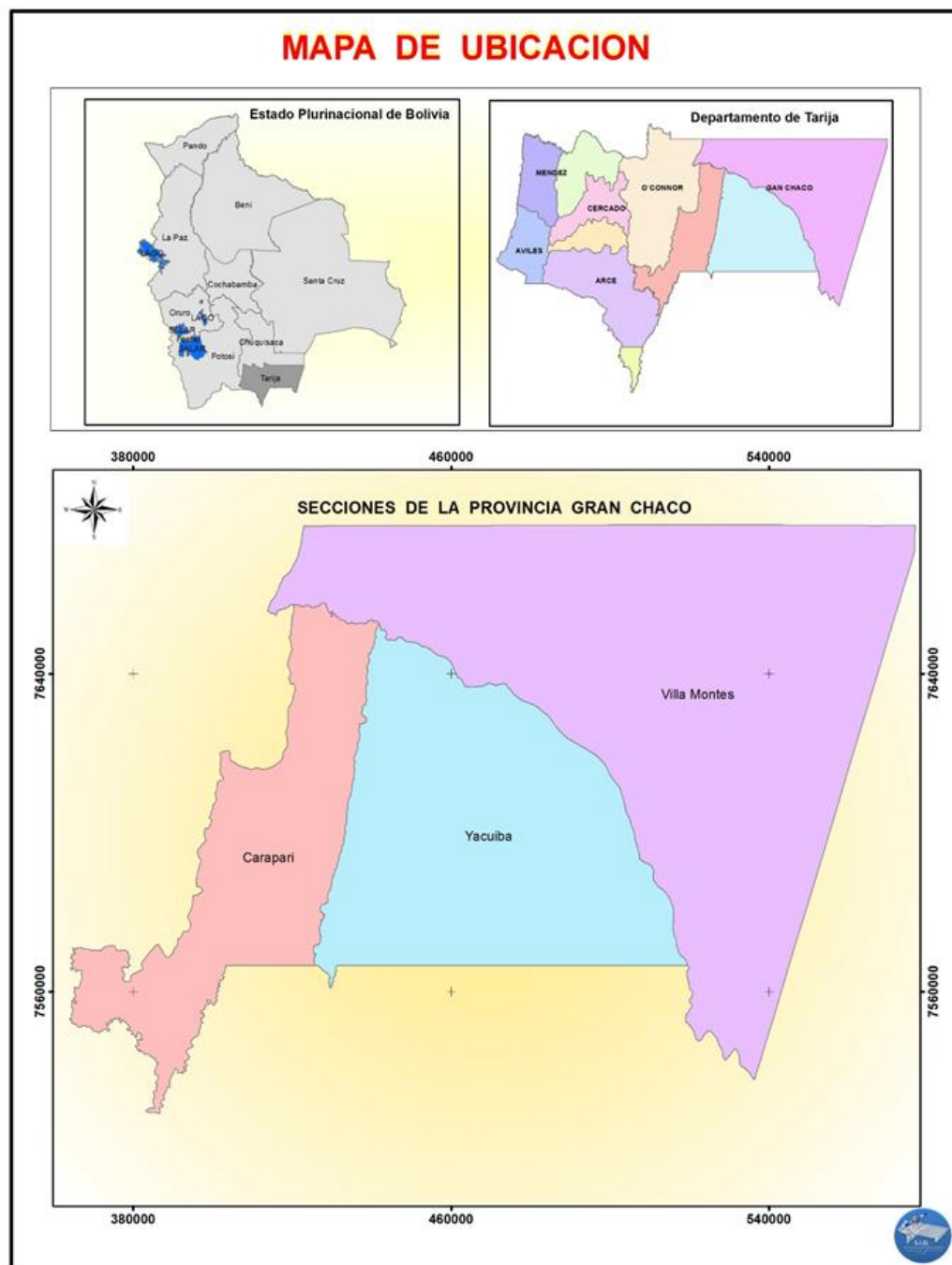


FIGURA N° 5 Ubicación de la provincia Gran Chaco.

La provincia Gran Chaco es la mayor provincia del Departamento de Tarija, con una superficie de 17.458 km². Se localiza entre 21° 00' y 22° 17' de latitud Sur y entre 62° 16' y 64° 18' hacia el Oeste. La provincia orilla con el Departamento de Chuquisaca en el norte, con la provincia O'Connor en el norte oeste, en el sur oeste con la provincia Arce, al sur con la República de Argentina y el este con El Paraguay. La provincia se extiende encima de 200 km del norte al sur, y 200 km del este hacia el oeste.

2.1.1. División Fisiográfica

2.1.1.1. Llanura Chaqueña

La llanura Chaqueña se caracteriza por el piedemonte y las llanuras extensas del Chaco en el Este. El piedemonte es una franja de transición entre las serranías vecinas del Subandino y las llanuras extensas del Chaco en el este. El Chaco tiene un clima semi árido en la parte Occidental (con una precipitación media anual de 600 a 1000 mm) que hacia el este cambia a un clima árido con sólo 300 – 400 mm de precipitación en el sector más oriental. La llanura chaqueña es también conocida como el horno del continente sudamericano con temperaturas máximas que pueden llegar hasta 50° C en el verano y alcanzar temperaturas negativas en invierno, en algunos días de los meses de junio y julio. En gran parte de la llanura domina un bosque xerofítico ralo formando los característicos quebrachales chaqueños y matorrales (Plan Departamental de Ordenamiento Territorial, 2006).

1. Unidad territorial: Chaco Sur; se caracteriza por ser predominantemente urbana, el 70% de su población se concentra en la ciudad de Yacuiba. Es la

región de mayor dinamismo poblacional, con la tasa de crecimiento más alta del Departamento debido principalmente a la fuerte inmigración. Es la unidad territorial de mayor potencial agrícola, pues participa con 37% (56.900 ha) del total de tierras con este potencial del Departamento, localizadas en su zona de piedemonte y en pequeños valles subandinos de Carapari. Al interior de esta unidad existen tres zonas diferenciadas: 1) El piedemonte del Aguarague, con un importante potencial agrícola e hidrocarburífero, densamente poblada; 2) la llanura chaqueña, con potencial para uso agropecuario extensivo; y 3) los valles chaqueños de Carapari, con potencial para el uso de bosques productivos permanentes, ganadería de porcinos, reducido potencial agrícola y con potencial hidrocarburífero.

2. Unidad Territorial: Chaco Norte; es la unidad más grande en cuanto a territorio se refiere y la de menor densidad poblacional, presenta niveles de urbanización relativamente altos puesto que 68% de su población se concentra en la ciudad de Villa Montes, con un área rural en la zona de llanura, prácticamente vacía. En esta unidad tienen presencia grupos originarios, los Weenhayek y Tapietes, ubicadas en las márgenes del río Pilcomayo. La unidad presenta un muy importante potencial hidrocarburífero en la serranía y Piedemonte del Aguaragüe y la llanura Chaqueña. Es eminentemente ganadera, con potencial y uso predominantemente agro-silvo-pastoril extensivo, aunque con serias restricciones. Solamente presenta potencial agrícola en su zona de piedemonte, con 12.500 ha, representado el 8% del

total departamental. Esta unidad territorial presenta dos zonas claramente diferenciadas: 1) el piedemonte, con potencial agrícola y pecuario intensivo, densamente poblado; y 2) la llanura chaqueña, con reducido potencial productivo agro-silvo-pastoril extensivo con serias limitantes.

2.1.2. Clima

Según la clasificación climática de Koppen, Montes de Oca (2005) clasifica al Chaco tarijeño como:

Clima Seco (B)

Clima de estepa con invierno seco y muy caliente (BSwh'), característico de las llanuras secas del Chaco.

La temperatura media es de 22.8 °C, con temperaturas máxima extremas que alcanzan los 47 °C y mínimas extremas registradas en -7.0 °C.

2.1.2.1. Variabilidad espacio temporal de la precipitación

El régimen de precipitación o también llamado régimen pluviométrico es conocido como la cantidad de precipitación, incluyendo su distribución y espacio en el tiempo y su variabilidad, conjuntamente con la frecuencia de intensidades y formas de repartirse la lluvia durante los 12 meses del año, Tullot, (2000).

La provincia Gran Chaco se caracteriza por un régimen pluviométrico mono modal, quedando bien definido el periodo de lluvias de noviembre a marzo donde se distribuye un 90% de la precipitación media anual (829.0 mm)

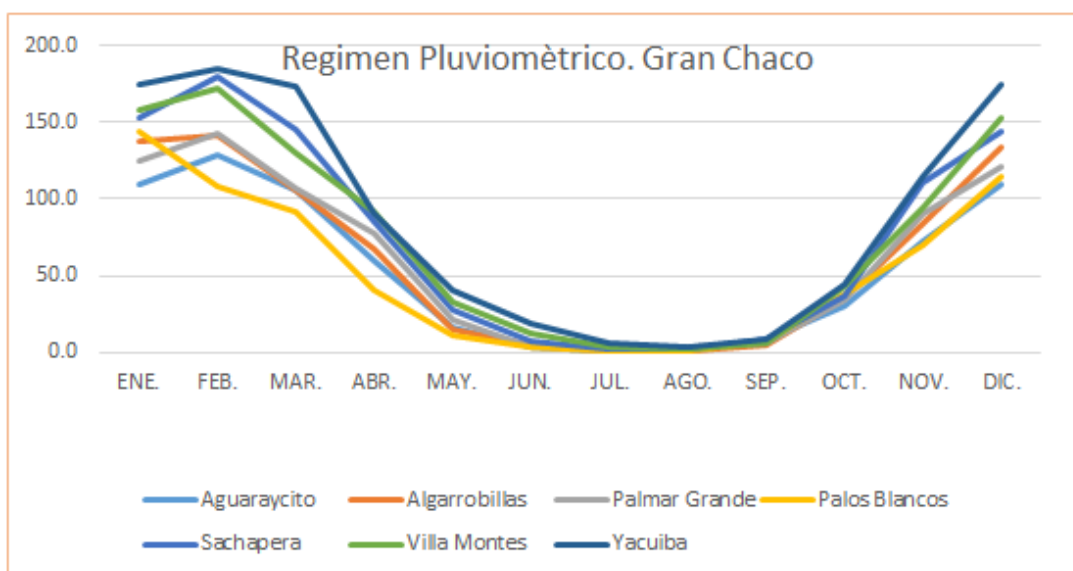


FIGURA N° 6 Regimen pluviométrico en la provincia Gran Chaco.

2.2. Descripción de la red de estaciones

TABLA N° 6 Red de estaciones en la provincia Gran Chaco (Fuente SENAMHI).

Estacion	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud	Periodo de Registro	
Aguaraycito	-21° 23' 24"	-63° 24' 44"	396	1991 - 2017	✓
Algarrobillas	-21° 51' 20"	-63° 17' 38"	468	1977 - 2017	✓
Crevaux	-21° 49' 29"	-62° 55' 03"	292	2005 - 2017	
El Mezquinado	-21° 20' 45"	-63° 01' 42"	459	2005 - 2017	
Ibibobo	-21° 32' 30"	-62° 59' 50"	398	2014 - 2017	
Palmar Grande	-21° 31' 53"	-63° 26' 31"	464	1981 - 2017	✓
Palo Marcado	-21° 27' 17"	-63° 06' 29"	334	2005 - 2017	
Sachapera	-21° 39' 38"	-63° 33' 02"	619	1977 - 2017	✓
Tiguipa	-21° 00' 02"	-63° 19' 38"	515	2005 - 2017	
Villa Montes (Aeropuerto)	-21° 15' 17"	-63° 24' 27"	403	1954 - 2017	✓
Villa Montes (Bombeo)	-21° 15' 40"	-63° 30' 12"	383	2005 - 2017	
Yacuiba	-21° 56' 58"	-63° 38' 53"	645	1958 - 2017	✓

✓ Estaciones Utilizadas en el presente estudio

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) administra una red de estaciones instalada en diferentes periodos e Instituciones:

- AASANA tiene 2 estaciones con registros de 1950 a la fecha.
- SENAMHI, con 5 estaciones con registros de 1970 a la fecha.
- Dirección Ejecutiva Pilcomayo, 5 estaciones con registros del 2005 a la fecha.

La finalidad de esta red es generar, almacenar, analizar y procesar información climática diaria, confiable y oportuna, para ofrecer a los investigadores y usuarios en general una herramienta coadyuvante en la reducción de riesgos y pérdidas económicas generadas por eventos climáticos en los procesos productivos agrícolas, Azkue et al., (2004).

2.3. Análisis de datos Meteorológicos

2.3.1. Selección de estaciones

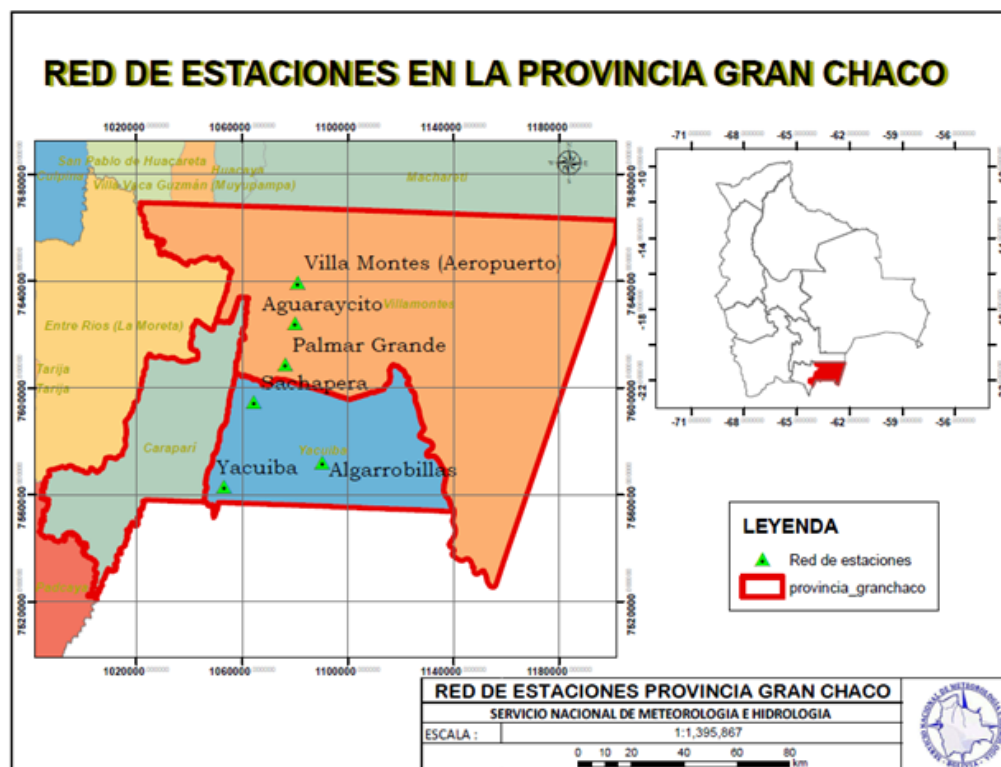


FIGURA N° 7 Ubicación de Estaciones en la provincia Gran Chaco.

Para la selección de las estaciones utilizadas en el estudio, se formuló un inventario de todas las estaciones convencionales, después de estructurar el metadato con la información básica de las estaciones, sólo se seleccionaron estaciones con registros largos de precipitación. Las series utilizadas son de 30 años, de acuerdo a recomendación de la OMM (1984) para regiones con clima semi árido.

2.3.2. Análisis de información

En esta etapa se realizó la recopilación, homogenización y estandarización de la información meteorológica básica existente en las estaciones seleccionadas en base a las siguientes pruebas:

2.3.2.1. Detección de datos faltantes

Para determinar la proporción de datos faltantes mensuales en la serie de precipitación se consideró el criterio utilizado por Parra y Cortez (2005), el cual establece que, si existe por lo menos una observación faltante en el mes, no se calcula el valor mensual, debido a que el valor mensual se calcula como la sumatoria de los valores diarios o lluvia total caída en el mes. Los datos faltantes en estas series pueden afectar la representatividad de los datos utilizados en el estudio.

2.3.2.2. Estadística descriptiva básica

Para cada estación seleccionada, se calcularon los parámetros estadísticos descriptivos: precipitación media mensual, máxima mensual, desviación estándar, coeficiente de variación, percentiles 25%, 50%, 75%, la asimetría, curtosis y desviación absoluta de la mediana.

2.3.2.3. Verificación de la homogeneidad de las series

Existen varios métodos para detectar la No homogeneidad de las series, el método que se utilizó es la comparación entre las estaciones seleccionadas mediante la correlación lineal, luego para evaluar la homogeneidad de la serie, se recurrió a las pruebas del recorrido de Wald-Wolfowitz o Run Test. Para esta prueba se tabulan las series anuales, se saca la media aritmética, para luego realizar una suma algebraica de la media con cada uno de los registros; se anota positivo o negativo según sea mayor o menor a la media (Run Test), luego se cuentan los cambios “U”, es decir, los cambios de signo, y se compara con los intervalos de “U” para verificar si la serie es homogénea o no lo es.

Nº de Observaciones	Intervalo U	Nº de Observaciones	Intervalo U
10	04-07	24	09-16
12	05-08	26	10-17
14	05-10	28	11-18
16	06-11	30	12-19
18	07-12	32	13-20
20	08-13	34	14-21
22	09-14	36	15-22

TABLA Nº 7 Intervalos de Cambio "U", para que el registro sea HOMOGÉNEO (Doorembos, 1976).

2.4. Metodología

2.4.1. Cálculo de los periodos de precipitación a partir de los datos mensuales

Para el cálculo de los SPI en los diferentes periodos, corresponden a los valores de precipitación mensuales acumulados. Ejemplo para el SPI3 se utiliza el acumulado de

los dos meses previos y el mes en cuestión (la suma de noviembre y diciembre del año 1980 y enero 1981, asignada como el valor trimestral de enero 1981).

Al final de este procedimiento se obtuvieron para cada año, 12 valores en cada estación. Estos valores fueron calculados en Microsoft Office Excel a partir de los registros mensuales de precipitación de cada mes.

2.4.2. Procesamiento de los datos para la obtención del SPI

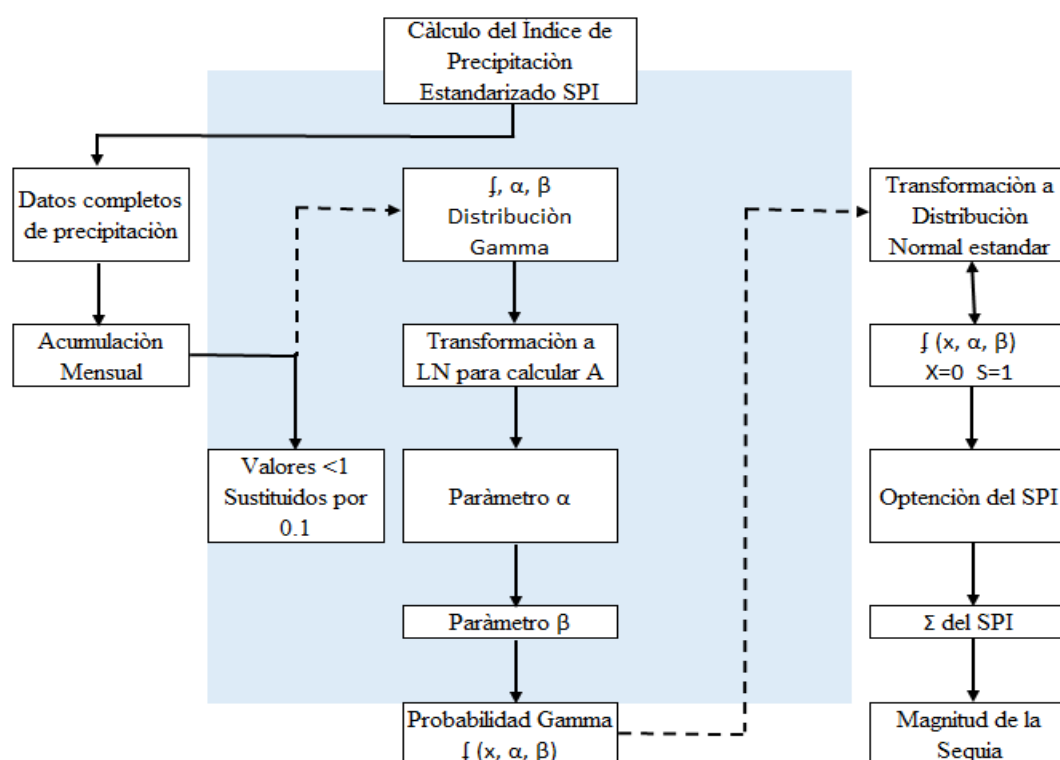


TABLA N° 8 Procedimiento para el cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). Fuente Colotti, et al, 2013.

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 α y de escala β de la distribución gamma se calcularon para cada estación, para cada mes y para cada escala de tiempo (mensual, trimestral, etc.) a través de las soluciones de máxima verosimilitud (McKee, 1993).

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

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:

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

Donde; $H(x)$ 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 que es la probabilidad de no

Tener precipitación.

2.4.3. Categorización de la intensidad del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

Intensidad; promedio de valores del índice durante el periodo en que el mismo está por debajo del umbral seleccionado (Guevara, 2016).

McKee et al., (1993) utilizaron el sistema de clasificación para definir las distintas intensidades de la sequía según los observadores (Tabla nº 4). Estas categorías aluden al fenómeno de la sequía meteorológica, aquello cuyo valor del SPI es negativo (Olivares et al., 2016). Una vez calculado el índice se categoriza las sequias según sus intensidades.

2.4.4. Caracterización de la sequía meteorológica

2.4.4.1. Duración

Es el tiempo (número total de días, meses o años consecutivos) durante el cual las precipitaciones totales registradas son inferiores a la precipitación media de ese periodo, Valiente (2001). Bajo este concepto el valor del SPI continuamente negativos que alcanzan el valor de -1 o inferior, considerando una secuencia seca significativa relacionada con la deficiencia de agua, mediante el tiempo mínimo y máximo que cada una de estas categorías puede durar, Olivares et al., (2016).

2.4.4.2. Eventos

Una vez obtenido los valores mensuales de los índices para cada estación y cada periodo de agrupación seleccionado, se realizaron análisis para determinar los eventos

de sequía ocurridos en las estaciones y épocas en las que fue posible aplicar los índices.

Para SPI se utilizó la definición de McKee et al (1999) la cual establece, que un evento de sequía para cualquier escala de tiempo es definido como un periodo en el cual el SPI es continuamente negativo y alcanza un valor de -1 o menor, es decir, el evento comienza cuando el SPI cae por debajo de cero alcanza al menos una vez el valor de -1 o menor y termina cuando el índice toma valor positivo.

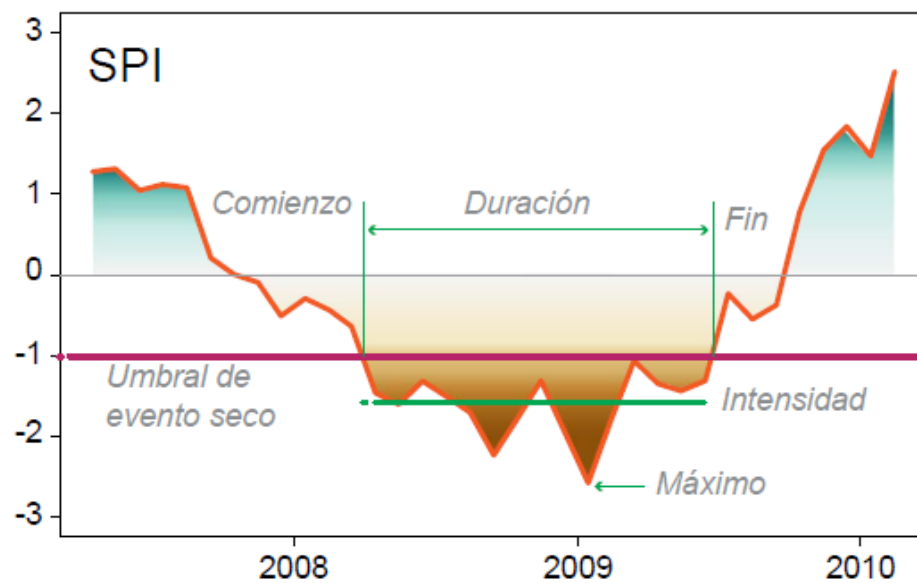


FIGURA N° 8 Esquema de un evento de sequía. En línea naranja se ilustra una serie de SPI. La línea magenta indica el umbral por debajo del cual se considera sequía. La magnitud del evento es el producto de la duración y la intensidad (área sombreada debajo del umbral del evento seco).

2.4.4.3. Frecuencia

Es el número de casos que se originan durante un determinado periodo. Puede medirse también a través de la probabilidad empírica de que la precipitación sea

inferior a la media, o del periodo de retorno del evento seco (intervalo medio de tiempo dentro del que puede esperarse que ocurra una sequía de determinada magnitud), Hernández, (2008).

La frecuencia absoluta, se determinó contabilizando el número de meses durante el periodo de estudio (30 años) en el cual los valores eran iguales o inferiores a -1.00. Esto se determinó para las tres categorías de sequías. La frecuencia relativa, se obtuvo calculando el valor entre la frecuencia absoluta y el número total de datos (Sierra et al., 1994), obteniendo el porcentaje de meses del periodo de estudio en el que se registran evento de sequía (moderada, severa y extrema).

2.4.4.4. Magnitud

Es sólo un valor de signo positivo correspondiente la suma de los SPI durante el evento seco que inicia cuando el SPI es ≤ -1 y termina cuando el SPI es ≥ -1 .

Para calcular la magnitud del periodo seco durante un año cualquiera, en una estación determinada, se empleó una variante del método original propuesto por Edwards y McKee (1997) donde se acumularon los SPI mensuales cuya magnitud era igual o inferior a -1, y cuando el SPI era mayor a -1 se sustituyó por un cero.

$$MS = -\left(\sum_{j=1}^n SPI_j\right) \quad \text{Si y solo si } SPI < 0$$

MS= Magnitud de la sequía para el periodo evaluado

SPI= es el índice SPI para series de lluvia acumulada mensual.

Dado que las magnitudes de los eventos de sequía pueden tomar valores diversos, se decidió analizar el riesgo de ocurrencia de sequías de diferentes magnitudes mensuales, según una clasificación propuesta por Hernández (2008), la cual establece 5 clases.

Tabla N° 9 Magnitud de la Sequia (Fuente, Hernandez 2008)

MS	Categoria
0.1 - 0.9	Normal
1.0 - 1.99	Leve
2.0 - 2.99	Poco Fuerte
3.0 - 3.99	Fuerte
4.0 - 4.99	Muy Fuerte
>5.0 -	Extremadamente Fuerte

2.4.5. Identificación de sequías regionales

El análisis regional se efectúa realizando una tabla del coeficiente de correlación de Pearson entre todas las estaciones, considerando la clasificación de correlaciones. A continuación, se analiza las sequías registradas durante el periodo (1988 – 2017) en todas las estaciones de estudio, para determinar si estas sequías fueron puntuales o regionales.

$r=1$	Correlacion Perfecta
$0.8 < r < 1$	Correlacion Muy Alta
$0.6 < r < 0.8$	Correlacion Alta
$0.4 < r < 0.6$	Correlacion Moderada
$0.2 < r < 0.4$	Correlacion Baja
$0 < r < 0.2$	Correlacion muy Baja
$r=0$	Correlacion Nula

TABLA N° 10 Interpretacion del coeficiente de correlacion. Bisquerra, 1989.

CAPÍTULO III

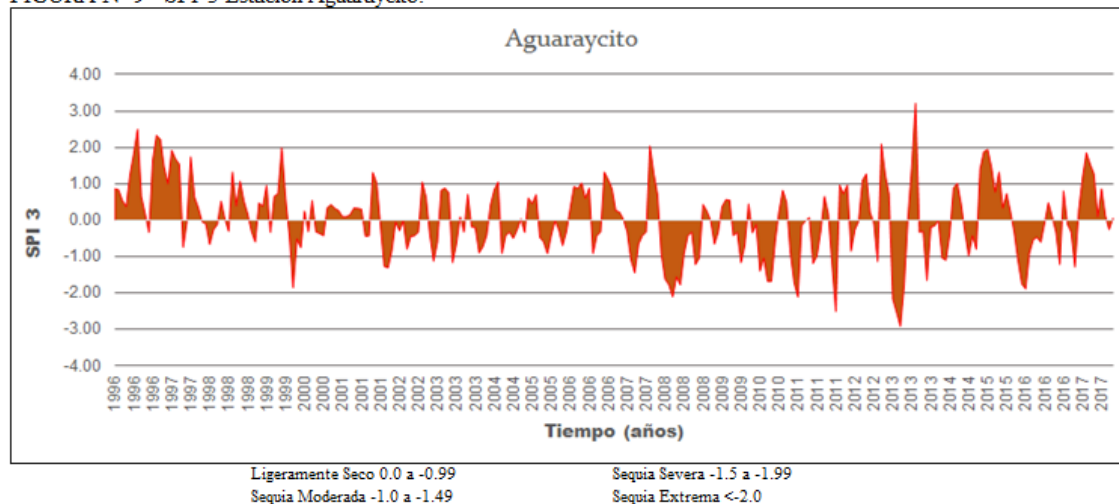
RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los cálculos se realizaron para las escalas temporales de 1,3,6,9,12 y 24 meses para todas estaciones pluviométricas, sin embargo, las escalas temporales de 3 y 12 meses representaron gráficamente mejor resultados, debido a sus características particulares que poseen una mayor sensibilidad a los cambios de precipitación, reflejan las sequías a corto y largo plazo. Los resultados de las demás escalas temporales para las otras estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio, se encuentran detalladas en los anexos 1.

1.1. Análisis del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

3.1.1. Índice Precipitación Estandarizado Trimestral (SPI-3)

FIGURA N° 9 SPI-3 Estacion Aguaraycito.



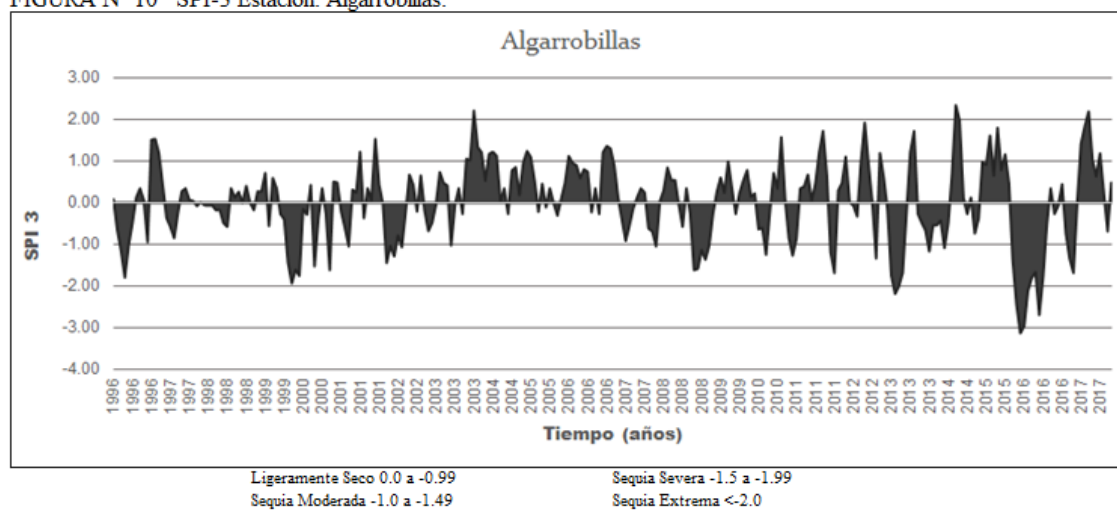
Los resultados nos muestran un total 139 eventos (52.6%) de los 264 casos posibles.

Los 22 años en estudio han presentado algún tipo de sequía: un 73.4% sequías ligeras, sequías moderadas un 13.7%, sequías severas un 8.6 y en un menor porcentaje 4.3% sequías extremas.

En los años 2002, 2004, 2008, 2011, 2013, 2014, 2016, la sequía meteorológica paso a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Los años 2008, 2011 y 2013, se registraron sequias extremas con una duración promedio de 2 meses, el índice más bajo se registró el año 2013 con -2.92.

FIGURA N° 10 SPI-3 Estacion. Algarrobillas.



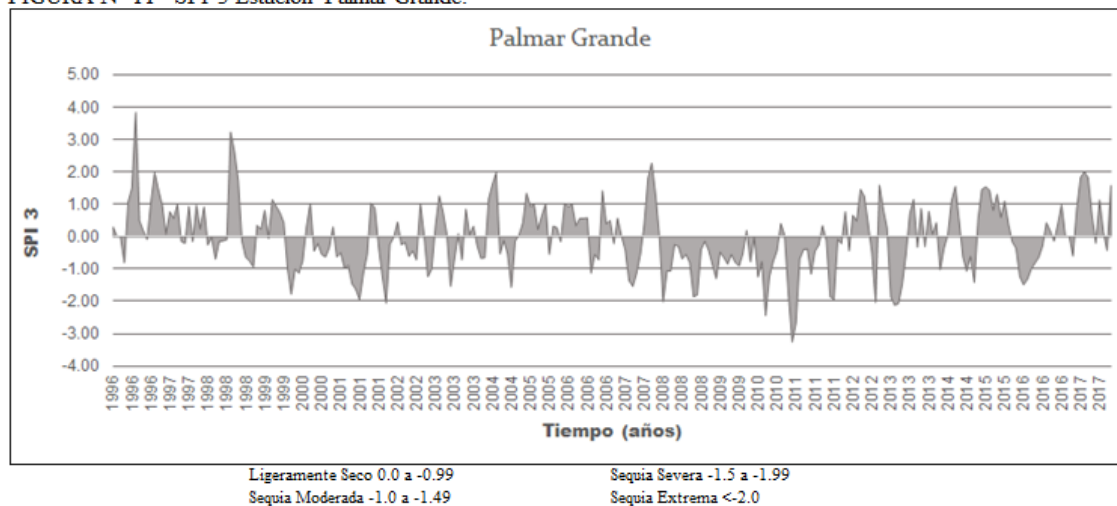
Los resultados nos muestran un total 124 eventos (47%) de los 264 casos posibles.

De los 22 años en estudio solo un año (2004) no presentó ninguna clase de sequía; los demás han sido: un 65.3% sequías ligeras, sequias moderadas un 16.9%, sequías severas un 12.1% y en un menor porcentaje 5.7% sequías extremas.

En los años 2008, 2013, 2015 y 2016, la sequía meteorológica paso a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Los años 2013, 2015 y 2016, se registraron sequias extremas con una duración promedio de 2 meses, el valor más bajo se registró el año 2015 (-3.14).

FIGURA N° 11 SPI-3 Estacion Palmar Grande.



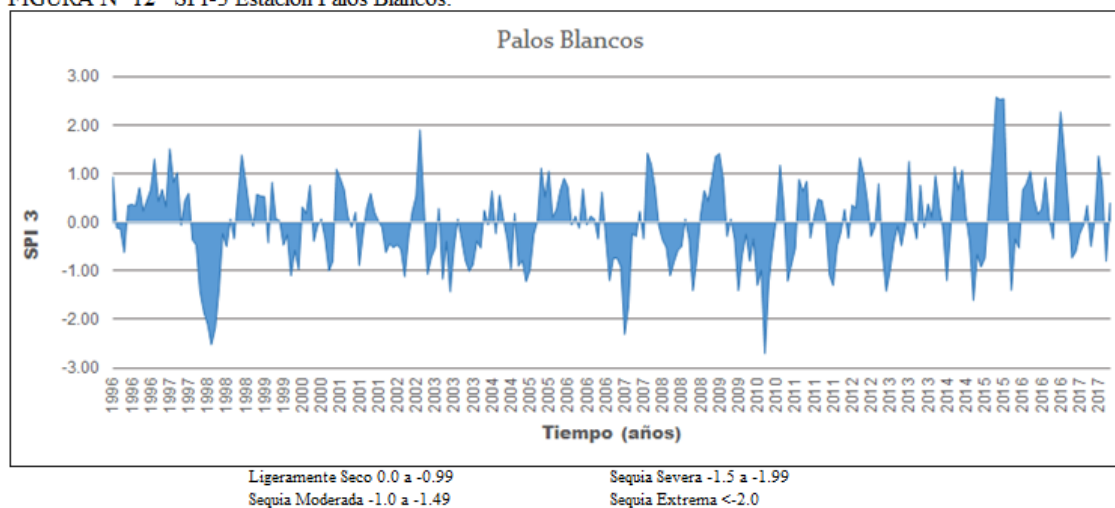
Los resultados nos muestran un total 143 eventos (54.2%) de los 264 casos posibles.

De los 22 años en estudio solo un año (2005) no presentó ninguna clase de sequía; los demás han sido: un 70.6% sequías ligeras, sequías moderadas un 15.4%, sequías severas un 8.4% y en un menor porcentaje 5.6% sequías extremas.

En los años 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, la sequía meteorológica paso a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Los años 2013, 2015 y 2016, se registraron sequías extremas de duración promedio de un mes, el valor más bajo se registró el año 2015 (-3.14).

FIGURA N° 12 SPI-3 Estacion Palos Blancos.



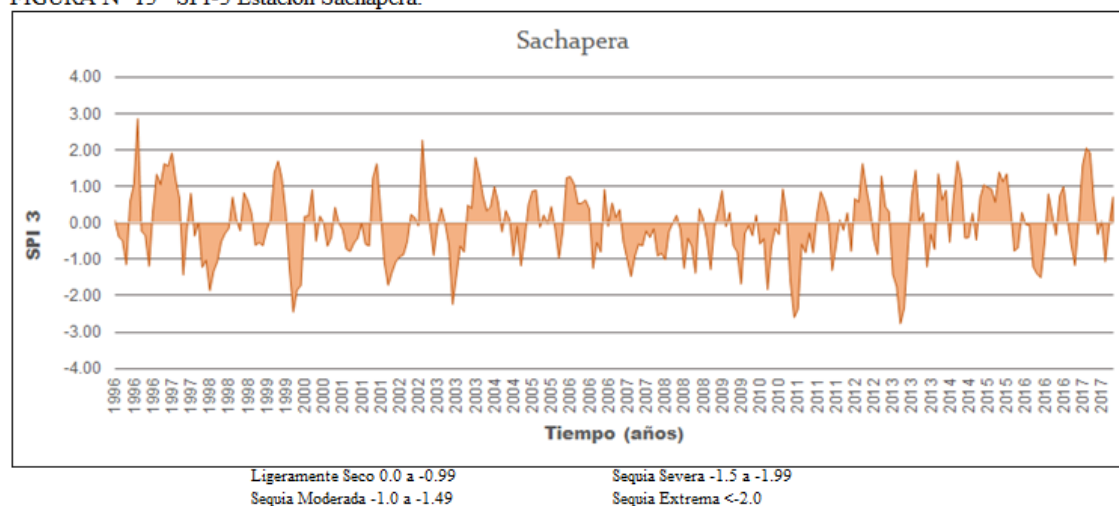
Los resultados nos muestran un total 134 eventos (50.8%) de los 264 casos posibles.

De los 22 años en estudio solo un año (2016) no presentó ninguna clase de sequía; los demás han sido: un 77.6% sequías ligeras, sequías moderadas un 16.4%, sequías severas un 2.2% y un 3.8% sequías extremas.

En los años 2003 y 2008, la sequía meteorológica paso a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Los años 1998, 2007 y 2010, se registraron sequías extremas con una duración promedio de un mes, el valor más bajo se registró el año 2010 (-2.70).

FIGURA N° 13 SPI-3 Estacion Sachapera.



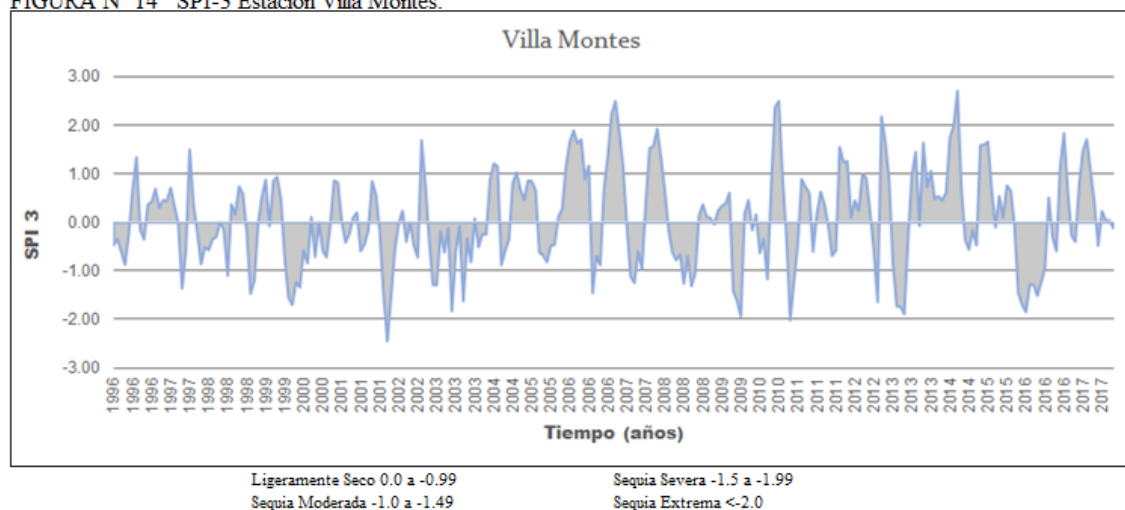
Los resultados nos muestran un total 143 eventos (54.2%) de los 264 casos posibles.

Los 22 años en estudio se registraron sequías: un 70.6% sequías ligeras, sequias moderadas un 18.9%, sequías severas un 6.3% y un 4.2% sequías extremas.

En los años 2007, 2009, 2010 y 2013, la sequía meteorológica paso a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Los años 1999, 2003, 2010, 2011 y 2013 se registraron sequias extremas con una duración promedio de un mes, el valor más bajo se registró el año 2013 (-2.77).

FIGURA N° 14 SPI-3 Estacion Villa Montes.



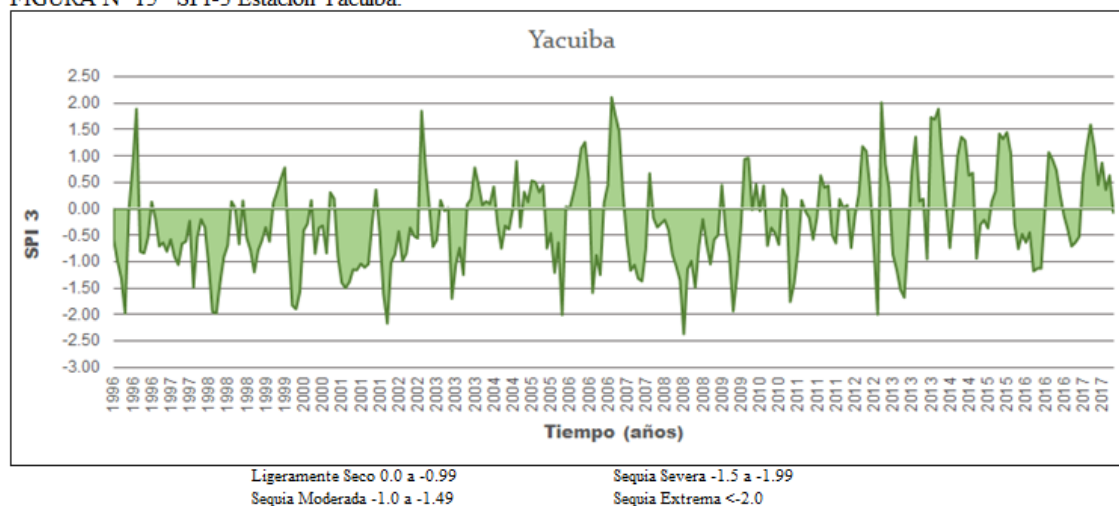
Los resultados nos muestran un total 131 eventos (49.6%) de los 264 casos posibles.

Los 22 años en estudio se registraron sequías: un 71% sequías ligeras, sequias moderadas un 16.8%, sequías severas un 10.7% y un 1.5% sequías extremas.

El año 2003, la sequía meteorológica pasó a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Los años 2002, 2010, se registraron sequias extremas con una duración de un mes, el valor más bajo se registró el año 2002 (-2.45).

FIGURA N° 15 SPI-3 Estacion Yacuiba.



Los resultados nos muestran un total 162 eventos (61.4%) de los 264 casos posibles.

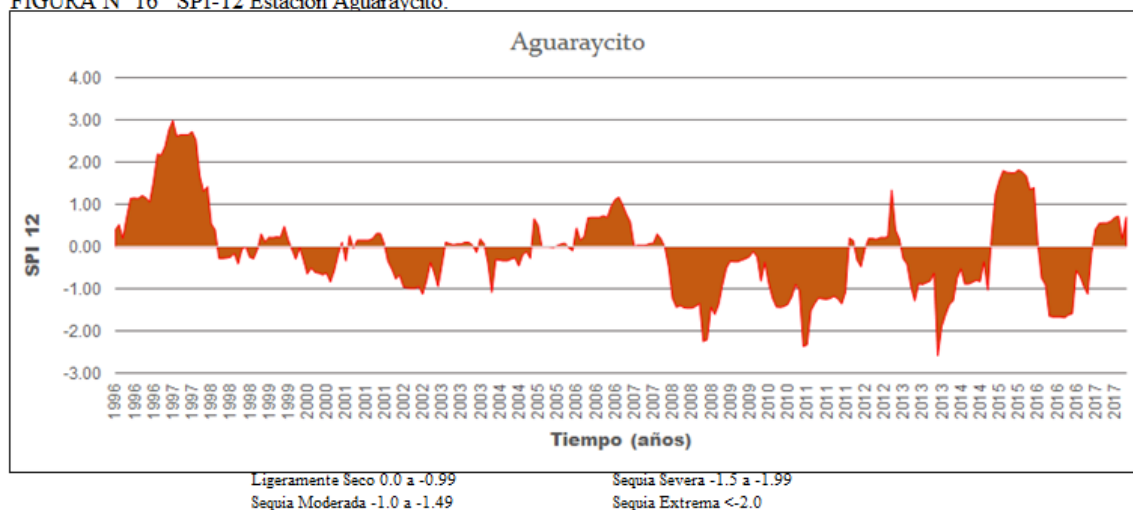
De los 22 años en estudio, un solo año (2014) no presentó ninguna clase de sequía; las demás fueron: un 69.8% sequías ligeras, sequias moderadas un 19.1%, sequías severas un 8.6% y un 2.5% sequías extremas.

Los años 1996, 1997, 1998, 1999, 2001 y 2008, la sequía meteorológica pasó a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Los años 2002, 2005, 2008 y 2012, se registraron sequias extremas con una duración promedio de un mes, el valor más bajo se registró el año 2008 (-2.37).

3.1.2. Índice Precipitación Estandarizado Anual (SPI – 12)

FIGURA N° 16 SPI-12 Estacion Aguaraycito.



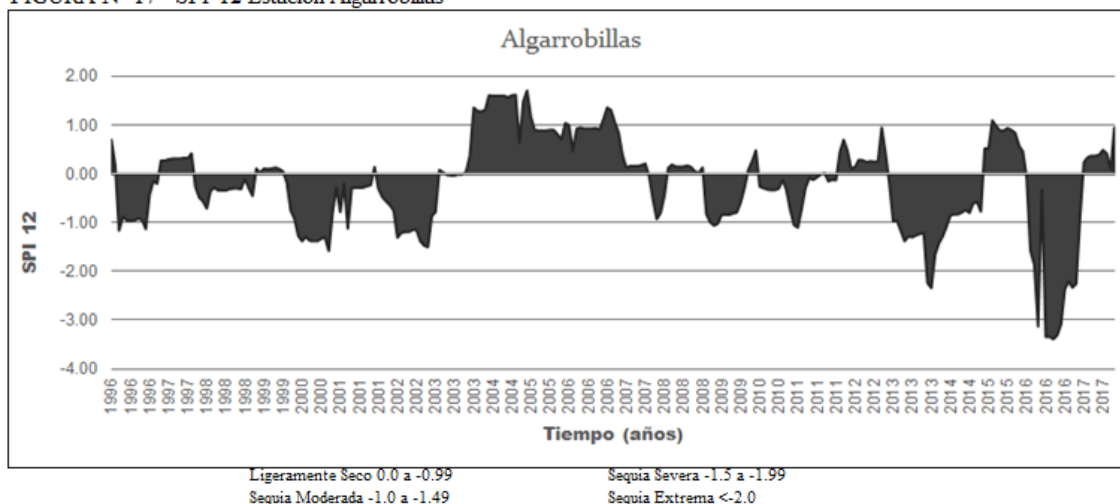
Los resultados nos muestran un total 147 eventos (55.7%) de los 264 casos posibles.

De los 22 años en estudio, cinco años (1996, 1997, 2006, 2007 y 2015) no presentó ninguna clase de sequía; las demás fueron: un 66.7% sequías ligeras, sequías moderadas un 22.4%, sequías severas un 7.5% y un 3.4% sequías extremas.

Los años 2000, 2002, 2004, 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014, la sequía meteorológica pasó a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Los años 2008, 2010, 2011, 2013, se registraron sequias extremas con una duración promedio de un mes, el valor más bajo se registró el año 2013 (-2.58).

FIGURA N° 17 SPI-12 Estacion Algarrobillas



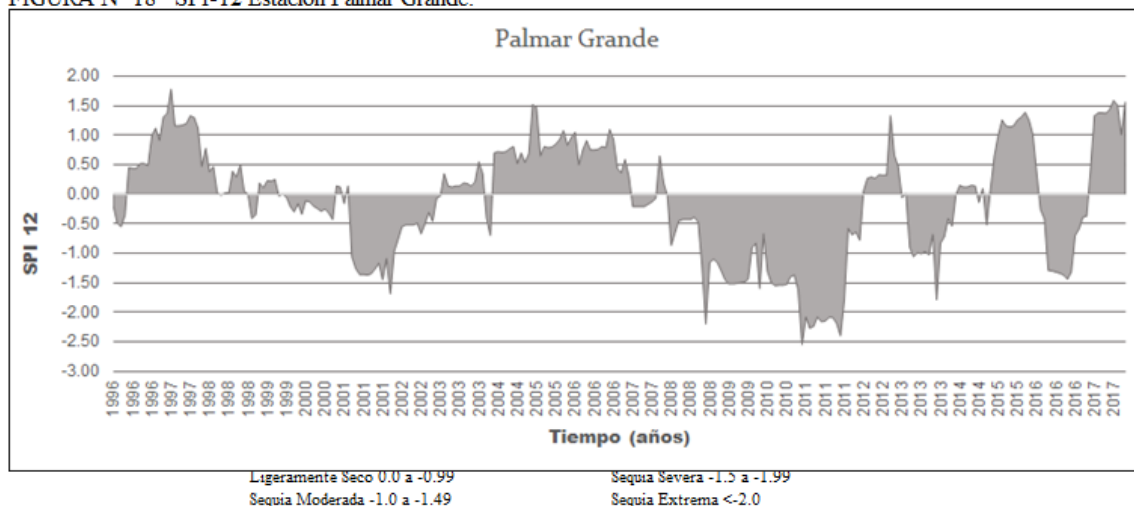
Los resultados nos muestran un total 147 eventos (55.7%) de los 264 casos posibles.

De los 22 años en estudio, seis años (2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009) no presentaron ninguna clase de sequía; las demás fueron: un 66% sequías ligeras, sequías moderadas un 22.4%, sequías severas un 3.4% y un 8.2% sequías extremas.

Los años 1998, 2000, 2001, 2002, 2009, 2013, 2014, 2016 y 2017, la sequía meteorológica pasó a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Los años 2013, 2016, 2017, se registraron sequías extremas con una duración promedio de cinco meses, el valor más bajo se registró el año 2016 (-3.39).

FIGURA N° 18 SPI-12 Estacion Palmar Grande.



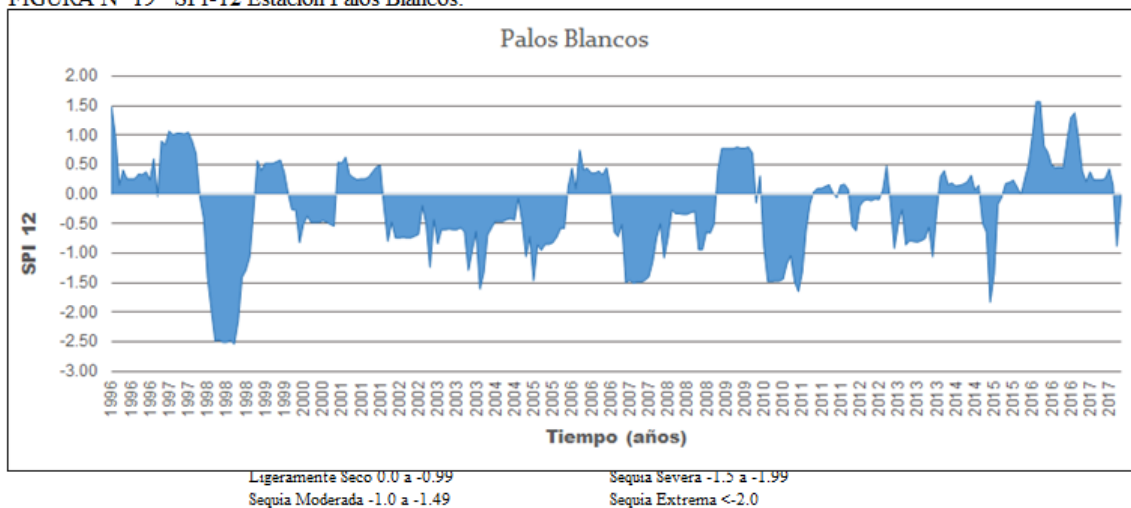
Los resultados nos muestran un total 137 eventos (51.9%) de los 264 casos posibles.

De los 22 años en estudio, cinco años (1997, 1998, 2005, 2006, 2015) no presentaron ninguna clase de sequía; las demás fueron: un 59.1% sequías ligeras, sequías moderadas un 21.9%, sequías severas un 10.2% y un 8.8% sequías extremas.

Los años 2001, 2002, 2008, 2009, 2010, 2011 y 2016, la sequía meteorológica pasó a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Los años 2008, 2010, 2011, se registraron sequías extremas de duración promedio de cuatro meses, el valor más bajo se registró el año 2010 (-2.55).

FIGURA N° 19 SPI-12 Estacion Palos Blancos.



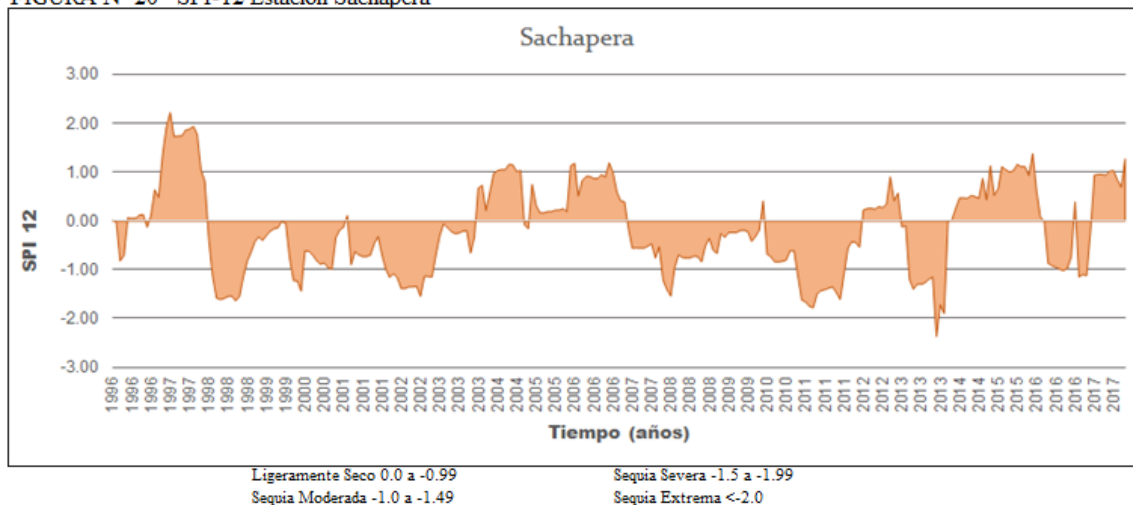
Los resultados nos muestran un total 148 eventos (56%) de los 264 casos posibles.

De los 22 años en estudio, seis años (1996, 2001, 2006, 2014, 2016, 2017) no presentaron ninguna clase de sequía; las demás fueron: un 74.3% sequías ligeras, sequías moderadas un 16.9%, sequías severas un 4% y un 4.8% sequías extremas.

Los años 1998, 2000, 2002, 2003, 2004, 2005, 2007, 2008, 2010 y 2013, la sequía meteorológica pasó a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Un solo año (1998), registro 7 meses una sequía extrema de intensidad -2.54.

FIGURA N° 20 SPI-12 Estacion Sachapera



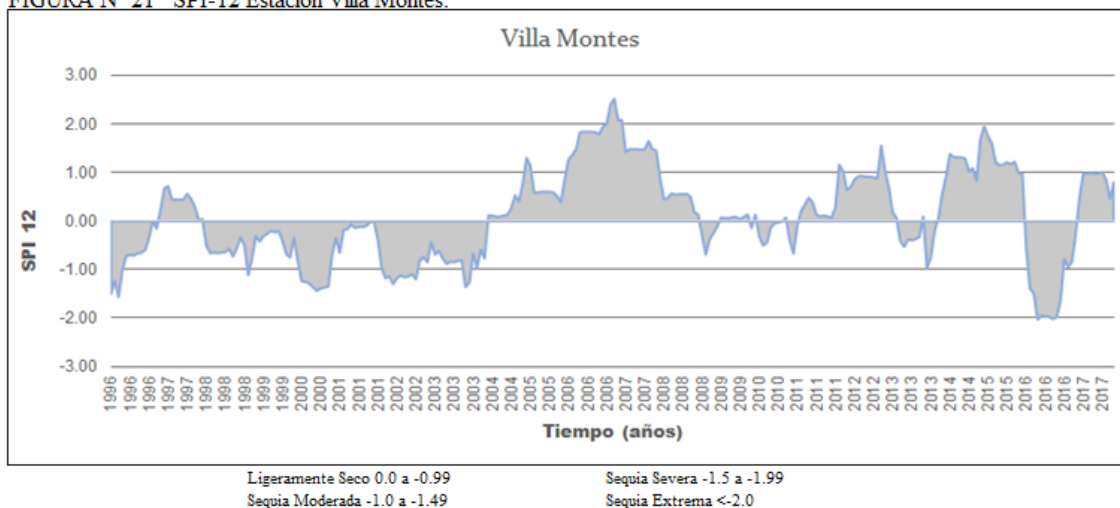
Los resultados nos muestran un total 160 eventos (60.6%) de los 264 casos posibles.

De los 22 años en estudio, cinco años (1997, 2004, 2005, 2006, 2015) no presentaron ninguna clase de sequía; las demás fueron: un 66.2% sequías ligeras, sequías moderadas un 22.5%, sequías severas un 10.6% y un 0.7% sequías extremas.

Los años 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2008, 2009, 2010, 2011 y 2013 la sequía meteorológica pasó a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Un solo año (2013), registro un mes con sequía extrema de intensidad -2.37.

FIGURA N° 21 SPI-12 Estacion Villa Montes.



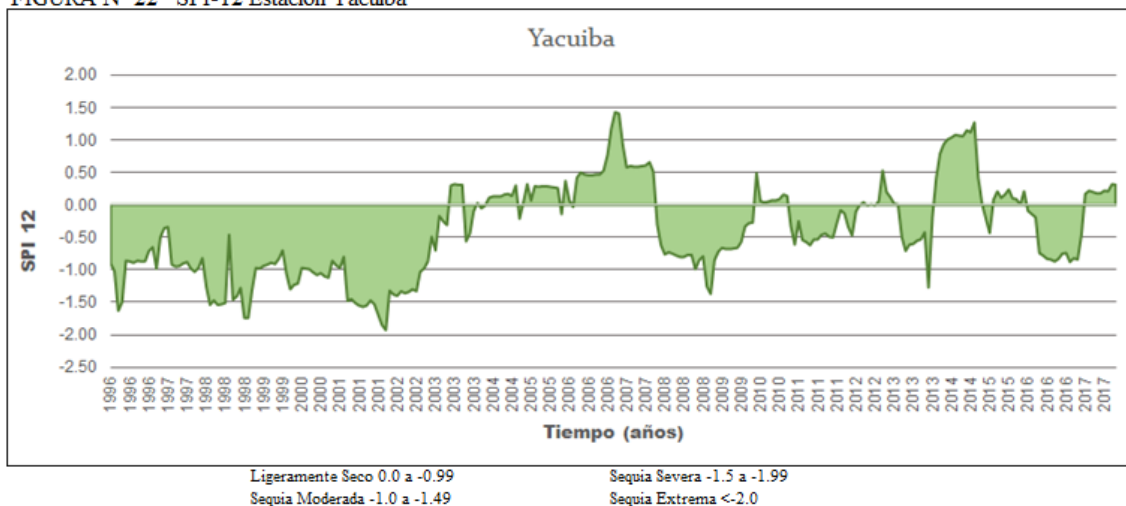
Los resultados nos muestran un total 126 eventos (48.9%) de los 264 casos posibles.

De los 22 años en estudio, nueve años (1997, 2005, 2006, 2007, 2008, 2011, 2012, 2014, 2015) no presentaron ninguna clase de sequía; las demás fueron: un 74.5% sequías ligeras, sequías moderadas un 18.2%, sequías severas un 5.7% y un 1.6% sequías extremas.

Los años 1996, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003 y 2016 la sequía meteorológica pasó a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

Un solo año (2016) se registró sequías extremas, de duración mensual con un índice de -2.03.

FIGURA N° 22 SPI-12 Estacion Yacuiba



Los resultados nos muestran un total 171 eventos (64.8%) de los 264 casos posibles.

De los 22 años en estudio, cuatro años (2005, 2006, 2007, 2014) no presentaron ninguna clase de sequía; las demás fueron: un 71.9% sequías ligeras, sequías moderadas un 18.7%, sequías severas un 9.4% y un 0% sequías extremas.

Los años 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2008, 2009, 2011 y 2016 sequía meteorológica pasó a una sequía agrícola y social debido a la duración del evento.

En el periodo de estudio la estación Yacuiba no registro sequía extrema.

3.2. Caracterización de las sequias meteorológicas

3.2.1. Duración

Escala Trimestral

Ligeramente Seco: La duración promedio en la provincia Gran Chaco es de tres meses al año. Las estaciones de Palos Blancos y Aguaraycito son las que presentaron mayor duración en sequías ligeras (124 y 122 meses).

Sequia Moderada: tienen una duración promedio de seis meses al año. Las estaciones de Yacuiba y Palmar Grande registraron la mayor duración (44 y 40 meses respectivamente).

Sequia Severa: con una duración promedio de cuatro meses al año. Las estaciones de Sachapera y Palmar Grande registraron la mayor duración 9 y 5 meses respectivamente.

Sequía extrema: Algarrobillas es la estación que más tiempo duro una sequía extrema (10 meses). Como duración promedio en la zona del Gran Chaco es de 2 meses. Las estaciones de Aguaraycito y Algarrobillas, presentaron un solo evento de sequía extrema con una duración promedio de 5 meses.

* La evolución de la sequía extrema en Aguaraycito duro 4 meses, se inició en febrero 2013 a Abril/13 con un índice de sequía extrema finalizando en mayo 2013 con una sequía severa.

* La evolución en la estación Algarrobillas, se inició en octubre 2015 como sequía moderada, de noviembre 2015 a febrero 2016 pasó a sequía extrema, de marzo 2016 a junio 2016 como sequía severa y culminó en julio 2016 como ligeramente seco.

Las sequia más largas se registró en la estación Palmar Grande, en el periodo febrero 2008 a noviembre 2009 (22 meses) alcanzando una intensidad máxima de -2.02 (sequía extrema).

TABLA N° 11 Resultados del número de eventos, duración total y probabilidad de ocurrencia en la escala trimestral (SPI 3).

Estación	Valor SPI	Eventos	Duración Total	Probabilidad de Ocurrencia	Probabilidad de ocurrencia Anual
Aguaraycito	0.0 a -0.99	33	122	33 Eventos en 22 años	100.00 %
	-1.00 a -1.49	1	11	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	-1.50 a -1.99	1	2	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	<-2.00	1	4	1 Eventos en 22 años	4.55 %
Algarrobillas	0.0 a -0.99	36	91	36 Eventos en 22 años	100.00 %
	-1.00 a -1.49	5	23	5 Eventos en 22 años	22.73 %
	-1.50 a -1.99	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
	<-2.00	1	10	1 Eventos en 22 años	4.55 %
Palmar Grande	0.0 a -0.99	31	98	31 Eventos en 22 años	100.00 %
	-1.00 a -1.49	7	40	7 Eventos en 22 años	31.82 %
	-1.50 a -1.99	1	5	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
Palos Blancos	0.0 a -0.99	43	124	43 Eventos en 22 años	100.00 %
	-1.00 a -1.49	1	10	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	-1.50 a -1.99	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
Sachapera	0.0 a -0.99	41	120	41 Eventos en 22 años	100.00 %
	-1.00 a -1.49	2	14	2 Eventos en 22 años	9.09 %
	-1.50 a -1.99	2	9	2 Eventos en 22 años	9.09 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
Villa Montes	0.0 a -0.99	32	96	32 Eventos en 22 años	100.00 %
	-1.00 a -1.49	6	31	6 Eventos en 22 años	27.27 %
	-1.50 a -1.99	1	3	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
Yacubá	0.0 a -0.99	25	118	25 Eventos en 22 años	100.00 %
	-1.00 a -1.49	9	44	9 Eventos en 22 años	40.91 %
	-1.50 a -1.99	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %

Escala Anual

Ligeramente Seco: Las sequías de este tipo tienen una duración promedio de nueve meses/año. Las estaciones de Sachapera y Villa Montes tienen la mayor duración (122 y 112 meses respectivamente).

Sequía Moderada: La duración promedio en la región del Chaco es de 34 meses. Las estaciones de Yacuiba y Aguaraycito registraron la mayor duración (89 y 62 meses respectivamente).

Sequia Severa: La duración promedio en la región del Chaco tarijeño es de dos meses. Solo la estación de Palos Blancos registro 15 meses de duración.

Sequía extrema: Algarrobillas es la estación que más tiempo duro una sequía extrema (15 meses). Como duración promedio en la zona del Gran Chaco es de 2 meses.

* La evolución de la sequía extrema en la estación Algarrobillas, se inició en enero 2016 como ligeramente seco, de febrero a marzo 2016 como sequia severa, de abril a octubre 2016 como sequía extrema con valores de intensidad menores de -3.0, de noviembre a marzo como ligeramente seco.

Las sequia más largas se registró en la estación Yacuiba, en el periodo marzo 1992 a mayo 2003 (135 meses) alcanzando una intensidad máxima de -1.78 (sequía severa).

TABLA N° 12 Resultados del número de eventos, duración total y probabilidad de ocurrencia en la escala Anual (SPI 12).

Estación	Valor SPI	Eventos	Duración Total	Probabilidad de Ocurrencia	Probabilidad de ocurrencia Anual
Aguaraycito	0.0 a -0.99	12	85	12 Eventos en 22 años	54.55 %
	-1.00 a -1.49	2	62	2 Eventos en 22 años	9.09 %
	-1.50 a -1.99	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
Algarrobillas	0.0 a -0.99	9	91	9 Eventos en 22 años	40.91 %
	-1.00 a -1.49	1	41	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	-1.50 a -1.99	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
	<-2.00	1	15	1 Eventos en 22 años	4.55 %
Palmar Grande	0.0 a -0.99	14	86	14 Eventos en 22 años	63.64 %
	-1.00 a -1.49	1	51	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	-1.50 a -1.99	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
Palos Blancos	0.0 a -0.99	11	92	11 Eventos en 22 años	50.00 %
	-1.00 a -1.49	1	13	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	-1.50 a -1.99	1	15	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
Sachapera	0.0 a -0.99	8	122	8 Eventos en 22 años	36.36 %
	-1.00 a -1.49	2	38	2 Eventos en 22 años	9.09 %
	-1.50 a -1.99	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
Villa Montes	0.0 a -0.99	9	112	9 Eventos en 22 años	40.91 %
	-1.00 a -1.49	1	14	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	-1.50 a -1.99	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
Yacubá	0.0 a -0.99	12	82	12 Eventos en 22 años	54.55 %
	-1.00 a -1.49	1	89	1 Eventos en 22 años	4.55 %
	-1.50 a -1.99	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %
	<-2.00	0	0	0 Eventos en 22 años	0.00 %

3.2.2. Eventos

En la Tabla n° 11 también observamos el resultado de número de eventos en la escala trimestral (SPI 3).

Sequias Ligeras: La región del Chaco tarijeño, ha presentado un promedio de 34 eventos en el periodo de estudio con una duración de 3 meses cada uno, la probabilidad de ocurrencia de un evento al año de estas características es de 100%. La estación Palos Blancos fue la que mayor número de eventos se registraron (43).

Sequias Moderadas: la zona de estudio tiene un promedio de 4 eventos en 22 años de una duración de 6 meses; la probabilidad anual de que ocurra un evento de este tipo es de un 20%. La estación de Yacuiba registró 9 eventos, con duración promedio de 5 meses.

Sequias severas: es la más generalizada en la región ya que 4 estaciones en estudio registraron 1 eventos con una duración promedio de 4 meses. La probabilidad de que se presente un evento al año de estas características es de 3%.

Sequias Extremas: Solo las estaciones de Aguaraycito y Algarrobillas presentaron un evento de sequía extrema con duración de 7 meses.

En la escala anual (SPI 12), Tabla n° 12, observamos el resultado de número de eventos:

Sequias Ligeras: La zona de estudio, tiene un promedio de 11 eventos de duración 9 meses, la probabilidad de ocurrencia de un evento al año es del 48%. La estación

Palmar Grande registro 14 eventos de sequía ligeras con una duración promedio de 6 meses.

Sequias Moderadas: En el periodo de estudio, se tiene un promedio de 1 evento de duración 44 meses; la probabilidad de que este evento se repita en un año es de un 6%. Las estaciones de Aguaraycito y Sachapera solo registraron 2 eventos, con duración promedio de 25 meses.

Sequias severas: Solo una estación (Palos Blancos), registro 1 solo evento, con duración de 15 meses. La probabilidad de que se presente un evento al año de estas características es de 1%.

Sequias Extremas: Solo Algarrobillas presento un evento de sequía extrema con duración de 15 meses.

3.2.3. Frecuencia

a) Frecuencia Relativa de Sequías: Escala trimestral (SPI 3)

TABLA N° 13 Frecuencia de Ocurrencia (%) de diferentes tipos de Sequia, escala trimestral (SPI 3).

Tipos de Sequia	Aguaraycito	Algarrobillas	Palmar Grande	Palos Blancos	Sachapera	Villa Montes	Yacuiba
Porcentaje de Ocurrencia (%)	52.7	47.0	54.2	50.8	54.2	49.6	61.4
Sequia Ligera 0.0 a -0.99	73.4	65.3	70.6	77.6	70.6	71.0	69.8
Sequia Moderada -1.00 a -1.49	13.7	16.9	15.4	16.4	18.9	16.8	19.1
Sequia Severa -1.50 a -1.99	8.6	12.2	8.4	2.2	6.3	10.7	8.6
Sequia Extrema <-2.00	4.3	5.6	5.6	3.8	4.2	1.5	2.5

La región del Chaco se caracteriza por presentar un mayor número de meses con Sequia Ligeras (71.2%), sólo un 3.9% con meses con sequias extremas; estas sequias

extremas se han presentado en un mayor porcentaje (5.6%) en las estaciones de Algarrobillas y Palos Blancos. (Tabla n° 13)

b) Frecuencia Relativa de Sequias: Escala Anual (SPI 12)

TABLA N° 14 Frecuencia de Ocurrencia (%) de diferentes tipos de Sequia, escala Anual (SPI 12).

Tipos de Sequia	Aguaraycito	Algarrobillas	Palmar Grande	Palos Blancos	Sachapera	Villa Montes	Yacuiba
Porcentaje de Ocurrencia (%)	55.7	55.7	51.9	56.1	60.6	47.7	64.8
Sequia Ligera 0.0 a -0.99	66.7	66.0	59.1	74.3	66.3	74.6	71.9
Sequia Moderada -1.00 a -1.49	22.4	22.4	21.9	16.9	22.5	18.3	18.7
Sequia Severa -1.50 a -1.99	7.5	3.4	10.2	4.1	10.6	5.6	9.4
Sequia Extrema <-2.00	3.4	8.2	8.8	4.7	0.6	1.5	0.0

Un 68.4 % de los casos estudiados son Sequías Ligeras, sólo un 3.9% de meses con sequias extremas; estas sequias extremas se han presentado en un mayor porcentaje en las estaciones de Algarrobillas y Palmar Grande. Tabla n° 14.

3.2.4. Magnitud

La magnitud tiene relación con la intensidad y duración. Es decir que una sequía moderada con una duración de 6 meses presenta una severidad mayor que si se presentara una sequía extrema que dure un solo mes, por eso uno de los parámetros fundamentales para la magnitud es la duración, ya que determina que tan severos son los eventos, aunque su intensidad no necesariamente sea la más fuerte (sequias extremas).

En las Tablas 15 y 16 nos muestra las magnitudes máximas registradas en el periodo de estudio en la escala trimestral (SPI3) y anual (SPI 12); para las demás agrupaciones se detalla en el anexo 4.

TABLA N° 15 Magnitud de eventos maximos (SPI 3), en la region del Chaco.

Estacion	Magnitud	Duracion		Int. Max
		Inicio	Final	
Palos Blancos	11.46	Diciembre 1997	Mayo 1998	2.52
Villa Montes	10.33	Noviembre 2015	Mayo 2016	1.85
Yacuiba	9.80	Enero 2001	Agosto 2001	1.50
Aguaraycito	9.43	Febrero 2005	Mayo 2013	2.92
Aguaraycito	8.85	Febrero 2008	Junio 2008	2.11
Sachapera	8.28	Febrero 2013	Mayo 2013	2.77



3.3. Identificación de sequías regionales

Para determinar en qué grado las sequías tenían un comportamiento regional se analizó las estaciones pluviométricas en las escalas temporales de 3 y 12 meses, determinando las sequías regionales y puntuales que se registraron en el periodo de

estudio. En la tabla 17 y 18 se muestran las matrices de correlación de las 7 estaciones que se utilizaron como base de estudio, en la escala trimestral y anual, en donde la correlación categorizada como correlación alta se observa en las estaciones de Aguaraycito, Palmar Grande y Villa Montes.

Las sequías en el Gran Chaco son estacionales, no son generalizadas, el inicio y fin de una sequía en una estación difiere en la otras.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, se establecieron las siguientes conclusiones:

- En la caracterización de la sequía meteorológica, las sequías leves (0.0 a -0.99) que se registraron en el periodo de estudio (1996-2017) son mayores que las sequías moderadas, severas y extremas en todas las estaciones pluviométricas; estas sequías tienen una duración promedio de 3 meses, consideradas como sequías meteorológicas.
- Las sequías severas (-1.50 a -1.99) a pesar que no se registran tan frecuentemente (8%) en comparación con la sequía moderada (-1.00 a -1.49) presentan una mayor frecuencia que las sequías extremas 4% (<-2.00).
- El mayor número de eventos que se registran en el Chaco Tarijeño son del tipo sequias ligeras con duración de 4 meses; se tiene una probabilidad del 100% de que cada año se presente una sequía de esta categoría.
- Las sequías son difíciles de determinar en el tiempo real en que empiezan y terminan, lo cual se comprobó en el estudio ya que todas las estaciones registraron distintos eventos e intensidades de sequías en los diferentes años y principalmente diferencias en sus características dificultando la regionalización de sequías. Es así que solo los años 2010 y 2013 se registraron sequias extremas en la mayoría de las estaciones en estudio.
- En cuanto al grado de severidad de sequía; la región en estudio se caracteriza por la presencia de sequías ligeras a moderadas, la prolongación de estas condiciones suele ser más perjudicial que una sequía severa o extrema.

- Los SPI-3 y 12 meses, reflejan que en la región del Chaco Tarijeño se presentan eventos de sequía que comprenden largos periodos de tiempo, de hasta 5 años (Yacuiba), pasando de una sequía meteorológica a una agrícola y socioeconómica.
- El Índice de Precipitación Estandarizado es una metodología que se puede aplicar en la región del Chaco Tarijeño, debido a la facilidad de su cálculo y la disponibilidad de datos en la zona.
- Sea la agrupación de 1, 3, 6, 9, 12, 24 meses del SPI, 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 al mes siguiente si se presentaran precipitaciones normales; en otros casos la condición de sequía puede extenderse por varios meses.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar los resultados obtenidos respecto a los distintos parámetros como duración, número de eventos, frecuencia y magnitud como un insumo

relevante para la planificación y especialmente para la adaptación a las sequías en la región del Gran Chaco tarijeño.

- 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.
- Mejorar la recopilación de información meteorológica, mediante un incremento en la cantidad de estaciones que registren parámetros básicos como precipitación, temperatura y evaporación, de esta manera facilitar la realización de análisis básicos como balances hídricos.