

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales

Tesis Doctoral



**Identificación y evaluación de sequías en cuencas
seleccionadas de la Región Centro de Argentina**

Autor: MSc. Ing. Leticia del Valle VICARIO
Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo GARCÍA RODRÍGUEZ

Mayo de 2017

Identificación y evaluación de sequías en cuencas seleccionadas de la Región Centro de Argentina

por

MSc. Ing. Leticia del Valle VICARIO

Dr. Ing. Carlos Marcelo GARCÍA RODRÍGUEZ

Director

COMISIÓN ASESORA:

Dr. Ing. Carlos Marcelo GARCÍA RODRÍGUEZ

FCEFYN - UNC

Dr. Ing. Andrés RAVELO

FCA - UNC

Dr. Ing. Andrés RODRÍGUEZ

FCEFYN - UNC

Esta Tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba para cumplimentar los requerimientos de obtención del grado académico de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

Córdoba, Argentina
Mayo de 2017



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Facultad de Cs. Exactas, Fisicas y Naturales

ACTA DE EXAMENES

Libro: 00001

Acta: 03907

Hoja 01/01

LLAMADO: 1

22/05/2017

CATEDRA - MESA:

DI002 TESIS DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

NUMERO	APELLIDO Y NOMBRE	DOCUMENTO	INGRESO	COND.	NOTA	FIRMA
26087867	VICARIO, LETICIA DEL VALLE	DNI: 26087867	2007	T	APROBADO	

RODRIGUEZ, Leticia - SERRA, Juan - ZIMMERMANN, Erik Daniel - TARRAB, Leticia - RAVELO, Andrés C. -

Observaciones:

Córdoba, ___/___/___.

Certifico que la/s firma/s que ha/n sido puesta/s en la _____ :ta pertenece/n a: Leticia Tarrab

Inscriptos
 Ausentes
 Examinados
 Reprobados
 Aprobados

12/05/2017 09:30:09

Libro/Acta: 0000103907

Hoja: 01/ 01

*"El misterio es la cosa más bonita que podemos experimentar.
Es la fuente de todo arte y ciencia verdaderos."*

Albert Einstein

LA MADRE DE LOS RIOS Y LOS ARROYOS

Fuente: Cuentos y leyendas argentinos.

Selección y prólogo de Roberto Rosaspini Reynolds. Ediciones Continente.

Según cuenta la leyenda, en la cima del cerro Aracar, a más de 6.000 metros de altura, vivía una hermosa mujer blanca, alta y esbelta como una diosa, y cuya larga melena dorada caía hasta más abajo de su cintura, mientras se mecía dulcemente, agitada por los fríos vientos cordilleranos. Su cuerpo era transparente, como si hubiera estado hecho de puras nubes.

No eran pocos los arrieros y los cazadores de vicuñas y guanacos que la habían vislumbrado en lo más ignoto de las quebradas o en lo más inaccesible de los picos, pero nunca se supo de alguien que se jactara de haber tenido trato con ella, o de haber podido acercársele demasiado. La mujer andaba siempre acompañada de una pequeña corzuela blanca como la nieve, que la seguía cuando bajaba a las quebradas o se acercaba al río para lavar su rubia cabellera.

Pero en un día de tristeza para el pueblo, porque una sequía había acabado con toda el agua de la quebrada, la mujer, apenada por los lamentos de la gente del pueblo, dejó la corzuela cerca de su choza y echó a andar por las nubes para bajar al valle a ver lo que sucedía. Pero el Zupay (el diablo) no es bicho de quedarse tranquilo cuando puede hacer maldades. Y así hizo que un cazador que perseguía vicuñas y guanacos por las laderas del Aracar viera la corzuela. Gatiando entre las peñas, el hombre se arrimó lo más que pudo y, cuando la tuvo a tiro, disparó su fusil, que retumbó con ecos malignos entre los cañadones y los laberintos de la cumbre.

El desdichado animal, herido de muerte, corrió ciegamente hacia el borde del risco y se arrojó al vacío, donde murió entre las rocas del fondo. Un silencio de muerte pareció descender desde el cielo atardecido, y cuando la mujer hecha de nubes llegó a su hogar y no vio a su compañera, inmediatamente supo que algo terrible había sucedido; salió a buscarla y, al divisarla en el fondo del cañadón, la tomó en sus brazos y la llevó cuidadosamente hasta la cima más alta del Aracar. Y sólo al llegar allí permitió que las lágrimas fluyeran de sus ojos, y lloró; lloró sin cesar hasta que sus ojos se convirtieron en dos fuentes inagotables, y sus cabellos en otros tantos cauces de ríos y arroyos que no sólo lavaron la sangre de la corzuela, sino que también permitieron a la gente del pueblo saciar la sed provocada por la sequía.

Y así fue como nacieron los manantiales, los arroyos y los ríos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy especialmente:

A la Secretaría de Ciencia y Técnica (SeCyT-UNC) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por el apoyo institucional y financiero recibido a través de becas de formación para llevar a cabo parte de este Doctorado.

A la Carrera del Doctorado de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Especialmente al Dr. Luis Godoy y a la Ing. Alejandra Tita, por su apoyo a lo largo de mi carrera.

Mi mayor reconocimiento es a mi Director: Dr. C. Marcelo García, una persona a la cual aprecio, respeto, y admiro como profesional, pero sobre todo por su calidad de persona. Por haberse puesto al hombro mi trabajo y haberme guiado de manera comprometida y constante, siempre. ¡Muchas gracias!

Especialmente quiero agradecer a mi Comisión asesora integrada por el Dr. Andrés Ravelo y por el Dr. Andrés Rodríguez. Además del afecto que les tengo, profesionalmente es un orgullo para mí contar con su ayuda siempre y desde hace tanto tiempo. Gracias por estar siempre atentos a mi trabajo a lo largo de estos años.

Al tribunal asignado, que tan amable y profesionalmente revisaron mi Tesis para ayudarme a mejorarla: a la Dra. Leticia Rodríguez, al Dr. Erik Zimmermann y al Dr. Juan Serra.

A mis compañeros, colegas y profesores con los que he transitado este camino, tanto de la Cátedra de Hidrología y Procesos Hidráulicos de la FCEFYN, como del CETA y del Laboratorio de Hidráulica, especialmente a José Manuel Díaz Lozada y Érica Díaz.

Especialmente quiero reconocer a mis compañeros del INA-CIRSA con los que comparto el día a día, por acompañarme en cada instancia de la etapa final. Particularmente quiero agradecer a Clarita Dasso y María Eugenia Capone; a Marcia Ruiz, Ana Laura Ruibal, Ana Laura Rydzewski y Carlos Catalini; a todos por brindarme tiempo y ayuda cuando lo necesité para llevar a cabo este objetivo.

En lo personal, quiero agradecer como siempre y por todo a mis padres: Carmen y Luis. Ellos me dieron todas las herramientas para ser feliz.

Pero quien se lleva todos los reconocimientos es mi marido, siempre incondicional, por el constante acompañamiento y ayuda, por su fe absoluta en mí. Gracias por no permitirme bajar los brazos porque estabas más seguro que nadie de que este momento iba a llegar. El gran logro de mi vida es haber formado la familia que formamos juntos, habernos elegido y seguir eligiéndonos día a día. Gracias Fer...una y mil veces gracias mi amor.

Por sobre todo, les tengo que agradecer a cada mitad de mi corazón, a mis dos hijos: Tomás y Máximo, porque para que yo pudiera hacer esto cedieron tiempo, un tiempo que les pertenecía a ellos.... Los amo hasta el infinito y más allá...



Identificación y evaluación de sequías en cuencas seleccionadas de la Región Centro de Argentina

Resumen

La escasez de precipitaciones durante un tiempo considerable puede adoptarse como una definición conceptual del fenómeno de la sequía, el cual constituye un proceso hidrológico extremo y puede ser clasificado según la variable utilizada o el objetivo de estudio. La ocurrencia y efectos de las sequías evolucionan de manera incierta en el tiempo y en el espacio. Esto hace compleja su cuantificación y caracterización por lo que todavía son poco predecibles, de tal manera que es un problema que debe ser abordado desde varios enfoques. La Región Centro de la Argentina constituye un área de gran importancia socio-económica en el país donde los estudios sobre distintos aspectos de las sequías son escasos, por lo cual se considera necesario e indispensable estudiar y avanzar en el área de conocimiento de esta temática, abordándolo de manera integral para favorecer la toma de decisiones en la gestión y planificación de los recursos hídricos en una comunidad afectada y su entorno. Para esta tesis, dentro de dicha región se seleccionaron cuencas de diferentes características, fundamentalmente en lo que se refiere al tipo de sistema de la unidad hidrográfica y al tamaño. Las mismas se encuentran, en el caso de la cuenca alta del río Suquía y la del río San Antonio dentro de la región serrana de la provincia de Córdoba y en el caso de la cuenca del río Carcarañá dentro, principalmente, de la llanura pampeana que abarca parte de las provincias de Córdoba y Santa Fe. Se utilizaron datos de estaciones de superficie y de tecnología remota. Se aplicaron metodologías estadísticas básicas y complejas, índices representativos de distintos tipos de sequías y técnica de análisis de frecuencia. En este trabajo fue posible generar avances en el conocimiento, tanto de los aspectos técnicos-científicos asociados a las sequías meteorológicas e hidrológicas, como así también sobre la relación de este fenómeno con procesos de carácter macroclimático, en cuencas seleccionadas de la Región Centro de la República Argentina.

Palabras claves: Sequía meteorológica e hidrológica - Región Centro de Argentina – cuenca serrana y de llanura

Identification and evaluation of drought in selected basins of the central region of Argentina

Abstract

Long periods of low rainfall can be taken as a conceptual definition of the phenomenon of drought. This phenomenon is an extreme hydrological process that can be classified according to the variable used or the purpose of study. The occurrence and the effects of a drought evolve uncertainly in time and space. This makes the quantification and characterization of droughts complex and consequently renders them unpredictable. As such, droughts are a problem that must be addressed using several approaches. The center region of Argentina is an area of great socio-economic importance in the country, where studies on various aspects of drought are scarce. It is therefore necessary and important to study and generate knowledge in this scientific field in order to facilitate decision making, management and planning of water resources in a community affected by drought and its environment. In order to carry this out, different river basins in the central area of Argentina were selected considering differences in type and size of the hydrographic unit. The Suquía upper river basin and the San Antonio basin are located in a mountainous region of Córdoba. The Carcarañá basin, is located in the plains covering parts of the provinces of Córdoba and Santa Fe. Data from hydro-meteorological surface stations were used as well as remote technologies. Basic and complex statistical methodologies, representative indices of different types of drought, and frequency analysis were applied. This work has contributed to generating advances in knowledge scientifically and technically associated with both meteorological and hydrological aspects of drought, as well as on the relationship of this phenomenon with macroclimatic processes, in selected basins of the central region of the Argentina.

Key words: Meteorological and hydrological drought - Central region of Argentina - mountain and plain basins

Identificação e avaliação à seca em bacias selecionadas da Região Centro da Argentina

Resumo

A escassez de chuva durante um tempo considerável pode ser tomada como uma definição conceitual do fenômeno da seca, o que constitui um processo hidrológico extremo e pode ser classificado de acordo à variável usada ou objetivo de estudo. A ocorrência e efeitos das secas evoluir com incerteza no tempo e no espaço, o que faz complexa sua quantificação e caracterização pelo que ainda são pouco previsíveis. Então, que é um problema que deve ser abordado a partir de várias abordagens. A Região Centro da Argentina constitui uma área de grande importância socioeconômica do país onde estudos sobre diversos aspectos das secas são escassos. É, portanto, considerado necessário e indispensável estudar e avançar na área de conhecimento deste assunto, abordando-o de forma abrangente para favorecer a tomada de decisões na gestão e planejamento dos recursos hídricos numa comunidade afetada e seu ambiente. Para isso, dentro dessa região foram selecionadas bacias de diferentes características, principalmente, no tipo de sistema da unidade hidrográfica e no tamanho. As mesmas encontram-se, no caso da bacia superior do rio Suquía e bacia do Rio San Antonio dentro da região serrana da província de Córdoba e, no caso da bacia do rio Carcarañá dentro principalmente da planície pampeana que abrangem parte das províncias de Córdoba e Santa Fe. Foram usados dados de estações de superfície e tecnologias remotas. Se aplicaram metodologias estatísticas básicas e complexas para a análise de frequência. Neste trabalho foi possível gerar avanços no conhecimento, tanto dos aspectos técnicos-científicos associados às secas meteorológicas e hidrológicas, como assim também sobre a relação deste fenômeno com processos macroclimático em bacias hidrográficas selecionadas da Região centro da Argentina.

Palavras chave: Seca meteorológica e hidrológica - Região centro de Argentina - bacia serrana e de planície.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. MARCO REFERENCIAL	
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2. PROBLEMÁTICA	3
1.3. ANTECEDENTES Y ÁREAS DE VACANCIA	5
1.4. OBJETIVOS	7
1.5. REGIÓN DE ESTUDIO	8
1.5.1. Descripción de la cuenca alta del río Suquía	15
1.5.2. Descripción de la cuenca del río San Antonio	17
1.5.3. Descripción de la cuenca del río Carcarañá	18
1.6. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	19
CAPÍTULO 2. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN DISTINTAS ESCALAS ESPACIALES	
2.1. INTRODUCCIÓN	22
2.2. ESTUDIO LOCAL DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO SUQUÍA	24
2.2.1. Introducción	24
2.2.2. Información utilizada	24
2.2.3. Índices seleccionados para caracterizar sequías meteorológicas	26
2.2.4. Resultados	28
2.3. ESTUDIO DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN LA REGIÓN CENTRO DE LA ARGENTINA	35
2.3.1. Introducción	35
2.3.2. Información utilizada	35
2.3.3. Análisis regional: identificación de zonas hidrometeorológicamente homogéneas	36
2.3.4. Determinación de un índice representativo de las sequías meteorológicas	38
2.3.5. Resultados y discusión.	38
2.4. VALIDACIÓN Y USO DE DATOS DE PRECIPITACIONES ESTIMADAS A PARTIR DE TRMM PARA COMPLEMENTAR LOS ESTUDIOS DE EVOLUCIÓN ESPACIAL DE LAS SEQUÍAS METEOROLOGICAS	47
2.4.1. Introducción	47
2.4.2. Información utilizada	47
2.4.3. Validación de estimaciones pluviométricas realizada con TRMM	50
2.4.4. Resultados y discusión	52
CAPÍTULO 3. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN DISTINTAS ESCALAS ESPACIALES	
3.1. INTRODUCCIÓN	64
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS	65
3.2.1. Información utilizada	65
3.2.2. Índice seleccionado para evaluar sequías hidrológicas	65
3.2.3. Series sintéticas de caudales y aplicación del índice SDI	66

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
3.3.1. Evaluación del índice SDI utilizando series sintéticas	70
3.3.2. Evaluación de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Carcarañá y en la cuenca del río San Antonio	78
CAPÍTULO 4. RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES E ÍNDICES REPRESENTATIVOS DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS E HIDROLÓGICAS	
4.1. INTRODUCCIÓN	82
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS	82
4.2.1. Información utilizada	82
4.2.2. Metodología utilizada para el análisis de datos	86
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	87
4.3.1. Correlación entre Precipitación- Caudal	87
4.3.2. Correlación de índices de sequías meteorológicas e hidrológicas	92
CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN DE PERIODICIDADES PLURIANUALES EN LAS SERIES DE ÍNDICES DE SEQUÍAS Y SU RELACIÓN CON LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE INDICADORES MACROCLIMÁTICOS	
5.1. INTRODUCCIÓN	95
5.2. MATERIALES Y MÉTODOS	96
5.2.1. Cuenca del río Carcarañá	96
5.2.2. Cuenca alta del río Suquía	97
5.2.3. Indicadores macroclimáticos	98
5.2.4. Análisis espectral	98
5.2.5. Análisis de correlación entre series filtradas de índices de sequías e indicadores macroclimáticos para distintos anchos de bandas	100
5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	101
5.3.1. Cuenca del río Carcarañá	101
5.3.2. Cuenca alta del río Suquía	107
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1. CONCLUSIONES	112
6.1.1. Sequías meteorológicas	112
6.1.2. Sequías hidrológicas	114
6.1.3. Relación entre variables e índices de sequías	115
6.1.4. Periodicidades plurianuales de las series de índices de sequías y su relación con indicadores macroclimáticos	115
6.2. RECOMENDACIONES	116
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa regional de Argentina: Color rojo: Región del Norte, color verde: Región Centro, color azul: Región del Nuevo Cuyo, color amarillo: Región Patagónica y color gris: provincia de Buenos Aires	9
Figura 1.2. Mapa climático de Argentina. Se destaca la Región Centro	9
Figura 1.3. Mapas de temperaturas medias mensuales del mes más cálido (enero) y del más frío (julio) de Argentina. Se destaca la Región Centro	10
Figura 1.4. Mapa de precipitaciones medias anuales de Argentina. Se destaca la Región Centro	10
Figura 1.5. Gráfico superior: temperaturas máximas medias (rojo), medias (amarillo) y mínimas medias (azul). Gráfico inferior: cantidad de días con precipitación mayor o igual a 0.1 mm 1 mm (rombos verdes) y el total acumulado de precipitación mensual (barras azules), para el período 1961-1990, en la ciudad de Córdoba, provincia de Córdoba	11
Figura 1.6. Gráfico superior: temperaturas máximas medias (rojo), medias (amarillo) y mínimas medias (azul). Gráfico inferior: cantidad de días con precipitación mayor o igual a 0.1 mm 1 mm (rombos verdes) y el total acumulado de precipitación mensual (barras azules), para el período 1961-1990, en la ciudad de Rosario, provincia de Santa Fe	12
Figura 1.7. Gráfico superior: temperaturas máximas medias (rojo), medias (amarillo) y mínimas medias (azul), Gráfico inferior: cantidad de días con precipitación mayor o igual a 0.1 mm 1 mm (rombos verdes) y el total acumulado de precipitación mensual (barras azules), para el período 1961-1990, en la ciudad de Paraná, provincia de Entre Ríos	13
Figura 1.8. Mapa de cuencas y regiones hídricas superficiales de la República Argentina y ampliación de la región de interés	14
Figura 1.9. Ubicación del Valle de Punilla. Provincia de Córdoba	15
Figura 1.10. Cuenca hidrográfica alta del río Suquía. Se marcan los principales tributarios y la estación pluviométrica San Roque (marca roja)	16
Figura 1.11. Cuenca del Río San Antonio. Puntos rojos: puestos de medición utilizados de la red telemétrica del INA-CIRSA, círculo azul: sección hidrométrica N° 600: Barrio El Canal	17
Figura 1.12. Ubicación de la cuenca del río Carcarañá y de la sección hidrométrica de Pueblo Andino en un círculo azul	19
Figura 2.1. Precipitaciones mensuales de la estación San Roque. (1943-1999)	25
Figura 2.2. Índice de sequía de Palmer (PDI) para la estación San Roque. (1943-1999). Color: Azul: muy húmedo, Celeste: ligeramente húmedo, Verde: normal, Amarillo: sequía incipiente, Naranja: sequía moderada, Rojo: sequía severa	29
Figura 2.3. Histograma del índice PDI en la estación San Roque. Período 1943-1999.	30

Figura 2.4. Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la estación San Roque. (1943-1999)	31
Figura 2.5. Histograma del índice SPI en la estación San Roque. Período 1943-1999	32
Figura 2.6. Identificación de los años en los que los índices PDI y/o SPI caracteriza algún mes con una sequía intensa en la cuenca alta del río Suquía. Período 1943-1999	33
Figura 2.7. Histograma de frecuencias de distintos tipos de sequías observadas en cada mes del año respecto de ser caracterizados como normales y húmedos según el índice PDI en la cuenca alta del río Suquía (1943-1999)	34
Figura 2.8. Ordenamiento de las estaciones pluviométricas seleccionadas en el plano definido por las dos primeras componentes principales obtenidas del ACP realizado sobre los datos de precipitación anual (1980 – 2009). Los distintos tonos corresponden a estaciones ubicadas en distintas provincias	40
Figura 2.9. Dendrograma obtenido mediante el análisis de conglomerados realizado sobre los datos de precipitación anual entre los años 1980 y 2009 de las 13 estaciones analizadas. Se detalla la distancia a la cual se separan los tres grupos obtenidos	40
Figura 2.10. Localización de las estaciones que conforman cada una de las agrupaciones distinguidas según: Grupo 1: cuadrado, Grupo 2: triángulo y Grupo 3: círculo en la región de estudio	41
Figura 2.11. Ampliación del mapa de precipitación media anual de la República Argentina con las estaciones del Grupo 1: cuadrado, Grupo 2: triángulo y Grupo 3: círculo. Se destacan (cuadro rojo) los valores de precipitación media anual (mm) en la zona de interés	41
Figura 2.12. Índice SPI de cada una de las estaciones que conforman el Grupo 1 en la Región Centro de Argentina	42
Figura 2.13. Índice SPI de cada una de las estaciones que conforman el Grupo 2 en la Región Centro de Argentina	43
Figura 2.14. Índice SPI de cada una de las estaciones que conforman el Grupo 3 en la Región Centro de Argentina	43
Figura 2.15. Gráfico de los valores promedios del índice SPI de cada uno de los grupos de estaciones y sus respectivas componentes de baja frecuencia obtenidas a partir de la media móvil de 12 meses (líneas de puntos), en la Región Centro de Argentina. Grupo 1: Magenta, Grupo 2: Amarillo y Grupo 3: Verde	46
Figura 2.16. Ubicación de las estaciones pluviométricas en la cuenca del río Carcarañá.	49
Figura 2.17. Parámetros estadísticos calculados entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para estaciones en la cuenca del río Carcarañá	53
Figura 2.18. Precipitación mensual observada y obtenida a través de TRMM para la estación de Río Cuarto	53
Figura 2.19. Precipitación mensual observada y obtenida a través de TRMM para la estación de Cerro Blanco	54

Figura 2.20. Precipitación mensual observada y obtenida a través de TRMM para la estación de Lutti	54
Figura 2.21. Concordancia entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para la localización de la estación de Río Cuarto y su línea de tendencia.	55
Figura 2.22. Concordancia entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para la localización de la estación de Cerro Blanco y su línea de tendencia.	55
Figura 2.23. Concordancia entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para la localización de la estación de Lutti y su línea de tendencia	56
Figura 2.24. Concordancia, correlación y sesgo entre las series de precipitaciones observadas y obtenidas por el TRMM en las estaciones seleccionadas en la cuenca del río Carcarañá, ordenadas según su altura topográfica	57
Figura 2.25. Índice SPI calculado a partir de las series de precipitaciones observadas y obtenido con TRMM para la localización de Río Cuarto	57
Figura 2.26. Índice SPI calculado a partir de las series de precipitaciones observadas y obtenido con TRMM para la localización de Cerro Blanco	58
Figura 2.27. Índice SPI calculado a partir de las series de precipitaciones observadas y obtenido con TRMM para la localización de Lutti	58
Figura 2.28. Promedio de la precipitación mensual observada y obtenida a través de TRMM en la cuenca del río San Antonio	60
Figura 2.29. Precipitación mensual observada y obtenida a través de TRMM para la estación 1200 de la cuenca del río San Antonio	60
Figura 2.30. Concordancia entre las series promedio de precipitaciones observadas y obtenidas a través de TRMM de la cuenca del río San Antonio y su línea de tendencia	61
Figura 2.31. Concordancia entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para la estación 1200 de la cuenca del río San Antonio y su línea de tendencia	61
Figura 2.32. Índice SPI calculado a partir de las series promedio de precipitaciones observadas y obtenidas a través de TRMM en la cuenca del río San Antonio	62
Figura 3.1. Caudales medios mensuales de la estación Pueblo Andino en la cuenca del río Carcarañá	68
Figura 3.2. Valores del índice SDI (k1) de las series sintéticas del grupo 1 y la serie de referencia 10	71
Figura 3.3. Valores del índice SDI (k2) de las series sintéticas del grupo 1 y la serie de referencia 10	71
Figura 3.4. Valores del índice SDI (k3) de las series sintéticas del grupo 1 y la serie de referencia 10	72
Figura 3.5. Valores del índice SDI (k4) de las series sintéticas del grupo 1 y la serie de referencia 10.	72

Figura 3.6. Indicador del ajuste de los índices SDI (para el intervalo k3) de las series sintéticas correspondientes a los grupos 1, 4 y 7 respecto de la serie de referencia 10.	73
Figura 3.7. Índice SDI (k1) de las series sintéticas b de los grupos 1 (tendencia nula), 2 (tendencia positiva) y 3 (tendencia negativa).	74
Figura 3.8. Índice SDI (k2) de las series sintéticas b de los grupos 1 (tendencia nula), 2 (tendencia positiva) y 3 (tendencia negativa).	74
Figura 3.9. Índice SDI (k3) de las series sintéticas b de los grupos 1 (tendencia nula), 2 (tendencia positiva) y 3 (tendencia negativa).	75
Figura 3.10. Índice SDI (k4) de las series sintéticas b de los grupos 1 (tendencia nula), 2 (tendencia positiva) y 3 (tendencia negativa).	75
Figura 3.11. Indicador del ajuste de los índices SDI (para el intervalo k1) de la serie sintética 1c con la componente aleatoria modificada (10 veces) respecto de su serie de referencia	76
Figura 3.12. Indicador del ajuste de los índices SDI (para el intervalo k2) de la serie sintética 1c con la componente aleatoria modificada (10 veces) respecto de su serie de referencia	77
Figura 3.13. Indicador del ajuste de los índices SDI (para el intervalo k3) de la serie sintética 1c con la componente aleatoria modificada (10 veces) respecto de su serie de referencia	77
Figura 3.14. Indicador del ajuste de los índices SDI (para el intervalo k4) de la serie sintética 1c con la componente aleatoria modificada (10 veces) respecto de su serie de referencia	78
Figura 3.15. Índices SDI (k4) y su línea de tendencia en la estación Pueblo Andino de la cuenca del río Carcarañá. Período 1981-2013.	79
Figura 3.16. Índices SDI (k4) y su línea de tendencia en la estación Barrio El Canal de la cuenca del río San Antonio. Período 1998-2013	80
Figura 4.1. Esquema de las subcuencas de los ríos Tercero, Saladillo, y del arroyo Tortugas. Se indican las denominadas subcuencas Interior y Baja, en la cuenca del río Carcarañá.	83
Figura 4.2. Regiones de aporte denominadas: alta, media y baja (identificadas con los colores rojo, amarillo y verde, respectivamente) en la cuenca del río San Antonio.	83
Figura 4.3. Localización de los puntos denominados del 1 al 80 con datos estimados de precipitaciones (TRMM) y ubicaciones de las estaciones pluviométricas de Marcos Juárez y Río Cuarto y de la estación hidrométrica Pueblo Andino.	85
Figura 4.4. Localización de los puntos (80) con datos estimados de precipitaciones (TRMM) respecto de las subcuencas que integran la cuenca del río Carcarañá y clasificación de los mismos según el método estadístico de Conglomerados, identificados según los colores: Rojo, Azul, Amarillo, Verde y Gris	88

Figura 4.5. Clasificación de las estaciones con datos de precipitación en la cuenca del río San Antonio, según región de la cuenca: Alta, Media y Baja y por el método estadístico de Conglomerados identificados según los colores: amarillo, Azul y Rojo	90
Figura 4.6. Correlación entre los índices de sequías meteorológicas e hidrológicas: promedio anual SPI (12 meses) y SDI (k4), respectivamente, en la cuenca del río Carcarañá (1999-2010).	92
Figura 4.7. Correlación entre los índices de sequías meteorológicas e hidrológicas: promedio anual SPI (12 meses) y SDI (k4), respectivamente, en la cuenca del río San Antonio (1999-2010).	93
Figura 5.1. Índices SPI (12 meses) en la estación Río Cuarto. Período 1980-2009	96
Figura 5.2. Índice SPI (periodo 1943-2015) obtenida a partir de registros observados y estimados de TRMM, en la estación San Roque	97
Figura 5.3. Espectro de energía de las fluctuaciones obtenidas de la serie mensual de índices SPI correspondientes a la estación Río Cuarto	101
Figura 5.4. Índice SPI normalizado de estación Río Cuarto e indicador TSA con filtro pasa-banda entre 13-35 años	102
Figura 5.5. Índice SPI normalizado de estación Río Cuarto e indicador AMM con filtro pasa-banda entre 7-13 años	102
Figura 5.6. Índice SPI normalizado de est. Río Cuarto e indicador NIÑO 1+2 con filtro pasa-banda entre 13-35 años	103
Figura 5.7. Índice SPI normalizado de estación Río Cuarto e indicador SOI con filtro pasa-banda entre 13-35 años	103
Figura 5.8. Índice SPI normalizado de estación Río Cuarto e indicador MS con filtro pasa-banda entre 13-35 años	103
Figura 5.9. Espectro de energía de las fluctuaciones obtenidas de la serie de índices SDI (k4) correspondientes a la estación hidrométrica Pueblo Andino.	104
Figura 5.10. Índice SDI normalizado de est. Pueblo Andino e indicador TSA con filtro pasa-banda entre 7-13 años	105
Figura 5.11. Índice SDI normalizado de est. Pueblo Andino e indicador TSA con filtro pasa-banda entre 13-35 años	105
Figura 5.12. Índice SDI normalizado de est. Pueblo Andino e indicador AMM con filtro pasa-banda entre 7-13 años	106
Figura 5.13. Índice SDI normalizado de est. Pueblo Andino e indicador AMM con filtro pasa-banda entre 13-35 años	106
Figura 5.14. Índice SDI normalizado de est. Pueblo Andino e indicador MS con filtro pasa-banda entre 7-13 años	106

Figura 5.15. Espectro de energía de las fluctuaciones obtenidas de la serie mensual de índices SPI correspondientes a la estación San Roque	107
Figura 5.16. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador TSA con filtro pasa-banda entre 7-13 años	108
Figura 5.17. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador TSA con filtro pasa-banda entre 13-35 años	108
Figura 5.18. Índice SPI normalizado de est. San Roque e indicador AMM con filtro pasa-banda entre 13-35 años	109
Figura 5.19. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador ONI con filtro pasa-banda entre 7-13 años	109
Figura 5.20. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador SOI con filtro pasa-banda entre 7-13 años	109
Figura 5.21. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador MS con filtro pasa-banda entre 13-35 años	110
Figura 5.22. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador AAO con filtro pasa-banda entre 7-13 años	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Escalas de procesos hidrológicos	23
Tabla 2.2. Categorías de sequías según el índice PDI	27
Tabla 2.3. Valores característicos del índice estandarizado de precipitación (SPI)	28
Tabla 2.4. Matriz de frecuencia (%) de ocurrencia de sequías de distinto tipo (PDI) para cada mes del año en la cuenca alta del río Suquía (1943-1999)	34
Tabla 2.5. Estaciones pluviométricas seleccionadas en la Región Centro de la República Argentina	36
Tabla 2.6. Estadística descriptiva de las series de valores promedios del índice estandarizado de precipitación SPI de cada grupo de estaciones (1980-2009)	44
Tabla 2.7. Estadística descriptiva de las series de valores promedios del índice estandarizado de precipitación SPI de cada grupo de estaciones en los períodos 1980-1997 y 1998-2009	45
Tabla 2.8. Coordenadas y altura de las estaciones pluviométricas seleccionadas en la cuenca del río Carcarañá.	48
Tabla 2.9. Estaciones y características pertenecientes a la red telemétrica INA-CIRSA de la cuenca del río San Antonio.	49
Tabla 2.10. Número de meses sin datos completos en cada estación del INA- CIRSA y región a la que pertenecen (1998-2014)	50
Tabla 2.11. Parámetros estadísticos calculados entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para las mismas localizaciones en la cuenca del río Carcarañá.	52
Tabla 2.12. Coeficientes de Correlación (CC) entre las series de precipitaciones observadas y obtenidas por TRMM y entre sus respectivas series de índice SPI en tres localizaciones analizadas en la cuenca del río Carcarañá.	59
Tabla 2.13. Parámetros estadísticos calculados entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para la precipitación promedio y para la estación 1200 de la cuenca del río San Antonio.	60
Tabla 3.1. Valores del índice SDI según los distintos estados de sequía hidrológica	66
Tabla 3.2. Parámetros estadísticos de la serie de caudales medios mensuales de la estación Pueblo Andino	68
Tabla 3.3. Parámetros utilizados en las distintas componentes que conforman las series sintéticas de caudales mensuales (Q) para el caso de la estación de Pueblo Andino. Cuenca del río Carcarañá	68
Tabla 3.4. Frecuencias (%) de años con algún tipo de sequía hidrológica para el intervalo k4 del índice SDI	80

Tabla 4.1. Subcuencas de aporte del río Carcarañá. Superficies aproximadas y porcentajes respecto del total de la superficie de la cuenca	82
Tabla 4.2. Regiones de aporte de la cuenca del río San Antonio según la altitud	83
Tabla 4.3. Puntos con datos de precipitación (TRMM) agrupado por color (Conglomerados) en la cuenca del río Carcarañá	89
Tabla 4.4. Estaciones con datos de precipitación agrupadas por color (Conglomerados) en la cuenca del río San Antonio	91
Tabla 5.1. Características de las estaciones seleccionadas y de la información de las series utilizadas en la cuenca del río Carcarañá.	97
Tabla 5.2. Características de la estación y de la información de la serie utilizada en la cuenca alta del río Suquía	98
Tabla 5.3. Resumen de los indicadores macroclimáticos utilizados	98
Tabla 5.4. Coeficientes de correlación entre las series de índices SPI de la estación Río Cuarto y las series de los distintos indicadores macroclimáticos. Se destacan los valores de interés	102
Tabla 5.5. Coeficientes de correlación entre las series de índices SDI (k4) de la estación Pueblo Andino y las series de los distintos indicadores macroclimáticos. Se destacan los valores de interés	105
Tabla 5.6. Coeficientes de correlación entre las series de índices SPI de la estación San Roque y las series de los distintos indicadores macroclimáticos. Se destacan los valores de interés	108

CAPÍTULO 1

MARCO REFERENCIAL

1.1. INTRODUCCIÓN

La precipitación es la principal fuente de agua que posee el ser humano para su subsistencia y para una buena calidad de vida. La escasez de precipitaciones en un área durante un período de tiempo extenso constituye un proceso hidrológico extremo denominado “sequía”. Esta es una definición operacional que se puede implementar si la ocurrencia (o no) de las precipitaciones es caracterizada a través de parámetros representativos y comparados respecto de umbrales predeterminados, teniendo en cuenta las particularidades del área de interés. En la caracterización estadística de las sequías, generalmente más de una de sus variables son de importancia para asignar una probabilidad, tal como la ocurrencia, la duración y la intensidad (González y Valdés, 2004).

Las sequías se clasifican según la variable utilizada o el objetivo de estudio. Existen gran cantidad de clasificaciones, pero una de la más utilizada por su simplicidad y consistencia, es la realizada por Wilhite y Glantz (1985) que se incluye a continuación:

- Sequías Meteorológicas: Basadas en datos climáticos, es una expresión de la desviación de la precipitación respecto del valor promedio, durante un período de tiempo determinado.
- Sequías Agrícolas: Hace referencia a la insuficiencia de humedad en el suelo para permitir el normal desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento.
- Sequías Hidrológicas: Son aquellas en las que existe un déficit en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, embalse, lagos, etc.).
- Sequías Socio-económicas: Se producen cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños (económicos o personales) a la población de la zona afectada.

Esta clasificación es secuencial en el tiempo, es decir que un proceso iniciado a partir de la sequía meteorológica (como por ejemplo: una sequía hidrológica) no puede ocurrir sin haber ocurrido el o los tipos de sequías anteriores. Es posible proponer e incluir un tipo de sequía intermedio entre las sequías hidrológicas y socioeconómicas que se denomina aquí: Sequías Ambientales, las cuales contemplan la falta de agua en un ecosistema. Esto afectaría el normal desarrollo de las especies vegetales y animales pertenecientes al mismo, como así también sus interrelaciones naturales.

En cuanto a la escala temporal de estudio, la sequía meteorológica se basa en datos climáticos y generalmente se caracteriza en base a anomalías de las precipitaciones en un sitio específico y a partir del intervalo de tiempo de registro de los datos. Valiente (2001) indica que la sequía agrícola tiene lugar poco tiempo después de la meteorológica, mientras que la sequía hidrológica puede demorarse durante meses desde el inicio de la escasez pluviométrica o si la precipitación retorna en poco tiempo, no llegar a manifestarse. Por tanto, la secuencia temporal es: sequía meteorológica, a continuación sequía agrícola y luego sequía hidrológica. Es decir que, las sequías meteorológicas y agrícolas se pueden evaluar en distintas unidades de tiempo según el objetivo, aunque generalmente siempre son menores al año. Por otro lado, es conveniente estudiar las sequías hidrológicas y socio-económicas a nivel mensual o anual ya que sus efectos se observan con un desfase en el tiempo, respecto de los fenómenos hidrometeorológicos y físicos que le dan origen.

La delimitación espacial y temporal de las sequías es compleja. En cuanto a las escalas espaciales de estudio de las mismas se debe destacar que meteorológicamente, son un fenómeno de mesoescala; aunque el análisis en algunos casos (por ejemplo de las sequías hidrológicas) se realiza a nivel local, como por ejemplo en una sección hidrométrica, en un embalse o lago natural, en una cuenca o en un territorio con un conjunto poblacional.

A continuación se describe la problemática relacionada al fenómeno extremo de las sequías, lo que motiva el interés de estudiar la temática propuesta en la presente tesis.

1.2. PROBLEMÁTICA

Las sequías son eventos inevitables y todavía poco predecibles (Kim *et al.*, 2002) debido al comportamiento de los procesos hidrometeorológicos que las originan. La identificación y caracterización de eventos de sequía es una tarea compleja, debido a que son un fenómeno natural difícil de predecir (Tsakiris y Pangalou, 2009). Este fenómeno está lejos de ser un problema netamente meteorológico, sino que es un problema multidisciplinario que involucra no solo a la meteorología e hidrología, sino también a la geología y a otras ciencias geofísicas (Palmer, 1965). Además, todos los lugares del planeta están sujetos a la eventual ocurrencia de estos procesos, incluso las áreas típicamente lluviosas (Dracup *et al.*, 1980) y tienen importantes efectos negativos en los aspectos socio-económicos de una región (Vicario *et al.*, 2007).

El análisis de los períodos secos es requerido para realizar la planificación y manejo de los recursos hídricos en aquellas zonas donde gran parte de la actividad económica depende del aprovechamiento de esos recursos (Ortiz Gómez *et al.*, 2010).

Además, es necesario estudiar y analizar, para una mejor comprensión de los parámetros de la sequía, los umbrales específicos de estos procesos según la región hidroclimática (Mishra y Singh, 2010). Sin embargo, la ocurrencia y efectos de las sequías no son abruptas, sino que se desarrollan lentamente en el tiempo y en un espacio no definido claramente, lo que hace compleja su cuantificación y caracterización, y por ende, no favorece a la toma de decisiones sobre la gestión y planificación para mitigar las consecuencias de este fenómeno extremo. Wilhite (1997) señala que la decisión estatal de llevar a cabo medidas de planificación para la mitigación de los efectos de la sequía es bastante complejo y no puede explicarse adecuadamente sobre la base de la climatología solamente, sino que también debe basarse en condiciones políticas, económicas, ambientales y en factores demográficos.

Argentina es uno de los países con mayor porcentaje de áreas áridas del continente americano (UNESCO, 2010) y a su vez, a lo largo de su territorio existen diversos climas. Además posee un marcado ciclo húmedo y seco a nivel anual. Todo esto favorece la ocurrencia de fenómenos hidrológicos extremos de distinto tipo en distintas regiones y en el mismo período de tiempo. Lo anterior toma más relevancia si se considera que Argentina posee uno de los porcentajes más altos de urbanización a nivel de Latinoamérica (ONU, 2012). De tal manera que es propicio suponer que un gran número de habitantes de nuestro país está potencialmente expuesto a los fenómenos hídricos extremos. En el caso de las sequías, éstas afectan directamente, el abastecimiento de agua para consumo humano, la actividad agrícola-ganadera, la generación de energía hidroeléctrica, los ecosistemas, la calidad de vida y la salud humana, entre otros.

En este sentido, en la Región Centro de la República Argentina (región de estudio de esta tesis), es donde se encuentran algunas de las ciudades más importantes del país, además, dado el carácter agrícola-ganadero de la misma y su relevancia en la economía territorial es indispensable analizar las sequías en esa región ya que provocan importantes pérdidas económicas (Ravelo *et al.*, 2014). También, desde el punto de vista hidrológico y de la ingeniería, es esencial contar con estudios que permitan, de manera confiable, generar las obras de contención, distribución y tratamiento de los recursos hídricos involucrados ante la ocurrencia

de distintos tipos de sequías, como así también formular medidas no estructurales para mitigar los efectos de las mismas en una comunidad afectada y su entorno o ambiente.

1.3. ANTECEDENTES Y ÁREAS DE VACANCIA

Si bien existen antecedentes sobre aspectos y enfoques del fenómeno de las sequías alrededor del mundo y desde hace varias décadas (Keyantash y Dracup, 2002; Hao y AghaKouchak, 2013, entre otros) los estudios sobre la relación entre las variables hidrometeorológicas y distintos tipos de sequías son escasos aunque se destacan algunos relevantes en regiones pertenecientes a otros continentes como el europeo (Wong *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2015) o el asiático (Zhiyong *et al.*, 2015). Existen también otras regiones del mundo con antecedentes sobre el análisis de las sequías teniendo en cuenta las diferencias de las características a nivel espacial en una región y la evolución temporal dentro de un periodo determinado (España: Vicente-Serrano, 2006), como así también, trabajos sobre la relación entre la ocurrencia de sequías con procesos climáticos de distinta escala temporal (Australia: Chiew y McMahon, 2002; Atlántico Norte: Kushnir *et al.*, 2010). Sin embargo, en Latinoamérica, generalmente los estudios de sequías se desarrollan sobre un único enfoque tal como el climático (Santos, 2011; Rivera, 2014), agrícola (Blain, 2012; Carrão *et al.*, 2013) o hidrológico (Wagner Gómez *et al.*, 2012), siendo escasos los estudios sobre la relación entre los distintos tipos de sequías y los procesos involucrados en los mismos.

En Argentina, los antecedentes relacionados a la sequías tienen, predominantemente, un enfoque climático y agrícola (Scian y Donnari, 1997; Hartmann *et al.*, 2003; Havrylenko *et al.*, 2013) o bien, forman parte de un estudio con otros ejes temáticos (Scarpati y Capriolo, 2013). En la región pampeana de Argentina, es posible observar trabajos de sequías meteorológicas con la finalidad de obtener resultados útiles para la actividad socioeconómica (Ravelo, 2000) o principalmente locales, donde se analizan periodos cortos de tiempo (D'Ambrosio *et al.*, 2013) o que finalizan en décadas anteriores (Carbone y Píccolo, 2004). Específicamente en la Región Centro, los antecedentes sobre las sequías hidrológicas tales como el trabajo realizado por Díaz (2016) o sobre la relación entre distintos tipos de sequías, son escasos. Para avanzar y profundizar el análisis sobre este fenómeno crítico extremo con características complejas de definir y debido a la precariedad de información en el área de interés, existen obstáculos y limitaciones que requieren de un esfuerzo mayor interdisciplinario.

Por lo anteriormente expuesto se considera necesario e indispensable avanzar en el área de conocimiento sobre las sequías de manera integral y en cuencas de una región de interés dentro del territorio nacional; de tal manera de conformar un antecedente tanto en el uso de la información existente como de la temática de las sequías. De esta forma se constituye el punto de partida para futuros estudios y para la aplicación de nuevas metodologías que permitan en un mediano plazo mejorar las estimaciones y los conocimientos respecto del tema, sobre todo en zonas con escasa información hidrológica histórica.

A partir de los antecedentes mencionados previamente y los particulares referidos a lo largo del presente documento, dentro de la región de estudio se destaca un área de vacancia general en relación a la identificación y evaluación de distintos procesos relacionados a las sequías en cuencas de la Región Centro de Argentina. Además, de manera específica se han detectado las siguientes áreas de vacancia:

- Identificación y caracterización de las sequías meteorológicas en distintas escalas espaciales
- Evaluación del uso de información provista por sensores remotos para mejorar la densidad de información y favorecer la caracterización de sequías meteorológicas en las cuencas de mayor tamaño.
- Evaluación de aptitudes de índices representativos de sequías hidrológicas.
- Identificación y caracterización de las sequías hidrológicas en distintas escalas espaciales
- Evaluación de la relación entre las variables e índices representativos de sequías meteorológicas e hidrológicas para cuencas con distintas escalas espaciales y utilizando distintos pasos de tiempo.
- Identificación de periodicidades plurianuales en las series temporales de índices representativos de sequías meteorológicas e hidrológicas, y su comparación con periodicidades de indicadores macro-climáticos.

Para cubrir las áreas de vacancia mencionadas anteriormente se definieron los objetivos generales y específicos de esta tesis los cuales se detallan en el siguiente apartado.

1.4. OBJETIVOS

Esta tesis se focaliza en producir avances en el conocimiento para la identificación y evaluación de las sequías meteorológicas e hidrológicas, observando la evolución temporal y la variabilidad espacial de las mismas en tres cuencas seleccionadas de distintas características y tamaño dentro de la región Centro de la República Argentina, utilizando información de superficie, de sensores remotos y series sintéticas ya sea para validar o aplicar metodologías acordes a cada eje temático. En ese marco se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y caracterizar las sequías meteorológicas en distintas escalas espaciales tomando como motivación, en primera instancia una cuenca serrana cuyo estudio se llevó a cabo en la Tesis de Maestría de la autora, para luego realizar el análisis a nivel regional y finalizar, utilizando información provista por sensores remotos para mejorar la densidad de información de superficie y favorecer la caracterización del fenómeno de las sequías meteorológicas en dos cuencas, una de gran tamaño y con la mayor parte de su superficie en llanura y otra de pequeño tamaño en zona serrana.
- Evaluar las aptitudes de un índice representativo de las sequías hidrológicas, con la finalidad de identificar y caracterizar las sequías de este tipo en dos cuencas de distintas características y tamaño, previamente utilizadas para el análisis de sequías meteorológicas.
- Evaluar la relación entre las variables e índices representativos de sequías meteorológicas e hidrológicas, en las dos cuencas utilizadas para llevar a cabo los objetivos previos, además utilizando pasos de tiempo diferentes en el análisis.
- Identificar periodicidades plurianuales en las series temporales de índices representativos de sequías meteorológicas e hidrológicas en dos cuencas de distintas características y tamaño, con la finalidad de identificar frecuencias relevantes de las fluctuaciones de dichas series para observar la existencia (o no) de indicios acerca de los posibles fenómenos macroclimáticos a los que pudieran estar relacionados.

1.5. REGIÓN DE ESTUDIO

En este apartado primero se presenta una descripción general de la Región Centro de Argentina donde se ubican las tres cuencas de estudio y luego se describe cada una de ellas. La Región Centro de la República Argentina es una conformación política constituida por las provincias de Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos. Esta conformación política se llevó a cabo a través del tratado de Integración Regional firmado en agosto de 1998 donde el Artículo 1 del mismo, anuncia: “Crear la Región Centro de la Argentina integrada por las Provincias de Córdoba y Santa Fe con el fin de promover el desarrollo económico y social en virtud de lo establecido en el Art. 124 de la Constitución Nacional y el desarrollo humano, la salud, la educación, la ciencia, el conocimiento y la cultura de conformidad a lo estipulado en el Art. 125 de la referida Ley Suprema de la Nación”. Luego, en el mes de abril de 1999 se incluye a la provincia de Entre Ríos en este tratado. Esta región cuenta con alrededor de 8 millones de habitantes (alrededor de un 20% de la población nacional) y la integración responde a los intereses económicos, sociales, educativos y culturales, entre otros, comunes a las provincias que la conforman. En la Figura 1.1 se muestran las distintas regiones políticas en la República Argentina.

Estas provincias constituyen un área de gran importancia socio-económica ya que concentran un gran porcentaje de la población del territorio nacional, además de ser un polo agrícola-ganadero e industrial dentro del país, se desarrollan otras actividades productivas de envergadura. La Región Centro posee distintas características, pero resumiendo la información presentada en sitios web oficiales de cada una de las provincias y de organismos nacionales, se puede destacar que el clima es principalmente templado (Figuras 1.2) y posee una marcada estacionalidad anual de temperaturas con periodos fríos y cálidos, representados por los meses julio y enero, respectivamente en la Figura 1.3. El régimen anual de precipitaciones aumenta de oeste a este con valores promedios que van desde los 600 mm a 1200 mm, aproximadamente (Figura 1.4).

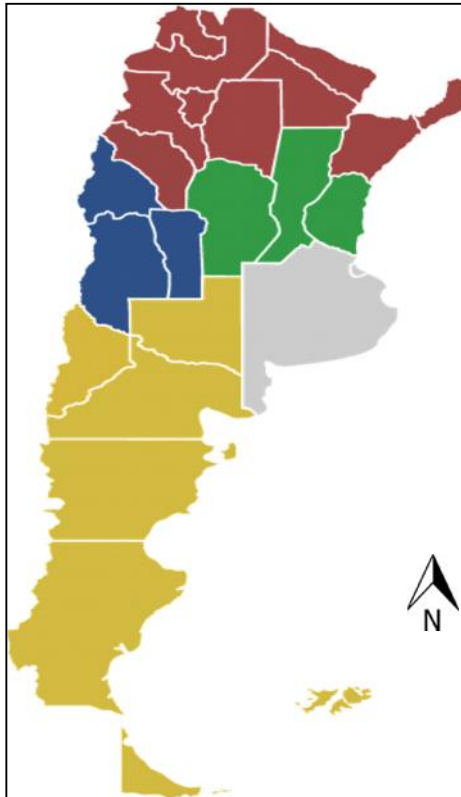


Figura 1.1. Mapa regional de Argentina: Color rojo: Región del Norte, color verde: Región Centro, color azul: Región del Nuevo Cuyo, color amarillo: Región Patagónica y color gris: provincia de Buenos Aires. Fuente: Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. (Sitio web: <http://www.mininterior.gov.ar/provincias/regiones.php>)



Figura 1.2. Mapa climático de Argentina. Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Se destaca la Región Centro. (Sitio web: <http://www.ign.gov.ar>)

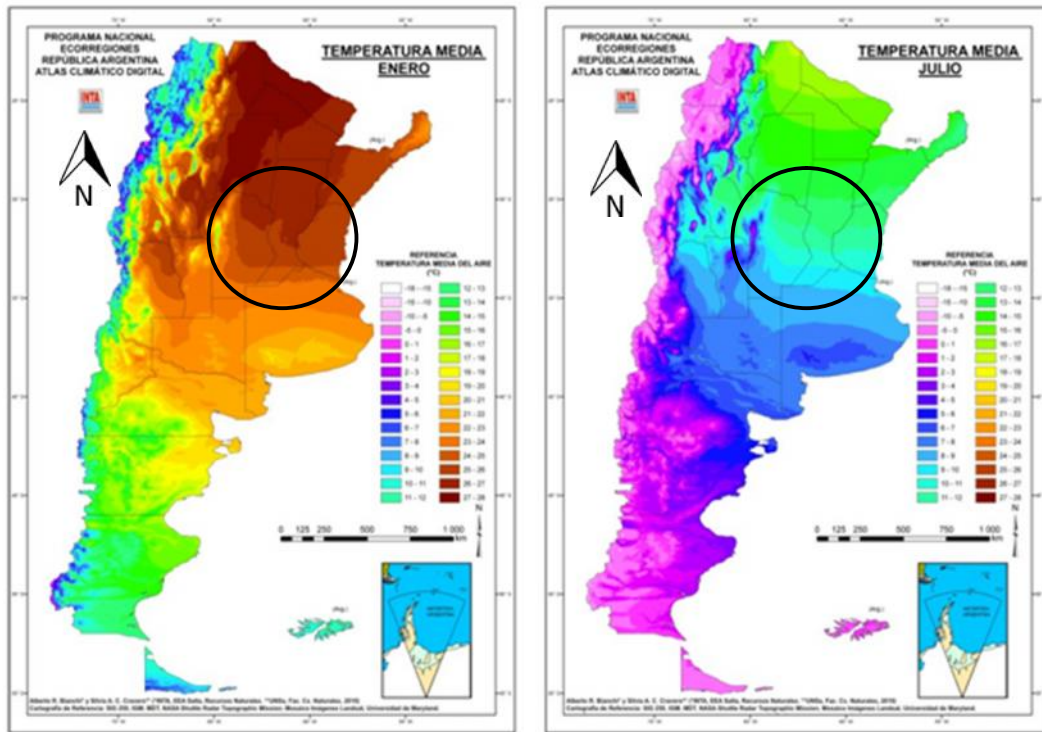


Figura 1.3. Mapas de temperaturas medias mensuales del mes más cálido (enero) y del más frío (julio) de Argentina. Se destaca la Región Centro. Fuente: Bianchi y Cravero, 2010

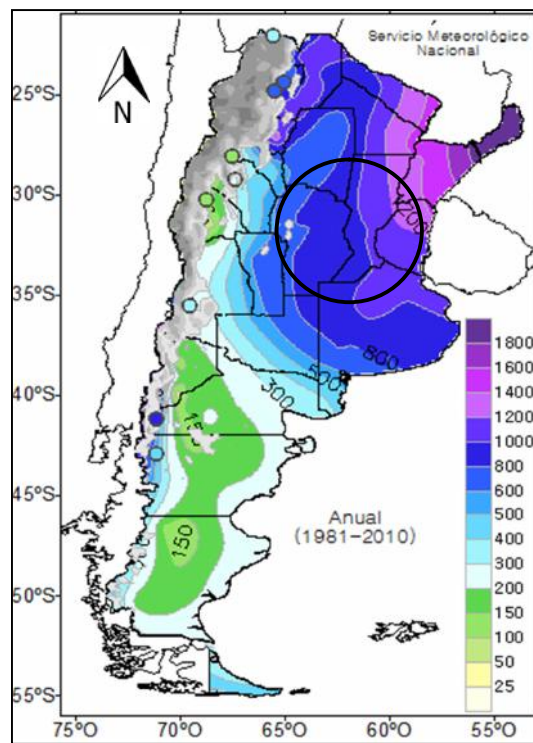


Figura 1.4. Mapa de precipitaciones medias anuales de Argentina. Se destaca la Región Centro. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Sitio web: <http://www.smn.gov.ar>)

Además de las generalidades antes mencionadas, se debe tener en cuenta la variabilidad existente en distintas zonas de la región. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) presenta gráficamente la información de temperatura y precipitación media mensual para las principales localidades del país. En este caso se seleccionan, a modo representativo, las figuras correspondientes a una ciudad relevante de cada provincia: Córdoba perteneciente a la provincia homónima (Figura 1.5), Rosario de la provincia de Santa Fe (Figura 1.6) y Paraná de la provincia de Entre Ríos (Figura 1.7). Es posible observar un leve incremento de las temperaturas (máximas, medias y mínimas) hacia el este de la región, como así también una estacionalidad de las características de precipitaciones más significativa en la provincia de Córdoba, respecto de las estaciones de Rosario y Paraná.

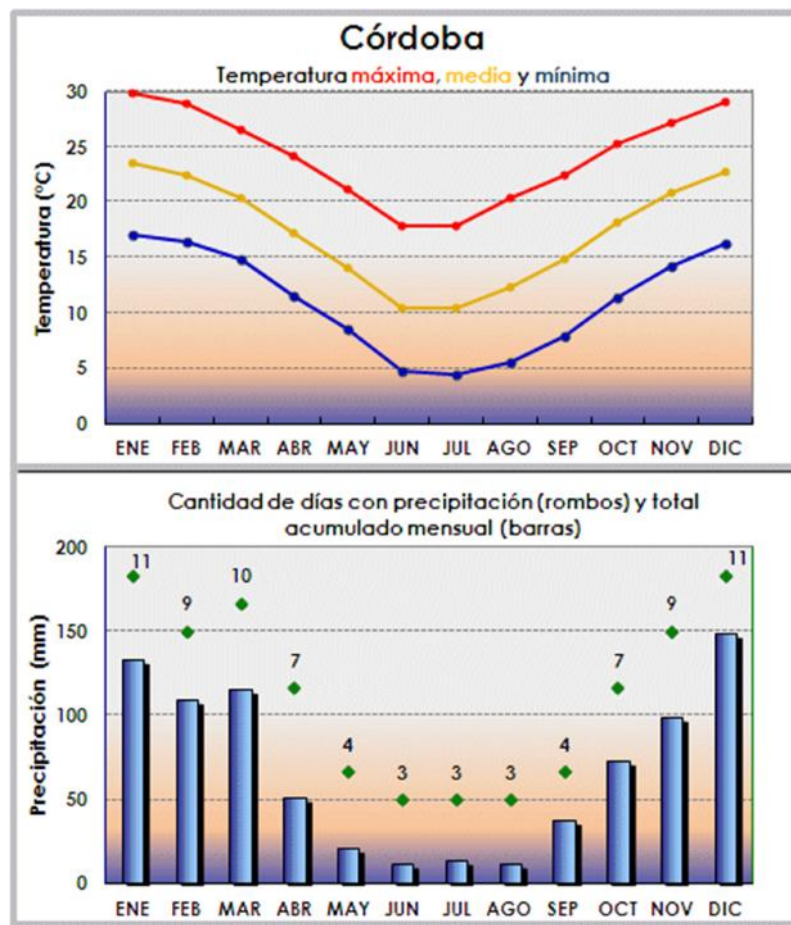


Figura 1.5. Gráfico superior: temperaturas máximas medias (rojo), medias (amarillo) y mínimas medias (azul). Gráfico inferior: cantidad de días con precipitación mayor o igual a 0,1 mm 1 mm (rombos verdes) y el total

acumulado de precipitación mensual (barras azules), para el período 1961-1990, en la ciudad de Córdoba, provincia de Córdoba. Fuente: SMN

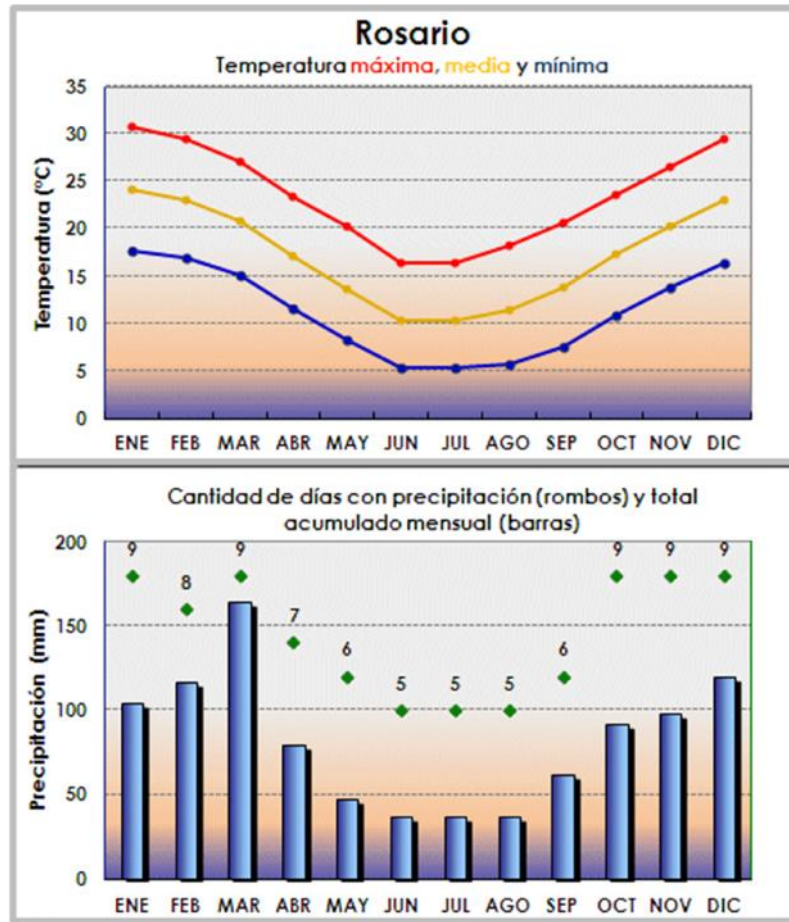


Figura 1.6. Gráfico superior: temperaturas máximas medias (rojo), medias (amarillo) y mínimas medias (azul). Gráfico inferior: cantidad de días con precipitación mayor o igual a 0,1 mm 1 mm (rombos verdes) y el total acumulado de precipitación mensual (barras azules), para el período 1961-1990, en la ciudad de Rosario, provincia de Santa Fe. Fuente: SMN

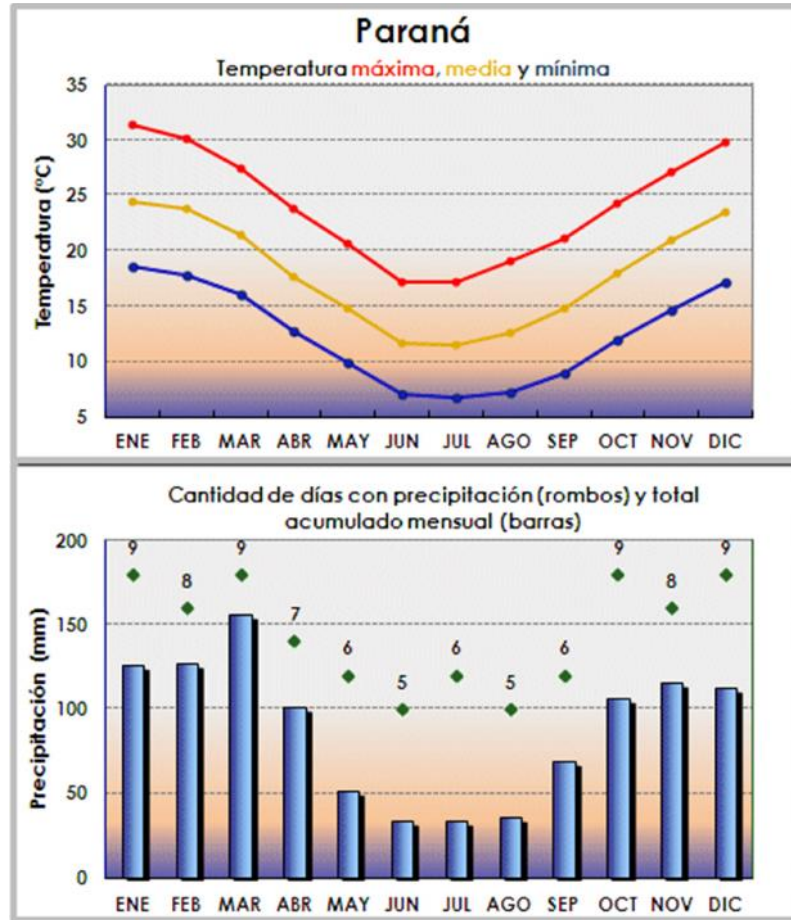


Figura 1.7. Gráfico superior: temperaturas máximas medias (rojo), medias (amarillo) y mínimas medias (azul), Gráfico inferior: cantidad de días con precipitación mayor o igual a 0,1 mm 1 mm (rombos verdes) y el total acumulado de precipitación mensual (barras azules), para el período 1961-1990, en la ciudad de Paraná, provincia de Entre Ríos.. Fuente: SMN

También existe una gran diversidad geomorfológica, topográfica, de flora, fauna y recursos hídricos entre otras cosas. Debido a esta variabilidad y diversidad de factores es posible considerar que la región de estudio presenta, de manera recurrente, eventos y procesos relacionados a los fenómenos extremos, tales como las sequías de distinto tipo.

En una de las secciones de esta tesis se estudia la Región Centro en un análisis hidrometeorológico regional que abarca las tres provincias que la conforman. Sin embargo, una gran porción de esta tesis se focaliza solo en tres cuencas seleccionadas de esta Región que poseen diferentes características, fundamentalmente en lo que se refiere al tipo de unidad hidrográfica y tamaño. Dos de las cuencas de menor tamaño se encuentran localizadas en la región serrana de la provincia de Córdoba, denominadas cuenca alta del río Suquía y cuenca del río San Antonio; mientras que la otra cuenca denominada del río Carcarañá se desarrolla principalmente dentro de la zona de llanura de las provincias de Córdoba y Santa Fe.

Según la delimitación de las cuencas hídricas de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) mostrada en la Figura 1.8, la cuenca alta del río Suquía y la perteneciente a uno de sus principales tributarios, el río San Antonio, corresponden al sistema serrano denominado con el número 91, mientras que la cuenca del río Carcarañá pertenece al sistema del río Paraná y abarca todo el contorno identificado con el número 31.

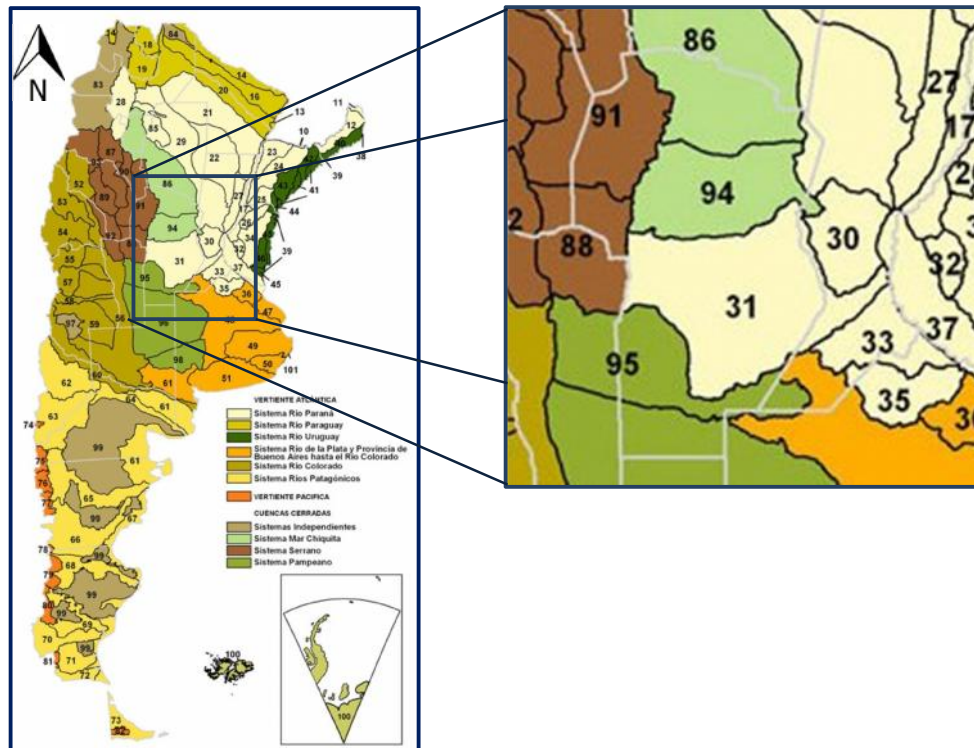


Figura 1.8. Mapa de cuencas y regiones hídricas superficiales de la República Argentina y ampliación de la región de interés. Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (Sitio web: www.hidricosargentina.gov.ar)

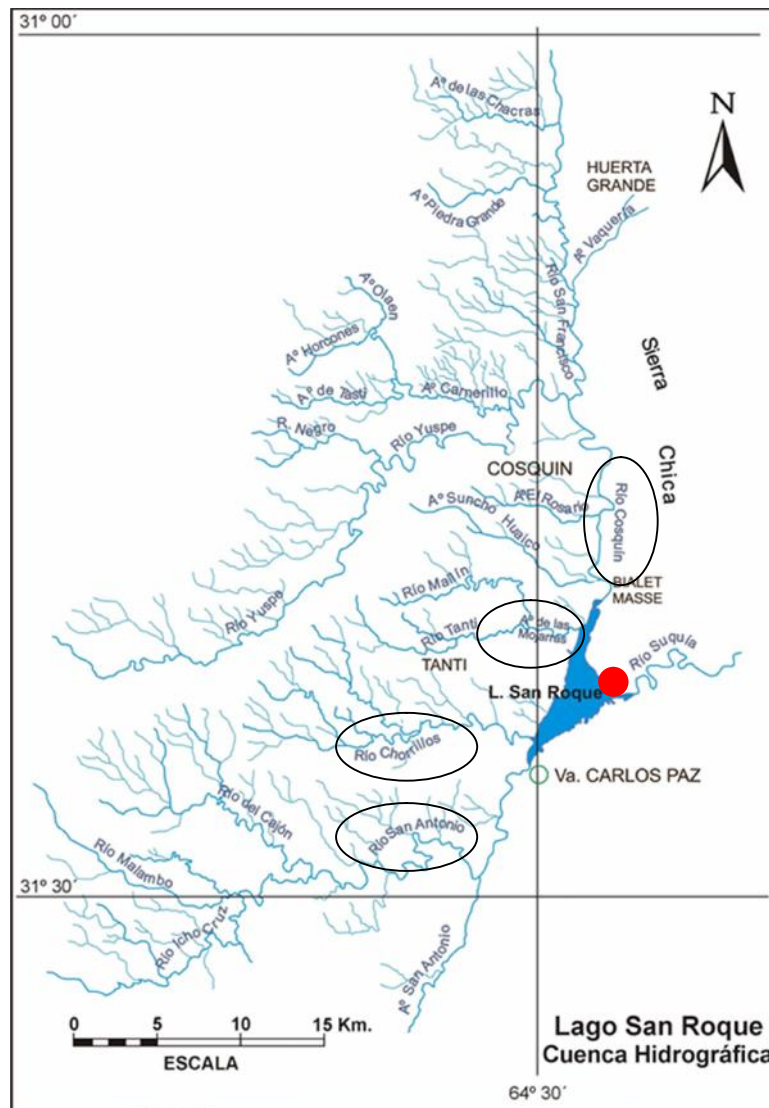


Figura 1.10. Cuenca hidrográfica alta del río Suquia. Se marcan los principales tributarios y la estación pluviométrica San Roque (marca roja)

La importancia del sistema que conforman la cuenca alta del río Suquia y la obra hidráulica del dique San Roque radica en sus objetivos múltiples; entre los que se destacan: el abastecimiento de agua potable a la zona norte de la ciudad de Córdoba, siendo ésta una de las principales ciudades del país; la contención de crecidas en periodos de excesos hídricos, la generación hidroeléctrica y la provisión de agua para riego a la región, además cabe destacar el permanente desarrollo de la actividad turística en la cuenca. Con las demandas mencionadas, la gestión integrada del recurso hídrico es fundamental y para ello es importante caracterizar los periodos de sequías.

1.5.2. Descripción de la cuenca del río San Antonio

Otra de las cuencas estudiadas (la de menor extensión) es la cuenca del río San Antonio, uno de los principales tributarios en la cuenca alta del río Suquía (Figura 1.10). Posee una superficie que ronda los 550 km², y cuyo cauce principal posee una longitud de aproximadamente 46 km tributando al lago San Roque por el extremo sur del mismo, con un módulo que ronda los 4 m³/s. El río San Antonio nace de la confluencia de los ríos Cajón, Malambo, Icho Cruz y el arroyo San Antonio. Se define como una cuenca serrana, ya que se encuentra emplazada en un cordón montañoso de las sierras de Córdoba, está conformada principalmente por granito y rocas metamórficas del tipo Gneis y posee una notable variación de la pendiente desde sus nacientes hasta el punto de salida. La cuenca del río San Antonio conforma una unidad experimental del Instituto Nacional del Agua (INA) a través de su delegación en la provincia de Córdoba: Centro de la Región Semiárida (CIRSA). Dicha cuenca posee su cierre en la estación 600 en Barrio El Canal y está equipada hace más de dos décadas, con la red telemétrica perteneciente a la mencionada institución, que mide diferentes variables hidrometeorológicas. En la Figura 1.11 se muestra la cuenca de estudio y los puntos de medición pertenecientes a la red telemétrica mencionada.

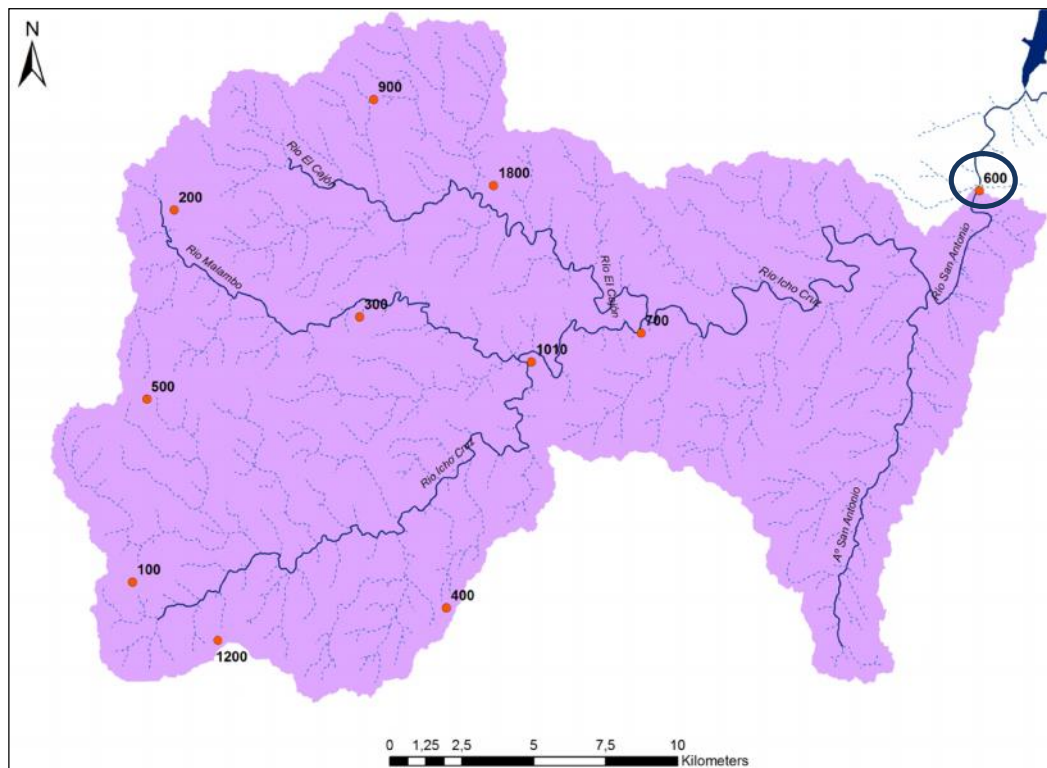


Figura 1.11: Cuenca del Río San Antonio. Puntos rojos: puestos de medición utilizados de la red telemétrica del INA-CIRSA, círculo azul: sección hidrométrica N° 600: Barrio El Canal. Fuente: INA-CIRSA

1.5.3. Descripción de la cuenca del río Carcarañá

Otra parte de los estudios se desarrollan en la cuenca del río Carcarañá, localizada en el centro-sudeste de la provincia de Córdoba y luego atraviesa el sur de la provincia de Santa Fe para desembocar en el río Paraná (Figura 1.12). El río Carcarañá drena un área de 48150 km², según información oficial (SSRH) en base a datos de décadas pasadas, aunque con técnicas de mediciones avanzadas se observó que la superficie abarca aproximadamente 60000 km² (nuevos estudios se están desarrollando para la cuantificación precisa), es decir que posee una superficie superior en órdenes de magnitud respecto a las cuencas mencionadas anteriormente. Esta cuenca posee dos grandes subcuencas, las mismas pertenecen a los ríos Tercero (o Ctalamochita) y Saladillo. La subcuenca del río Tercero, uno de los principales tributarios del río Carcarañá, constituye un sistema de alimentación pluvial con régimen permanente. Sus principales afluentes son, enunciados de norte a sur: el río Santa Rosa, arroyo Amboy, río Grande, río Quillínz y río de La Cruz o de los Sauces. Los de mayor recorrido son el Grande, el Santa Rosa y el de la Cruz, de los cuáles el primero es el tributario más importante y está conformado por los arroyos Durazno, Manzano y las Letanías. La subcuenca del río Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto o Chocancharava), otro de los tributarios principales de la cuenca del Carcarañá, tiene como principales afluentes a los ríos de las Barrancas, San Bartolomé, de la Tapa y Piedra Blanca. El río Cuarto, desde su nacimiento se dirige hacia el sudeste pasando por la localidad de Río Cuarto (Córdoba), ubicada sobre su margen derecha. Ambos tributarios (Tercero y Saladillo) confluyen en cercanías de la localidad de Monte Buey, dentro de la provincia de Córdoba, continuando su curso con el nombre de río Carcarañá. Algunos arroyos que se encuentran entre los ríos Tercero y Saladillo escurren en dirección oeste-este y son de carácter arreicos. Uno de los arroyos de mayor importancia en la cuenca baja del río Carcarañá es el Tortugas. Este arroyo fue canalizado para transportar el agua proveniente de desagües pluviales urbanos y del escurrimiento superficial en campos de una amplia región centro-este de la provincia de Córdoba y del oeste de la provincia de Santa Fe. Observaciones realizadas por Díaz Lozada *et al.* (2015) muestran que este arroyo puede ser en algunos periodos el principal tributario de caudal.

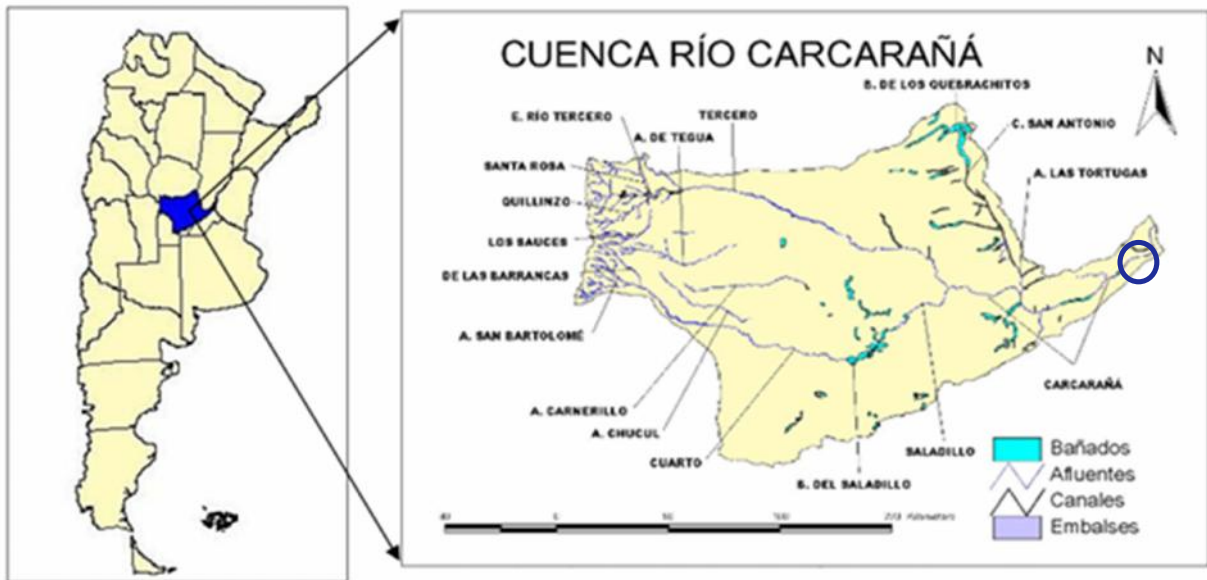


Figura 1.12: Ubicación de la cuenca del río Carcarañá y de la sección hidrométrica de Pueblo Andino en un círculo azul. Fuente: “Atlas digital de los recursos hídricos superficiales de la República Argentina”. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (Sitio web: www.hidricosargentina.gov.ar)

1.6. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Para alcanzar los objetivos de la presente tesis se han desarrollado los respectivos capítulos abordando cada eje temático relacionado a las sequías y a las áreas de vacancias detectadas. Las metodologías de trabajo se describen en detalle en cada capítulo. Así, luego del presente Capítulo 1 (Marco referencial) se desarrolla el Capítulo 2 denominado “Identificación y caracterización de sequías meteorológicas en distintas escalas espaciales”, en el cual se analizan tres tópicos principales. En una primera etapa se estudian las sequías meteorológicas en una localización determinada de la cuenca alta del río Suquía. En esta primera etapa se evalúan y comparan dos índices para caracterizar sequías meteorológicas. Utilizando el índice más representativo, se elabora una matriz de frecuencias de sequías en la localización seleccionada. Luego de realizar un análisis local, el segundo tópico de este capítulo está relacionado al desarrollo de un estudio regional de sequías meteorológicas en la Región Centro de la Argentina utilizando estaciones meteorológicas localizadas en una extensión superior a los 10.000km². Finalmente, para estudiar la evolución espacial de las sequías meteorológicas en regiones con escasez de registros históricos de precipitación (como es habitual en la región de estudio), se valida el uso de datos de precipitaciones estimadas a partir de sensores remotos en la cuenca de estudio con mayor extensión, la cuenca del Río Carcarañá.

En el Capítulo 3 denominado “Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en distintas escalas espaciales”, en primer lugar se valida un índice disponible para evaluar sequías hidrológicas utilizando series sintéticas de caudales medios mensuales generadas en esta tesis que incluyen variabilidad generada por procesos con distintas escalas temporales. Luego, a través del índice validado se caracterizan las sequías hidrológicas en dos cuencas de distinto tamaño.

En el Capítulo 4 denominado “Relación entre las variables e índices representativos de sequías meteorológicas e hidrológicas”, se evalúa la relación entre variables representativas de los procesos incluidos en los mencionados tipos de sequías, como lo son la precipitación y el caudal, en dos cuencas con diferentes características dentro de la Región Centro de Argentina. También, en este capítulo se analiza la correlación entre índices representativos de sequías meteorológicas e hidrológicas, respectivamente, en las mismas cuencas.

En el Capítulo 5 denominado “Identificación de periodicidades plurianuales en las series temporales de índices representativos de sequías meteorológicas e hidrológicas”, se analizan las frecuencias características de las fluctuaciones presentes en las series temporales de índices representativos de sequías meteorológicas e hidrológicas utilizadas a lo largo de esta tesis para luego compararlas con las frecuencias relacionadas a procesos macroclimáticos.

En el Capítulo 6: “Conclusiones y recomendaciones”, se sintetizan las principales conclusiones y se expresan algunas recomendaciones en base a lo observado durante el desarrollo del trabajo. Por último en el Capítulo 7 se enumeran las Referencias utilizadas en la presente tesis.

CAPÍTULO 2

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN DISTINTAS ESCALAS ESPACIALES

2.1. INTRODUCCIÓN

Existen varias definiciones de sequía meteorológica, algunas más generales, por ejemplo Palmer (1965) señala la sequía meteorológica como un intervalo de tiempo durante el cual el aporte de humedad está por debajo de lo climatológicamente esperado; y se encuentran otras expresiones más precisas según el lugar donde se estudie dicho fenómeno, que se basan en la determinación de un intervalo específico de tiempo y un valor de la cantidad precipitada, tal como el caso de Gran Bretaña (Goudie, 1985), o según porcentajes de reducción de la precipitación respecto de su media anual como fue planteado por Olcina (1994) para distintos lugares de España, entre otros. Según Wilhite y Glantz (1985), la sequía meteorológica es aquella basada en datos climáticos y es una expresión de la desviación de la precipitación, respecto del valor promedio durante un período de tiempo determinado. En este caso, el autor se basa en parámetros estadísticos como referencia para formular dicha definición.

Los diferentes procesos que actúan sobre el medio natural involucran diferentes escalas relacionadas con el tiempo y el espacio. Respecto de las escalas temporales, Tucci (2002) caracteriza la variabilidad temporal de los procesos hidroclimáticos, como:

- Variabilidades de corto plazo a aquellas que ocurren en el tiempo asociado a los eventos lluviosos y a sus efectos (duración de minutos, horas o pocos días).
- Variabilidades estacionales asociadas a la ocurrencia de periodos húmedos y secos dentro de un año.
- Variabilidad interanual de corto plazo donde se consideran procesos de pocos años (por ejemplo: dos a tres años).
- Variabilidad decádica donde se consideran los procesos de decenas de años.

En esta tesis el análisis de la evolución temporal de las sequías se realiza teniendo en cuenta variabilidades con tiempos característicos mayores a un año (las últimas dos mencionadas en el párrafo anterior)

Becker y Nemeč (1987) presentaron una clasificación de las escalas espaciales de distintos procesos hidrológicos definiéndolas como micro, meso o macro escalas y sus transiciones, según la superficie estimada. Luego, en trabajos posteriores se utiliza una síntesis de la información, la cual se presenta en la Tabla 2.1.

Se puede considerar que a nivel de microescala espacial y su transición se desarrollan los procesos hidrológicos elementales; Tucci (2002) indica que éstos se asocian al escurrimiento a nivel de vertientes (cuencas muy pequeñas, generalmente sin datos o registros). Mientras que en niveles de meso y macro escalas se desarrollan los procesos hidrológicos que son relevantes en los estudios de balances hídricos en áreas o cuencas de tamaños considerables y en grandes superficies (hasta regionales, continentales, etc.), respectivamente. Generalmente, a nivel de mesoescala el interés se centra en el abastecimiento de agua para consumo y riego; y las cuencas de macroescala y su transición desde la mesoescala se asocian al uso de generación hidroeléctrica de envergadura o actividades que involucran más de una región o territorio según la división política.

Tabla 2.1. Escalas de procesos hidrológicos (Becker, 1992)

Escala	Dimensión (km ²)
Macro	>10 ⁴
Transición α	10 ³ - 10 ⁴
Meso	10 - 10 ³
Transición γ	10 ⁴ - 10
Micro	<10 ⁴

En este capítulo se identifican y caracterizan sequías meteorológicas en escalas espaciales diferentes. En primera instancia se utiliza una cuenca de transición de meso a macroescala tal como la cuenca alta del río Suquía (con una extensión aproximada de 1750 km²). En esta tesis se extiende un trabajo previo de la autora, con datos de precipitaciones medias mensuales de una única estación denominada San Roque para el periodo 1943-1999 (Vicario, 2008). Luego se realiza el estudio de sequías meteorológicas a macroescala (nivel regional, en el área central de Argentina) con el análisis de información pluviométrica de estaciones de superficie en periodos comunes de tiempo (1980-2009) pertenecientes a tres provincias: Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos. Finalmente, y debido a la escasez de estaciones de superficie con registros hidrometeorológicos útiles para la finalidad del estudio, se estudió la factibilidad de usar datos de precipitaciones obtenidos a través del análisis de datos generados a partir de sensoramiento remoto, en una cuenca de macroescala espacial de dicha región, como lo es la cuenca del río Carcarañá, cuya superficie es de aproximadamente, 60000 km², para el periodo de datos registrados que abarca desde 1998 hasta el 2015.

2.2. ESTUDIO LOCAL DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO SUQUÍA

2.2.1. Introducción

En esta sección se presenta el estudio de sequías meteorológicas en una localización determinada de la cuenca alta del río Suquía (Figura 1.10). Los principales resultados obtenidos en esta sección, que extiende el análisis básico realizado por la autora en la elaboración de su tesis de maestría, constituyeron la motivación a partir del cual se decidió ampliar y profundizar el estudio de sequías en el resto de la tesis.

2.2.2. Información utilizada

2.2.2.1. Datos pluviométricos

En la búsqueda de antecedentes y registros se observó una notable escasez de datos pluviométricos a nivel de cuenca, tanto en longitud de la serie como en densidad de puntos con información. Por lo que, y tal como justifica Vicario (2008) fue necesario seleccionar un criterio para la elección de la información por lo que se decidió trabajar con la serie de precipitaciones mensuales de la estación San Roque que se localiza en la zona del perillago, perteneciente a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba (Figura 1.7). Si bien, se obtuvieron series de datos de las subcuencas de los ríos San Antonio y Cosquín, éstas presentaban amplios períodos rellenos debido a la falta de información, mientras que la serie de la estación San Roque sólo tiene un 1,2 % de datos faltantes. En dicho trabajo se determinó, además que la incertidumbre derivada del uso de datos de solo una estación pluviométrica representativa de la cuenca, en este caso de la estación San Roque es comparable a la incertidumbre asociada a la falta de información durante períodos prolongados y con una distribución de puntos de medición de precipitaciones, altamente escasa dentro del área de estudio. Además, se tiene en cuenta que la serie de la estación San Roque tiene 57 años de registros y se extiende hasta 1999 (Figura 2.1), siendo la serie con mayor longitud de datos observados. También se consideró que en una cuenca a nivel de mesoescala, como es el caso de la cuenca en estudio, las variaciones en la cantidad de lluvia precipitada en el mismo instante de tiempo y en toda la superficie involucrada, pueden ser muy diferentes. Por lo tanto, el promedio de precipitaciones en la totalidad de la cuenca y en una unidad de tiempo, no dista demasiado del valor promedio de la precipitación registrada en una subcuenca del sistema, en la misma unidad

de tiempo. Esto es posible por las características del clima en la provincia de Córdoba, donde la mayor cantidad de las tormentas ocurren en verano y son del tipo convectivas (Lucero, 1998), es decir que solo abarcan una pequeña área (del orden del km^2) y tienen una intensidad alta. A su vez se comparó el comportamiento de los datos mensuales de precipitación de la estación San Roque y de la precipitación areal de la cuenca del dique San Roque (en un periodo corto) y se observó que son prácticamente paralelas, al igual que sus respectivas líneas de tendencia lineal. Luego los datos faltantes fueron rellenados con parámetros estadísticos propios de cada mes.

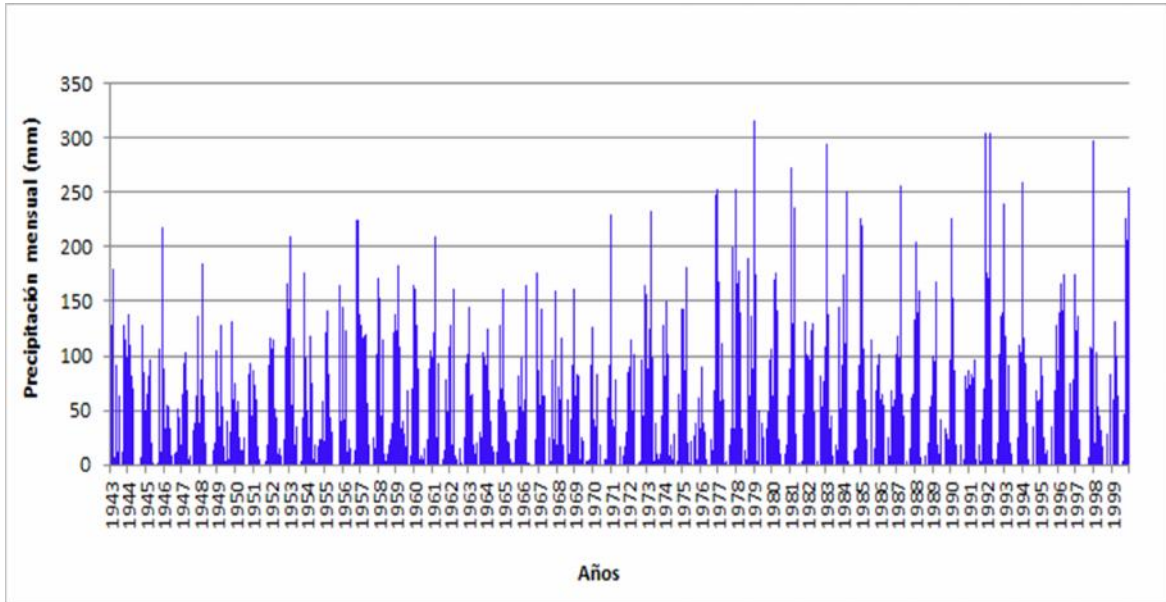


Figura 2.1. Precipitaciones mensuales de la estación San Roque. (1943-1999)

2.2.2.2. Datos de evapotranspiración potencial

Esta información complementaria es requerida para la determinación de uno de los índices utilizados en esta sección. Si bien no existen observaciones instrumentales de la evapotranspiración en la cuenca alta del río Suquía, se analizaron las estimaciones de dicha variable obtenidas de distintas fuentes de información. La evapotranspiración potencial se define, según Thornthwaite (1948), como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, que se desarrolla en óptimas condiciones y sin limitaciones en la disponibilidad de agua. Los valores de la evapotranspiración potencial surgieron de promediar los datos históricos de esta variable en la ciudad de Córdoba, cuya distancia al dique San Roque es de aproximadamente, 40 km y los datos en la cuenca del embalse Los Molinos, que dista alrededor de 60 km, respecto del mismo. Es decir, que el criterio

adoptado para la estimación es en base a la cercanía geográfica, lo que presupone una semejanza en las condiciones climáticas de la zona. El desarrollo y justificación del procedimiento se encuentra detallado en el trabajo de Vicario (2008).

2.2.3. Índices seleccionados para caracterizar sequías meteorológicas

La evaluación de las sequías meteorológicas se realizó mediante la determinación de los índices de sequía de Palmer (Palmer, 1965), (PDI por sus siglas en inglés: Palmer Drought Index) y del índice estandarizado de precipitaciones (McKee *et al.*, 1993), SPI por sus siglas en inglés: Standarized Precipitation Index. El índice de sequía de Palmer se basa en las anomalías del balance hídrico seriado y permite identificar períodos de sequías y excesos hídricos (Vicario *et al.*, 2007), analizar la periodicidad de las sequías (Rao y Padmanabhan, 1984) o realizar pronósticos de las mismas (Kim y Valdés, 2003), entre otras aplicaciones.

Sintéticamente, el modelo de balance hídrico de Palmer considera dos capas de suelo: la capa superior (Ss) que contiene 25 mm (1 pulgada) de agua útil y la capa inferior (Su) que contiene una determinada cantidad de agua útil en función de la profundidad considerada y las características propias del suelo. La pérdida de agua por el suelo depende de la evapotranspiración potencial y de la precipitación del periodo. A su vez el método define una serie de variables que asumen valores potenciales. Ellas son: Recarga potencial, Pérdida potencial y Escurrimiento potencial y determina una serie de coeficientes denominados: de Evapotranspiración, de Recarga, de Escurrimiento y de Pérdidas. A partir de la relación de estas variables se estiman las deficiencias hídricas (d) y un factor climático (k). A partir de esto se determinan para cada periodo de tiempo (t) el Índice de anomalía hídrica (Zi) y el Índice de Sequía (Xi) donde:

$$Z_i = d k$$

$$X_i = Z_i / (0,3 t + 2,69)$$

Por último, teniendo en cuenta el índice del mes anterior (X_{i-1}), los valores del índice PDI para cada periodo analizado se estiman a través de la siguiente expresión:

$$X_i = X_{i-1} + Z_i / 3 - 0,103 X_{i-1}$$

El comienzo del período de sequía se determina cuando el valor del índice es inferior al nivel de -0.5 y finaliza cuando es superior a -0.49. Los valores del índice PDI (Tabla 2.2), clasifican en categorías a las sequías según su intensidad. El cálculo del PDI, se realizó con el programa PDIWIN v. 1.0 (Ravelo y Herrero, 1999).

Tabla 2.2. Categorías de sequías según el índice PDI (Palmer, 1965)

Valor PDI	Categoría de sequía
>4,0	Extremadamente húmedo
3,0 a 3,9	Muy húmedo
2,0 a 2,9	Moderadamente húmedo
1,0 a 1,9	Ligeramente húmedo
0,5 a 0,9	Húmedo incipiente
-0,4 a 0,4	Normal
-0,5 a -0,9	Sequía incipiente
-1,0 a -1,9	Sequía reducida
-2,0 a -2,9	Sequía moderada
-3,0 a -3,9	Sequía severa
<-4,0	Sequía extrema

El índice estandarizado de precipitaciones, SPI (McKee *et al.*, 1993) fue diseñado para mejorar la detección del comienzo de la sequía y para el monitoreo de la misma; el mismo se fundamenta en las probabilidades de ocurrencia de precipitación para un período dado. El cálculo del SPI para una localidad se basa en el registro de precipitaciones a largo plazo para un período deseado, sin considerar otras variables tales como las condiciones del suelo o la evapotranspiración (Organización Meteorológica Mundial 2012). Dicho registro a largo plazo se ajusta a una distribución de probabilidades y a continuación se transforma en una distribución normal de modo que el SPI medio para la localidad y el período deseado sea cero (Edwards y McKee, 1997). Los valores positivos de SPI indican que la precipitación es mayor que la mediana y los valores negativos que es menor y tanto los climas húmedos y secos se pueden representar del mismo modo. Una característica del SPI es la posibilidad de caracterización de la sequía en distintas escalas temporales, tales como 3, 6, 12, y 24 meses, dependiendo del objetivo del estudio. Los valores de clasificación para el SPI se presentan en la Tabla 2.3. Se define una sequía cuando el SPI es continuamente negativo y alcanza un valor de -1 o inferior, y continúa hasta que el SPI se torna positivo. La duración de la sequía es definida por el intervalo entre el comienzo y el final del período. La Organización Meteorológica Mundial (2012) destaca las siguientes ventajas de dicho índice:

- Es flexible: se puede calcular para diversas escalas temporales
- Mediante los SPI de escalas temporales cortas, por ejemplo, de uno, dos o tres meses, se pueden ofrecer avisos tempranos de sequía y se puede ayudar a evaluar la severidad de la sequía.

- Tiene coherencia espacial: permite realizar comparaciones entre distintas localidades con climas distintos.

- Su carácter probabilístico le otorga un contexto histórico, muy adecuado para la adopción de decisiones.

Tabla 2.3. Valores característicos del índice estandarizado de precipitación (SPI) (McKee *et al.*, 1993)

Valor SPI	Categoría de sequía
>2,00	Extremadamente húmedo
1,99 a 1,50	Muy húmedo
1,49 a 1,00	Moderadamente húmedo
0,99 a -0,99	Normal
-1,00 a -1,49	Sequía moderada
-1,50 a -1,99	Sequía severa
<-2,00	Sequía extrema

Velasco y Aparicio (2004) mencionan que es el índice que sintetiza más apropiadamente las características de la sequía como fenómeno natural, partiendo del principio de que la precipitación pluvial (lluvia) es parte fundamental del ciclo hidrológico.

2.2.4. Resultados

2.2.4.1. Índice de sequía de Palmer (PDI)

Se implementó la metodología presentada anteriormente y se obtuvieron los resultados de los índices de sequía de Palmer PDI para el período 1943-1999 (Figura 2.2). A partir del análisis de los resultados, se observaron varios períodos plurianuales con sequías severas y extremas. Se destacaron, en particular, los años 1949, 1951, 1970 y 1999 con valores inferiores a -4.0. También se observaron que ocurrieron períodos de alrededor de 10 años con sequías moderadas, pasando por sequías severas hasta las extremas; que alternan de manera cíclica, con períodos de similar cantidad de años clasificados como normales a húmedos. Este efecto se vio suavizado a partir de la década del '80, donde si bien existen eventos de sequías de distinta magnitud, fueron aislados y menos severos.

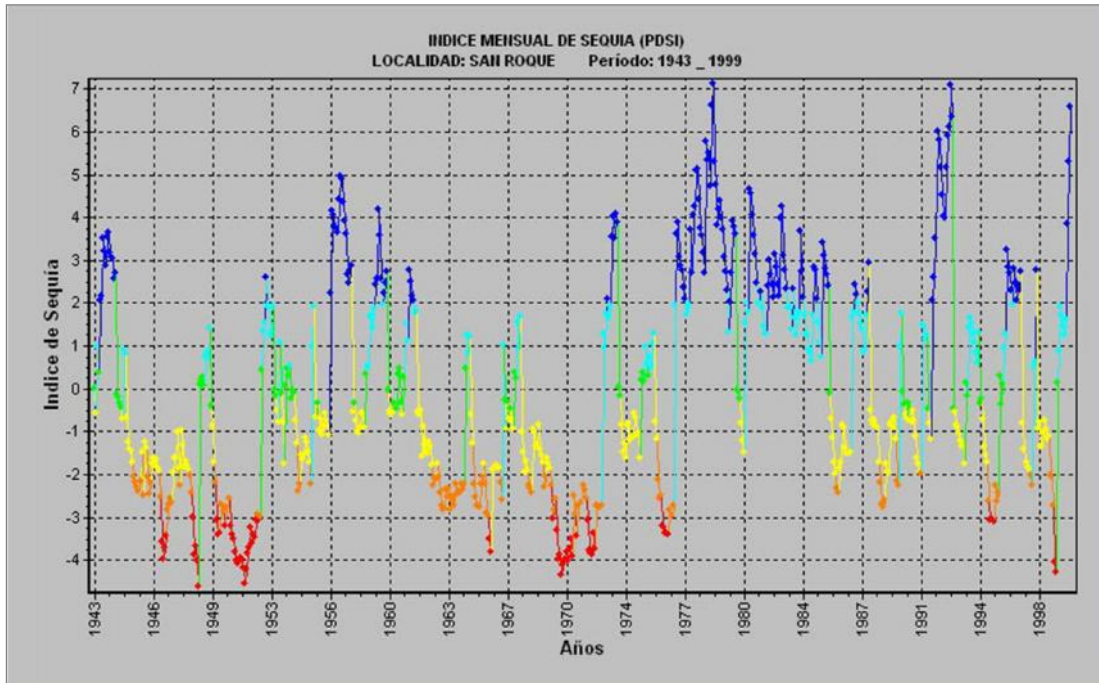


Figura 2.2. Índice de sequía de Palmer (PDI) para la estación San Roque. (1943-1999). Color: Azul: muy húmedo, Celeste: ligeramente húmedo, Verde: normal, Amarillo: sequía incipiente, Naranja: sequía moderada, Rojo: sequía severa

Se realizó un estudio de frecuencias de las distintas categorías de índice PDI, para identificar el tipo de sequía con mayor probabilidad de ocurrencia. Los resultados son presentados en la Figura 2.3. De las categorías de sequías definidas para el índice PDI, se observó que para el período 1943-1999, las sequías reducidas y moderadas son las más frecuentes, mientras que las sequías severas y extremas representan un 7,60% y un 2,05%, respectivamente, del total de la muestra.

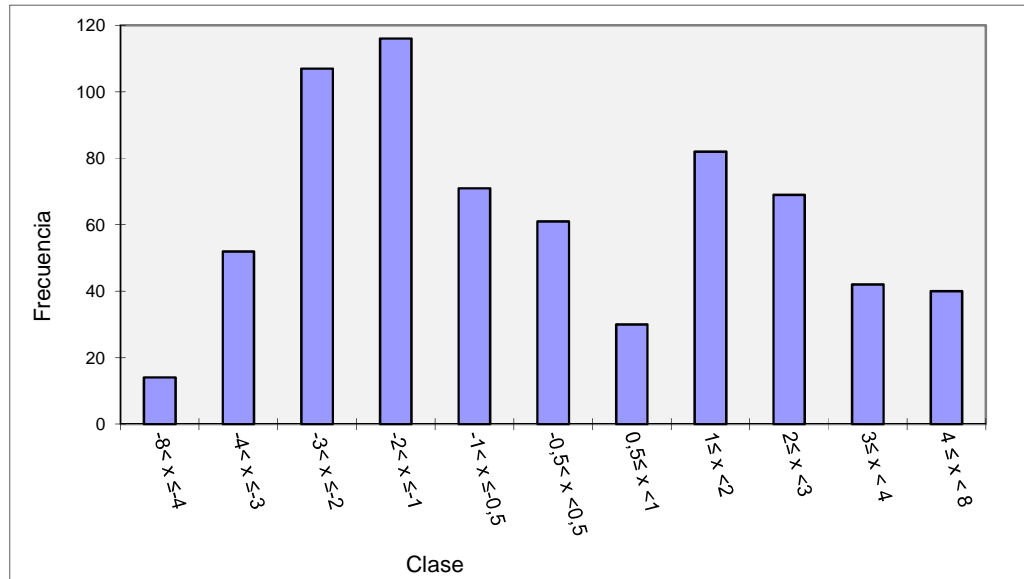


Figura 2.3. Histograma del índice PDI en la estación San Roque. Período 1943-1999.

2.2.4.2. Índice estandarizado de precipitación (SPI)

En la Figura 2.4 se presentaron los resultados del índice SPI calculados para el período 1943-1999 en la cuenca alta del río Suquía. Del análisis de los resultados obtenidos al aplicar los índices de sequía PDI y SPI, se destacó que ambos índices coinciden en un alto porcentaje, con la ocurrencia de sequías moderadas. Si el análisis se enfoca en el rango establecido por cada método para caracterizar a las sequías extremas, se verifica que los resultados son similares. Como se mencionó en el apartado 2.2.4.1, el PDI indicó que ocurrieron períodos extremadamente secos en los años 1949, 1951, 1970 y 1999, mientras que el SPI reflejó que las sequías extremas sucedieron en los años 1949, 1951, 1976 y 1999. Si bien se encuentran diferencias de caracterización de la sequía extrema ocurrida en la década del '70, se verificó que el índice PDI mostró eventos de sequías moderadas, severas y extremas entre los años 1970 y 1972, y sequías severas para el año 76. El índice SPI presentó sequías moderadas y severas entre el '70 y '72 y severa a extrema en el año 76. Para el resto de los años de la mencionada década, ambos índices coincidieron en la clasificación de períodos normales y húmedos.

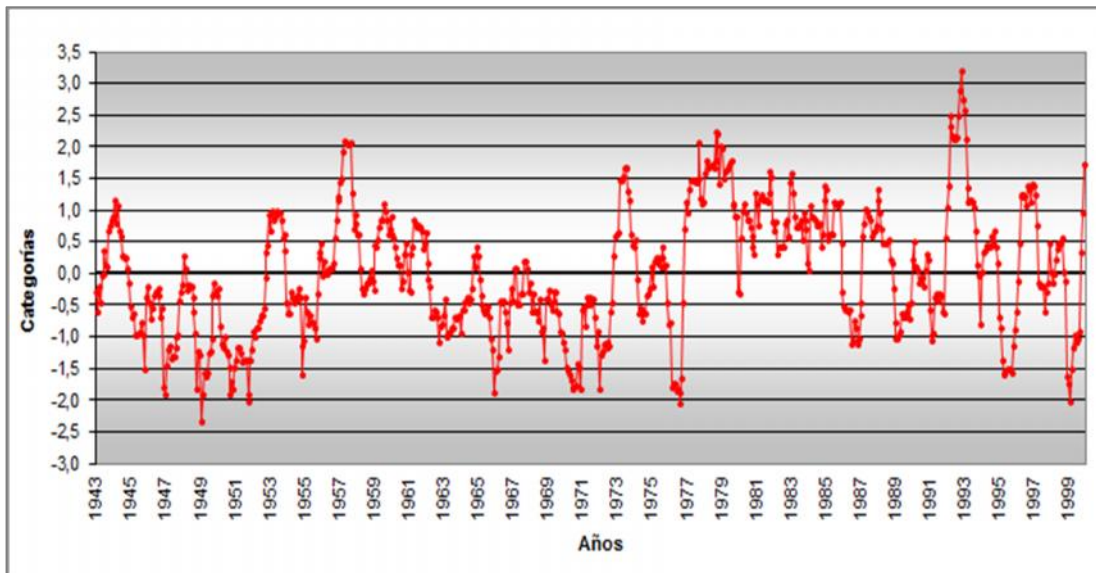


Figura 2.4. Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la estación San Roque. (1943-1999).

Cabe destacar que en 1970 la precipitación ocurrida fue de 408 mm y estuvo muy por debajo de la media anual para el período analizado (725 mm), mientras que en el año 1976 las precipitaciones superaron dicho promedio. En este caso, ante una diferencia importante de la variable fundamental en ambos métodos, se refleja, en primera instancia que el índice SPI y PDI son compatibles al clasificar las sequías en una escala de tiempo anual.

Para verificar la compatibilidad de ambos índices, también se realizó un estudio de frecuencias de las distintas categorías del índice SPI (Figura 2.5). Se determina el tipo de sequía que tiene mayor probabilidad de ocurrencia según este índice, y se comparan los resultados con los obtenidos de aplicar el índice PDI. Dentro del rango de clasificación del índice SPI, se observó que los períodos normales a húmedos son los más frecuentes. Dentro del intervalo que considera a las sequías, las más frecuentes son las moderadas seguidas por las severas. El índice SPI determinó que las sequías severas y extremas representan un 6,15% y un 0,58%, respectivamente; del total de la muestra.

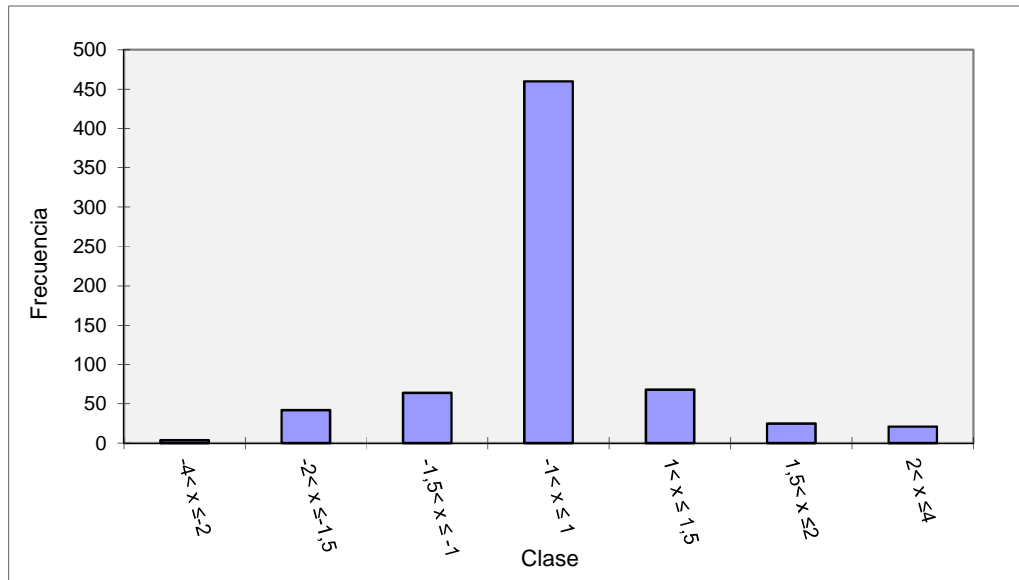


Figura 2.5. Histograma de frecuencias del índice SPI en la estación San Roque. Período 1943-1999.

2.2.4.3. Contraste entre los índices de sequía PDI y SPI y selección del índice de referencia

Analizando los periodos con sequías clasificadas como moderadas, reducidas o incipientes (Figuras 2.2 y 2.4) según el índice utilizado, el PDI mostró una mayor cantidad de periodos con este tipo de sequías respecto del SPI. A su vez, se identificaron todos los años de la serie analizada en los que al menos uno de los dos índices utilizados caracteriza algún mes con una sequía severa y/o extrema (intensa). En el 63% de los casos ambos índices coincidieron, aunque varía la cantidad de periodos con esta característica dentro de cada año (Figura 2.6). Una vez comparados y analizados los índices PDI y SPI y teniendo en cuenta que éste último no tiene en cuenta la infiltración ni la evapotranspiración del lugar, fenómenos que acentúan el déficit de agua ante la escasez de precipitaciones (Vicario *et al.*, 2007); se utilizó como referencia para esta instancia el índice de sequía de Palmer. Es decir que se consideró que en una cuenca de mesoescala y ante la disponibilidad o la posibilidad de estimación de la información hidrometeorológica requerida para calcular el índice PDI, éste favorecería además a un análisis más amplio de las condiciones hidrológicas en un período determinado. Sin embargo, en cuencas en las que solo se cuenta con datos de precipitaciones y que poseen una variabilidad espacial importante, el índice SPI sería apropiado para la caracterización de las sequías meteorológicas.

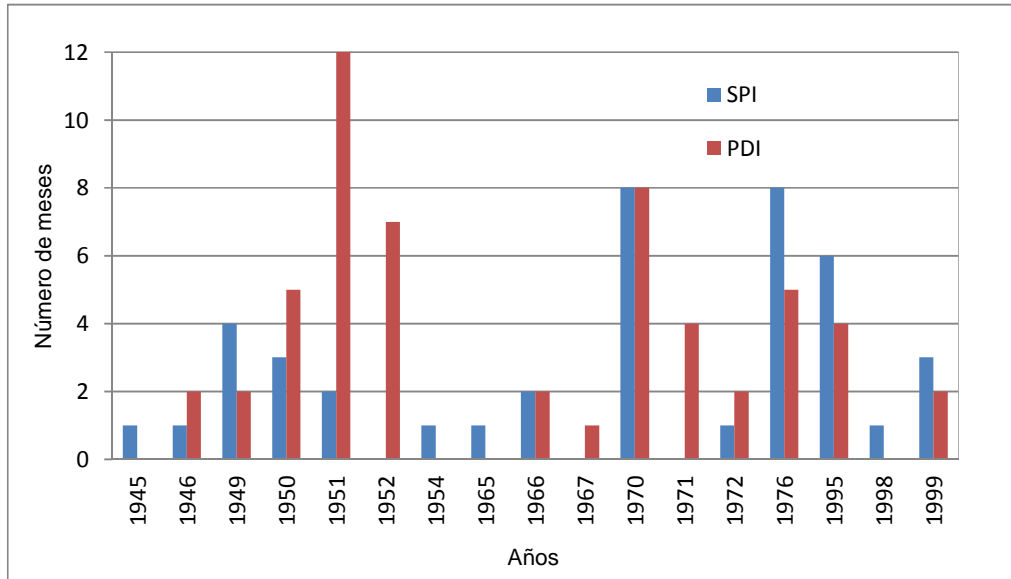


Figura 2.6. Identificación de los años en los que los índices PDI y/o SPI caracteriza algún mes con una sequía intensa en la cuenca alta del río Suquia. Período 1943-1999.

2.2.4.4. Matriz de frecuencias de sequías en la cuenca alta del río Suquia

En la Tabla 2.4 se muestran las frecuencias (%) de los distintos tipos de sequías según la clasificación del índice PDI, para cada mes del año en la cuenca alta del río Suquia. Se observó que, a excepción de noviembre y diciembre el resto de los meses presentan una probabilidad superior al 50% de caracterizarse como secos, respecto de la posibilidad de ser normales y húmedos, esto se muestra en la Figura 2.7. Las sequías severas fueron más frecuentes en el mes marzo, pero no se registraron sequías extremas en dicho mes. Las sequías extremas ocurrieron con igual frecuencia en seis meses del año: enero, febrero, abril, mayo, junio y septiembre.

Tabla 2.4. Matriz de frecuencia (%) de ocurrencia de sequías de distinto tipo (PDI) para cada mes del año en la cuenca alta del río Suquía (1943-1999).

Clasificación	Enero	Febr	Mzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Sequía extrema	3,51	3,51	0,00	3,51	3,51	3,51	0,00	0,00	3,51	1,75	1,75	0,00
Sequía severa	8,77	10,53	15,79	7,02	7,02	5,26	7,02	5,26	1,75	7,02	5,26	10,53
Sequía moderada	12,28	12,28	8,77	15,79	17,54	17,54	17,54	19,30	21,05	12,28	17,54	15,79
Sequía reducida	17,54	22,81	15,79	21,05	17,54	17,54	15,79	15,79	14,04	15,79	15,79	14,04
Sequía incipiente	12,28	7,02	10,53	7,02	10,53	12,28	10,53	12,28	12,28	15,79	5,26	8,77
Normal	7,02	7,02	10,53	8,77	7,02	3,51	12,28	12,28	12,28	5,26	8,77	12,28
Húmedo incipiente	3,51	1,75	3,51	3,51	0,00	7,02	5,26	1,75	3,51	10,53	8,77	3,51
Ligeramente húmedo	12,28	14,04	14,04	10,53	10,53	8,77	10,53	15,79	14,04	8,77	15,79	8,77
Moderadam. húmedo	10,53	8,77	8,77	8,77	14,04	12,28	7,02	5,26	7,02	12,28	12,28	14,04
Muy húmedo	7,02	7,02	7,02	3,51	7,02	3,51	8,77	10,53	7,02	7,02	1,75	3,51
Extremadam. húmedo	5,26	5,26	5,26	10,53	5,26	8,77	5,26	1,75	3,51	3,51	7,02	8,77
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

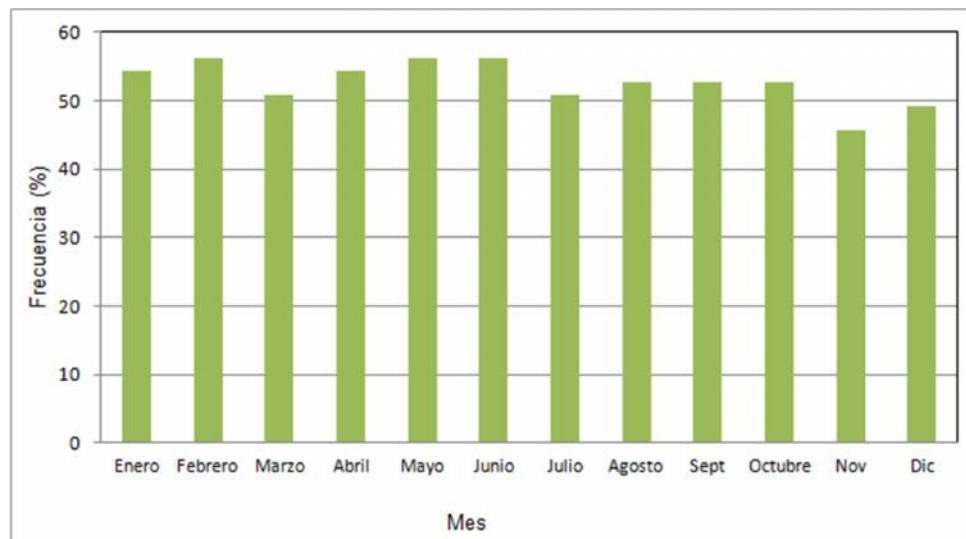


Figura 2.7. Histograma de frecuencias de distintos tipos de sequías observadas en cada mes del año respecto de ser caracterizados como normales y húmedos según el índice PDI en la cuenca alta del río Suquía (1943-1999).

Cabe destacar que el presente estudio se llevó a cabo con información que se extendía hasta 1999 y debido a que no se contaba con datos suficientes a partir de dicho año, los resultados obtenidos son válidos para el periodo de tiempo obtenido. Sin embargo, en el desarrollo de la presente tesis, se retomará con información estimada a través de sensores remotos de tal manera de evaluar las sequías meteorológicas a partir de ese año en la cuenca alta del río Suquía.

2.3. ESTUDIO DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN LA REGIÓN CENTRO DE LA ARGENTINA

2.3.1. Introducción

En esta sección se analiza la variabilidad espacial de las precipitaciones y de las sequías meteorológicas en la Región Centro de la República Argentina descrita en la sección 1.5 del presente documento.

2.3.2. Información utilizada

Se utilizaron datos de precipitaciones mensuales registradas en el período 1980-2009 en varias estaciones meteorológicas de la región pampeana central de la Argentina. Los datos fueron registrados por el Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina. Se incluyeron aquellas estaciones con datos para el período de estudio y con un porcentaje máximo de datos faltantes del 5%. Los datos faltantes para cada mes se completaron con los valores promedios históricos de ese mes para la estación analizada, de manera de minimizar los efectos de esta discontinuidad sobre la media de la serie, y sobre el posterior cálculo del índice de sequía. Así, se seleccionaron 15 estaciones pluviométricas (cuyas localizaciones y valores de precipitaciones medias anuales para el periodo 1980 – 2009, se detallan en la Tabla 2.5), de las cuales siete se encuentran ubicadas en la provincia de Córdoba (en las localidades de Córdoba, Laboulaye, Marcos Juárez, Pilar, Río Cuarto, Villa Dolores y Villa María de Río Seco), cinco en la provincia de Santa Fe (en las localidades de Ceres, El Trébol, Rosario, Sauce Viejo y Venado Tuerto) y tres en la provincia de Entre Ríos (en las localidades de Gualeguaychú, Paraná y Concordia). Dado que el período de estudio incluye 30 años, se trabajó en cada estación con una serie de 360 valores de precipitación correspondientes a los 12 meses de los 30 años incluidos en el período de estudio.

Tabla 2.5. Estaciones pluviométricas seleccionadas en la Región Centro de la República Argentina

Estación	Provincia	Latitud [°S]	Longitud [°O]	Altitud [m.s.n.m]	Precip. media anual [mm] (1980-2009)
Córdoba (CBA)	Córdoba, Argentina	31,19	64,10	474	894
Laboulaye (LAB)		34,08	63,20	137	909
Marcos Juárez (MJ)		32,42	62,10	14	904
Pilar (PI)		31,40	63,50	338	817
Río Cuarto (RC)		33,07	64,10	421	874
Villa Dolores (VDOL)		31,57	65,10	569	672
Villa María de Río Seco (VMRS)		29,54	63,40	341	822
Ceres (CE)	Santa Fe, Argentina	29,53	61,60	88	958
El Trébol (TR)		32,30	61,40	96	969
Rosario (ROS)		32,55	60,50	25	1019
Sauce Viejo (SV)		31,42	60,50	18	1020
Venado Tuerto (VT)		33,40	61,60	112	906
Gualeguaychú (GUAL)	Entre Ríos, Argentina	33,00	58,40	21	1131
Paraná (PAR)		31,47	60,30	78	1141
Concordia (CON)		31,18	58,00	38	1369

2.3.3. Análisis regional: identificación de zonas hidrometeorológicamente homogéneas en base a los valores de precipitación

Para definir subgrupos de estaciones pluviométricas que caractericen zonas homogéneas respecto a sus características hidrometeorológicas que permitan realizar un análisis regional de las sequías, se implementaron dos metodologías complementarias: a) basada en la similitud de las características físicas de las localizaciones donde están instaladas las estaciones (Pierrehumbert, 1977); y b) basada en la similitud del comportamiento de las series de datos de precipitación anual precipitada (mediante análisis estadísticos multivariados). Para la primera alternativa metodológica se identificaron grupos según el criterio definido por Pierrehumbert (1977), el cual establece que los datos de una estación pluviométrica se pueden suponer representativos de otros sitios si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) El terreno es similar en un radio de 5 km de la localización de cada estación
- b) Los sitios están ubicados en la misma vertiente hidrológica
- c) La diferencia de nivel topográfico entre sitios es menor que 200 m

- d) Los sitios se encuentran a una distancia no mayor a 150 km.
- e) La diferencia de precipitación media anual entre sitios es menor a 100 mm, si ésta es menor a 1000 mm
- f) La diferencia de precipitación media anual es menor que un 10 % en zonas más húmedas

Para implementar la segunda alternativa metodológica, se construyeron series de precipitación media anual para cada estación y se realizó un análisis de componentes principales (ACP). Esta técnica permite explorar las relaciones existentes entre las observaciones multidimensionales mediante ordenaciones de las mismas sobre planos que son óptimos para ordenar las observaciones y analizar interdependencias. En esencia, en el ACP se extraen sucesivos componentes desde una matriz de similitudes (o distancias) entre las observaciones (15 estaciones pluviométricas) calculada a partir de múltiples variables (30 valores de precipitaciones anuales en el período de estudio). Esos componentes son usados como ejes para la representación gráfica de los objetos. En la ordenación, cada estación es ubicada sobre uno o más ejes tal que su posición relativa refleja las similitudes y/o distancias entre ellas (Gabriel, 1971).

Específicamente, para identificar grupos se realizó un análisis de Conglomerados. Esta técnica permite asociar las observaciones de un conjunto, en un número determinado de grupos, basada en el concepto de distancia o similitud entre las observaciones. En este trabajo para medir el grado de semejanza entre las estaciones analizadas, en relación a un cierto número de características cuantitativas, se utilizó la distancia Euclídea (d) debido a que es un método sencillo y muy utilizado para los casos en los que las variables estén medidas en las mismas unidades y sean homogéneas. En particular, para calcular las distancias entre los grupos se utilizó el método de Encadenamiento promedio (Sokal y Michener, 1958), ya que es uno de los métodos más simples y que ha presentado resultados eficaces, en numerosos casos en los que se ha aplicado (Vicario *et al.*, 2015). Este método consiste en, dados dos conglomerados, promediar todas las distancias entre pares de objetos en los que cada uno de estos objetos, pertenezca al otro conglomerado del de su par. Es posible representar los resultados con las distintas etapas de agrupamiento a través de un gráfico, denominado dendrograma. Ambos análisis se realizaron con el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011).

2.3.4. Análisis de las sequías meteorológicas

En esta sección, dada la escasez de información confiable de variables hidrometeorológicas distintas a la de la precipitación, como la evapotranspiración potencial, agua útil del suelo, etc.; se considera apropiado utilizar el índice SPI para el análisis de sequías meteorológicas (ver apartado 2.2.4.3).

Una vez identificadas las subáreas pluviométricamente homogéneas, para evaluar el comportamiento de las sequías observando la variabilidad interanual del proceso se calculó el SPI de cada serie temporal y luego se promedió para cada zona. Con el fin de observar y caracterizar el comportamiento plurianual de las sequías meteorológicas a nivel mensual en varias estaciones de una amplia región y en un período prolongado de tiempo (30 años), se considera pertinente utilizar la escala temporal de 12 meses para la estimación del índice. Asimismo, con la finalidad de observar la variabilidad del mismo y representar adecuadamente su tendencia, se calcularon los promedios móviles con intervalos constantes de 12 períodos mensuales.

2.3.5. Resultados y discusión

2.3.5.1. Zonas hidrometeorológicamente homogéneas

Según el criterio de Pierrehumbert (1977), la estación de Villa Dolores no es agrupable a ninguna de las estaciones seleccionadas en esta sección, debido a que no cumple con la condición de la diferencia en nivel topográfico, ni con la condición de diferencia en la pluviometría anual (Tabla 2.5). Esto es coherente ya que dicha estación está emplazada en la vertiente oriental de la zona serrana. De igual manera, se determina que la estación Concordia no es representativa de ningún subgrupo ya que presenta una diferencia notable en la variable de precipitación, respecto de las estaciones consideradas. La evaluación del resto de las características físicas sugeridas por Pierrehumbert (1977) se realizó de manera complementaria al análisis estadístico multivariado de la precipitación media anual, de tal manera de validar la coherencia en los agrupamientos de estaciones realizados.

La Figura 2.8 muestra el ordenamiento de las estaciones pluviométricas de la región central de Argentina en el plano definido por las dos primeras componentes principales obtenidas del ACP realizado sobre los datos de precipitación anual entre 1980 y 2009. Los distintos colores corresponden a estaciones ubicadas en distintas provincias. Los dos primeros ejes obtenidos

mediante el análisis de componentes principales explican un 75,1% de la variabilidad observada entre estaciones respecto a las medias pluviométricas anuales. En la Figura 2.9 se observa que las estaciones de Villa Dolores y Concordia están alejadas del resto de los casos del conjunto, respecto a sus características pluviométricas, lo cual concuerda con los resultados obtenidos mediante el criterio de Pierrehumbert (1977). Por esta razón, ambas estaciones fueron descartadas en los análisis posteriores. Las estaciones de la provincia de Córdoba presentan precipitaciones medias anuales inferiores respecto de las estaciones de la provincia de Entre Ríos y en algunos casos se acercan al comportamiento de las estaciones de Santa Fe.

Para definir el parámetro de la cantidad de grupos (o zonas homogéneas) que requiere el análisis de Conglomerados se consideró que, dada la escasa cantidad de estaciones, se ve limitada la posibilidad de adoptar un número elevado de grupos o zonas y debido a que la región posee una superficie muy amplia, no sería adecuado definir la cantidad de dos zonas solamente. Además, teniendo en cuenta las características físicas y pluviométricas de cada una de las provincias, se consideró conveniente adoptar tres zonas o subáreas homogéneas. El análisis de conglomerados identificó los siguientes tres grupos en base a la lluvia media anual: el grupo 1 está conformado por las estaciones de Sauce Viejo, Rosario, Paraná y Gualeguaychú; el grupo 2 por las estaciones de Villa María de Río Seco, Pilar y Córdoba y por último, el grupo 3, conformado por las estaciones de Río Cuarto, Laboulaye, Venado Tuerto, Marco Juárez, el Trébol y Ceres. En la Figura 2.9 se muestra el dendrograma obtenido mediante el análisis de Conglomerado.

En la Figura 2.10 se identifican las estaciones que conforman cada una de las agrupaciones o subáreas determinadas, en la región de estudio. Luego se representan los grupos de estaciones en el mapa de precipitaciones medias anuales (isohietas) elaborado por el Servicio Meteorológico Nacional presentado en la Figura 1.4. Se puede observar que las zonas hidrometeorológicamente homogéneas definidas en este apartado se ubican en las áreas definidas por isohietas semejantes (Figura 2.11). Las estaciones del Grupo 1 se localizan dentro del área delimitada por las isohietas 1000 y 1200, mientras que las del Grupo 2 y 3 se encuentran dentro del área delimitada por las isohietas 800 y 1000.

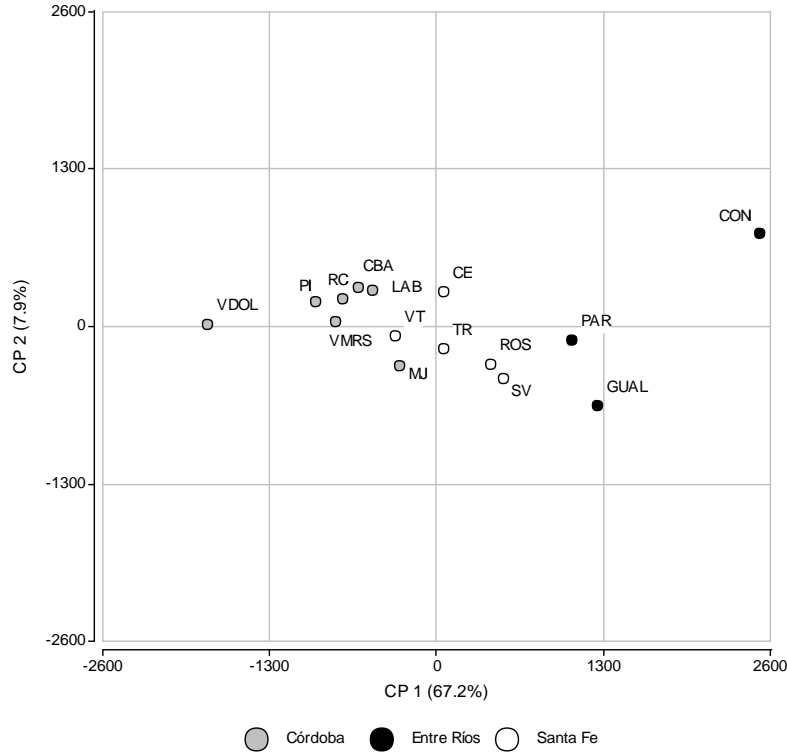


Figura 2.8. Ordenamiento de las estaciones pluviométricas seleccionadas en el plano definido por las dos primeras componentes principales obtenidas del ACP realizado sobre los datos de precipitación anual (1980 – 2009). Los distintos tonos corresponden a estaciones ubicadas en distintas provincias.

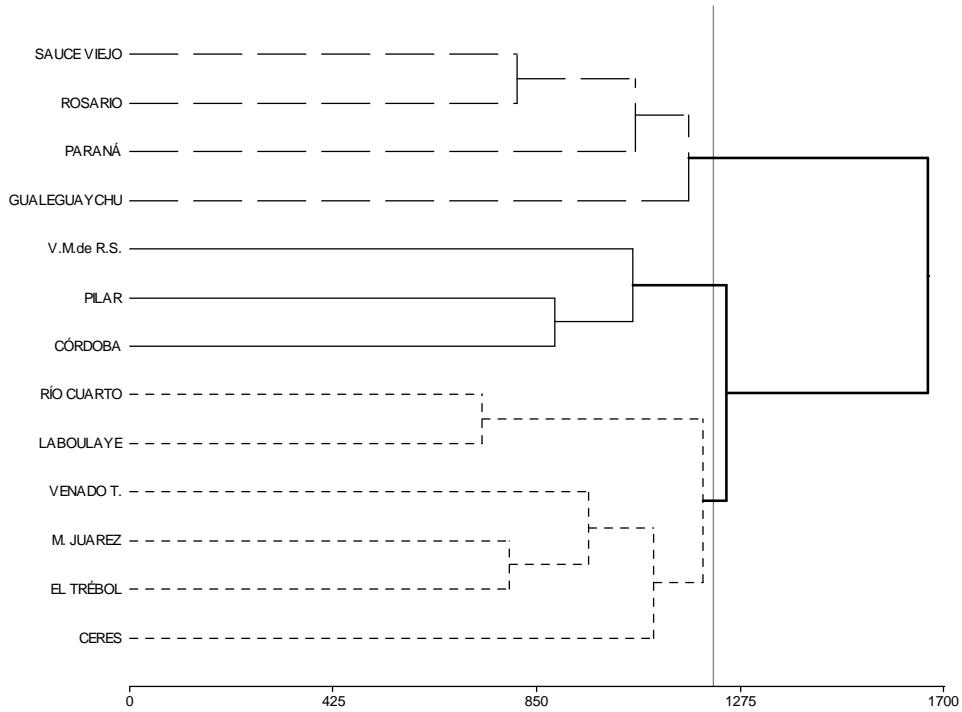


Figura 2.9. Dendrograma obtenido mediante el análisis de conglomerados realizado sobre los datos de precipitación anual entre los años 1980 y 2009 de las 13 estaciones analizadas. Se detalla la distancia a la cual se separan los tres grupos obtenidos.



Figura 2.10. Localización de las estaciones que conforman cada una de las agrupaciones distinguidas según: Grupo 1: cuadrado, Grupo 2: triángulo y Grupo 3: círculo en la región de estudio.

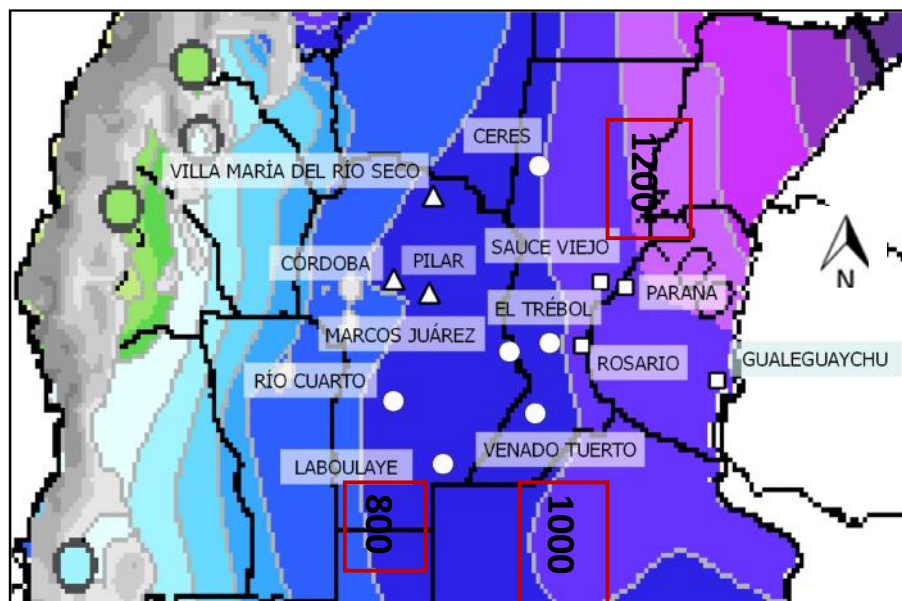


Figura 2.11. Detalle del mapa de precipitación media anual de la República Argentina con las estaciones del Grupo 1: cuadrado, Grupo 2: triángulo y Grupo 3: círculo. Se destacan (cuadro rojo) los valores de precipitación media anual (mm) en la zona de interés. (Fuente: Figuras 1.4 y 2.10)

2.3.5.2. Análisis de sequías meteorológicas

Una vez agrupadas las estaciones representativas en cada subárea en función de su comportamiento pluviométrico se analizaron las sequías meteorológicas de manera conjunta para cada uno de los tres grupos definidos. Se observa que las estaciones que conforman cada uno de los grupos detallados presentan similar comportamiento entre sí, en cuanto a la ocurrencia de períodos secos. Específicamente, en el caso del Grupo 1 (Sauce Viejo, Rosario, Paraná y Gualeguaychú), todas presentaron períodos de sequías severas y/o extremas en los años 1989 y 2008-2009. Además se registraron dos eventos extremos de consideración para el caso de la estación de Rosario en el año 1983 y en la estación de Paraná en 1997 (Figura 2.12). Dentro del Grupo 2 (Villa María de Río Seco, Pilar y Córdoba) se observaron períodos de sequías severas y/o extremas entre los años 1988 - 1990 y 2008 - 2009 para todos los casos, también en los años 1994 a 1996 y 2003-2004 a excepción de la estación de Córdoba que presentó sequías moderadas a severas (Figura 2.13). Con respecto a las estaciones que conforman el Grupo 3 (Río Cuarto, Laboulaye, Venado Tuerto, Marcos Juárez, El Trébol y Ceres), se observaron, como en el resto de la región de estudio, períodos con sequías severas y/o extremas alrededor de los años 1989 y 2008-2009 en todas las estaciones; desde el año 1996 hasta el 2006 se registraron distintos eventos de sequías intensas en algunas de las estaciones que conforman el grupo (Figura 2.14).

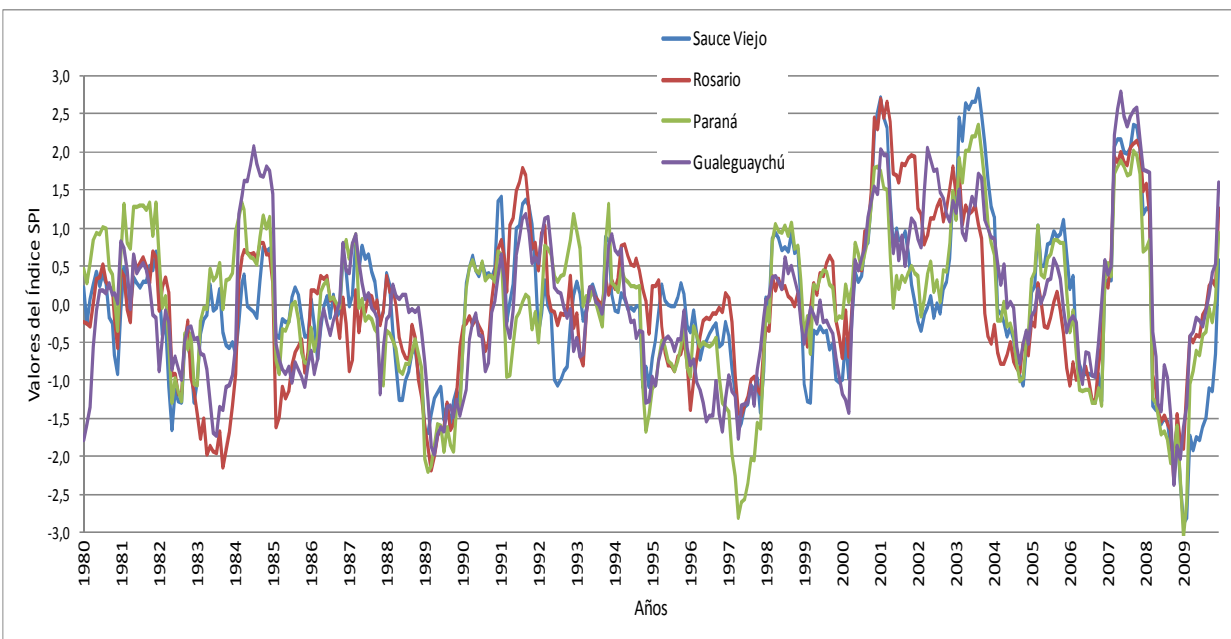


Figura 2.12. Índice SPI de cada una de las estaciones que conforman el Grupo 1 en la Región Centro de Argentina.

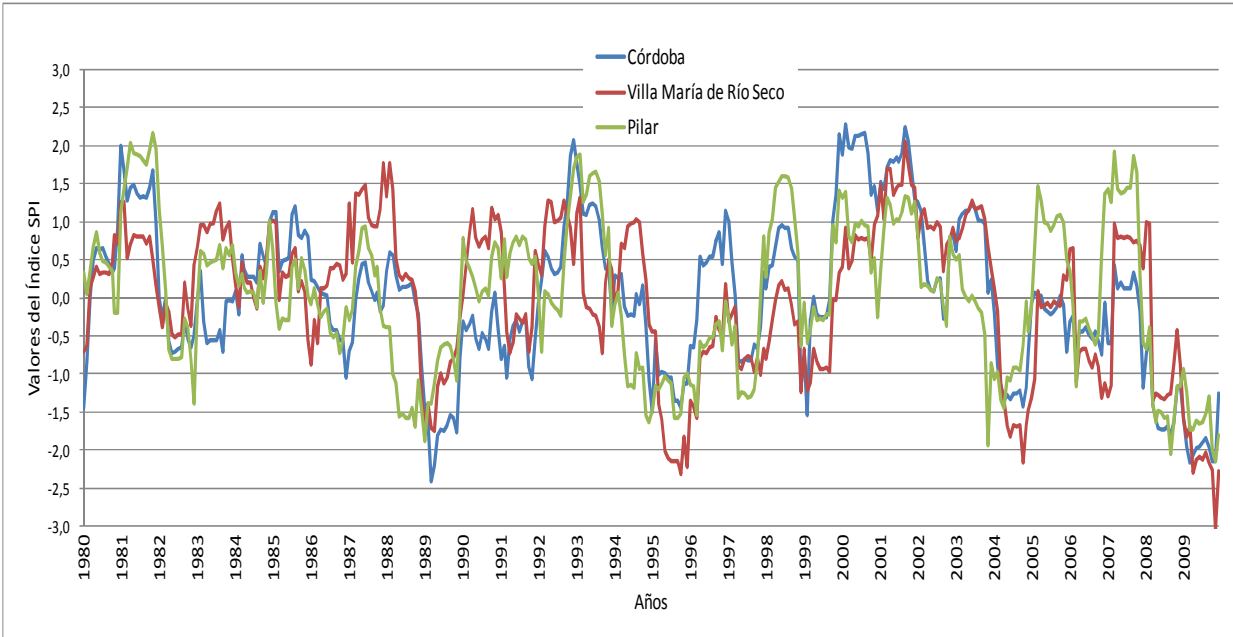


Figura 2.13. Índice SPI de cada una de las estaciones que conforman el Grupo 2 en la Región Centro de Argentina

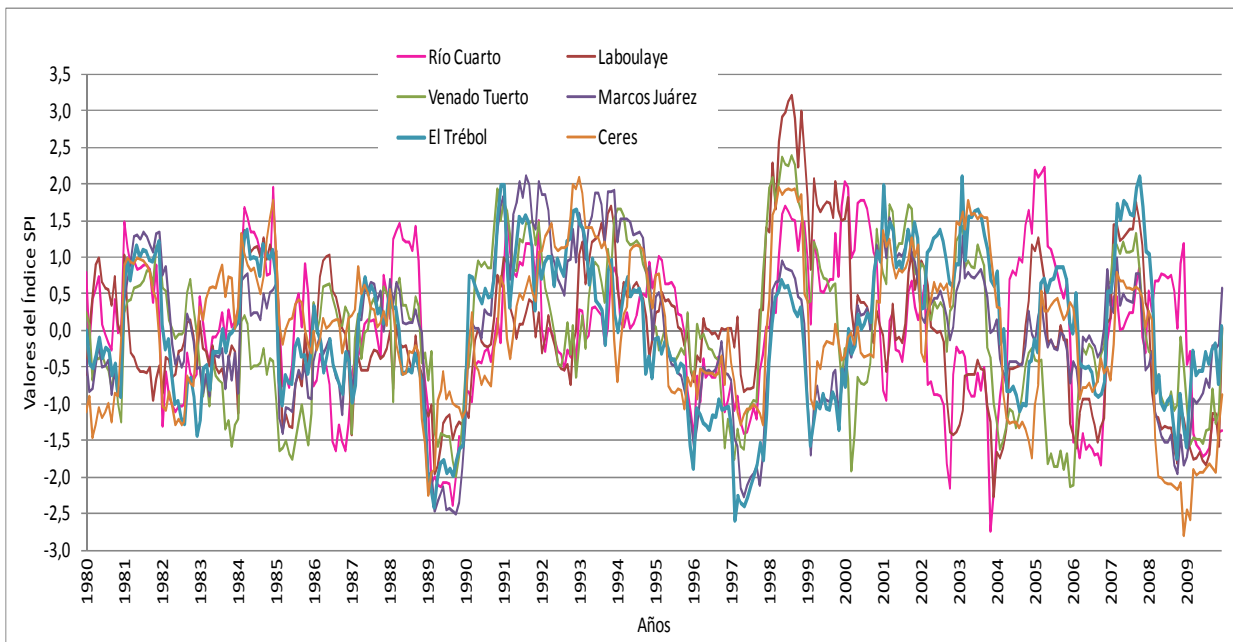


Figura 2.14. Índice SPI de cada una de las estaciones que conforman el Grupo 3 en la Región Centro de Argentina

En la Figura 2.15 se muestran la evolución temporal de los valores promedios del índice SPI de los tres grupo de estaciones. Cabe destacar que en los tres grupos de estaciones pluviométricas se observaron sequías severas o extremas alrededor de los años 1989, 1995/1997 y 2008, siendo el periodo de déficit 2008-2009, una de las peores sequías en el periodo analizado (comunicaciones no oficiales mencionan que podría ser la peor en los últimos 60 años, por lo menos en algunas zonas de la Región Centro). Se observó, a través del análisis del índice SPI promedio de cada grupo de estaciones, que a nivel regional y a partir del año 1998 hasta el año 2007, aproximadamente, los ciclos húmedos son más importantes en cuanto a su intensidad. Para identificar más claramente esta situación se graficaron las componentes de baja frecuencia obtenidas a partir de la media móvil de 12 meses de las series de datos de valores promedios del índice SPI de cada grupo de estaciones, también mostradas en la Figura 2.15.

Se observa que hasta el año 1997 aproximadamente, el Grupo 1 y 3 se comportan de manera similar. No obstante a partir del año '98 hasta el final de la serie, las tendencias de los 3 grupos son compatibles entre sí en cuanto a la ocurrencia de ciclos húmedos, normales o secos, pero se destaca que el Grupo 1 presenta ciclos húmedos más intensos que el resto de los grupos.

A partir de este análisis de tendencias, se realiza el análisis estadístico descriptivo de los valores SPI promedios de cada Grupo, en primera instancia de la serie completa y luego de la serie dividida en dos muestras: 1980-1997 y 1998-2009. Los resultados se presentan respectivamente en la Tabla 2.6 y Tabla 2.7.

Es posible observar que, efectivamente, en el primer período analizado 1980-1997 el Grupo 2 posee sus valores característicos por encima del resto de los valores del Grupo 1 y Grupo 3. Sin embargo, a partir del año 1998 el Grupo 1 posee un valor de la media mayor y positiva respecto del primer período y del resto de los grupos, lo que indicaría ciclos húmedos más intensos o bien mayor cantidad de meses con registros de precipitación en las estaciones que lo conforman.

Tabla 2.6. Estadística descriptiva de las series de valores promedios del índice estandarizado de precipitación SPI de cada grupo de estaciones (1980-2009)

Variable	N° de datos	Media	Desvío Est.
Grupo1	360	-0,02	0,90
Grupo2	360	0,01	0,87
Grupo3	360	-0,0004	0,77

Tabla 2.7. Estadística descriptiva de las series de valores promedios del índice estandarizado de precipitación SPI de cada grupo de estaciones en los períodos 1980-1997 y 1998-2009.

Periodos	Variable	N° de datos	Media	Desvío Est.
1980-1997	Grupo1	204	-0,17	0,64
	Grupo2	204	0,05	0,73
	Grupo3	204	0,02	0,72
1998-2009	Grupo1	156	0,17	1,12
	Grupo2	156	-0,04	1,02
	Grupo3	156	-0,03	0,83

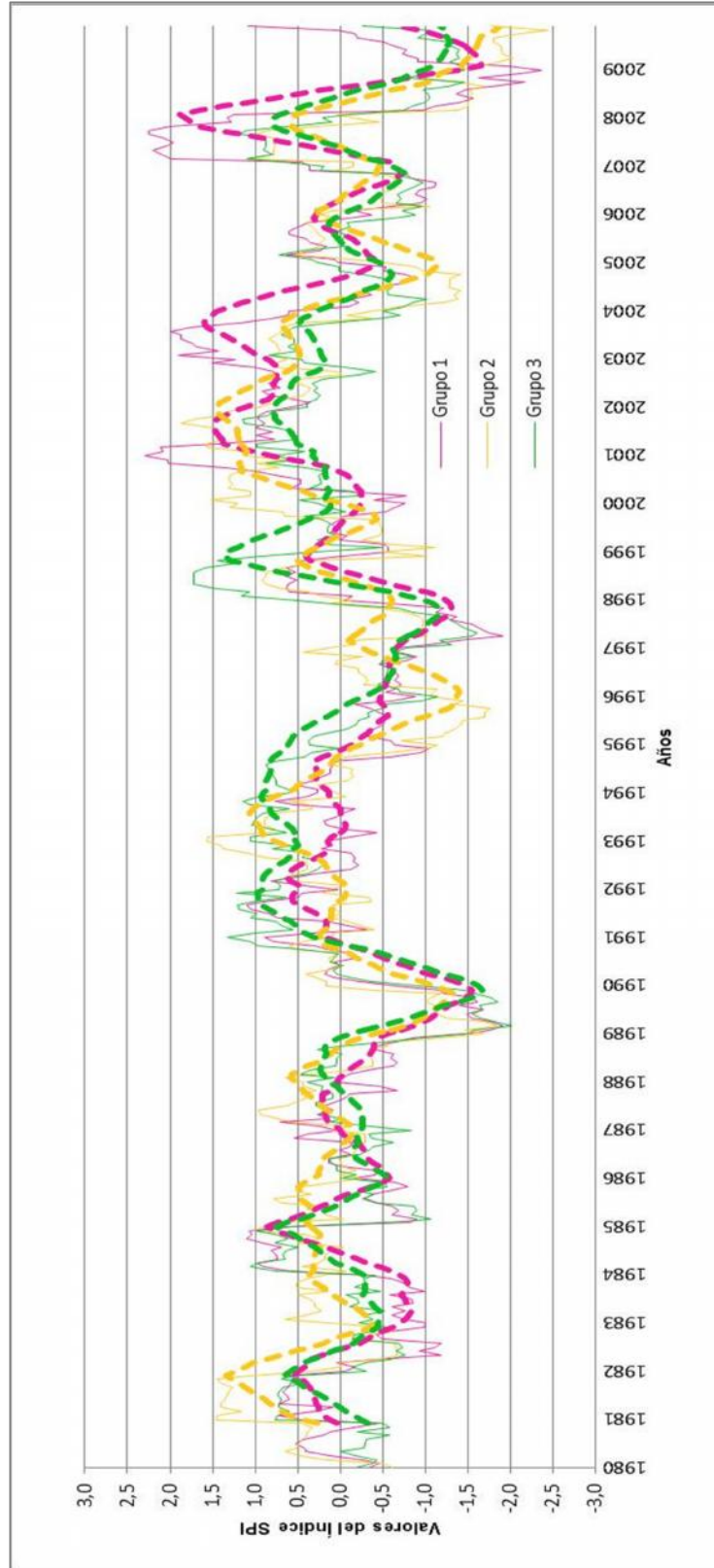


Figura 2.15. Gráfico de los valores promedios del índice SPI de cada uno de los grupos de estaciones y sus respectivas componentes de baja frecuencia obtenidas a partir de la media móvil de 12 meses (líneas de puntos), en la Región Centro de Argentina. Grupo 1: Magenta, Grupo 2: Amarillo y Grupo 3: Verde

2.4. VALIDACIÓN Y USO DE DATOS DE PRECIPITACIONES ESTIMADAS A PARTIR DE TRMM PARA COMPLEMENTAR LOS ESTUDIOS DE EVOLUCIÓN ESPACIAL DE LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS

2.4.1. Introducción

Para el caso de evaluación y monitoreo del fenómeno extremo de la sequía meteorológica a nivel de cuenca, la precipitación es considerada la variable de origen a tener en cuenta. Pero para obtener estudios confiables y que se ajusten lo mejor posible a la realidad, es conveniente contar con series de datos consecutivos en el paso de tiempo requerido, sin datos faltantes y con una longitud considerable. A su vez, como las sequías son consideradas fenómenos de mesoescala, es conveniente contar con una amplia cobertura espacial de puntos de control con registros simultáneos en el tiempo y en distintas localizaciones, dependiendo en este caso, del tamaño de la cuenca y de la variabilidad en la topografía dentro de la misma, entre otras características. En general, esta situación no ocurre en cuanto a información de superficie dentro de la Argentina. Los estudios de las sequías en áreas de llanura son limitados, debido en parte, a las pocas estaciones pluviométricas disponibles y su escasa densidad espacial. Mientras la situación de escasez de información esté presente, se destaca la importancia de estudiar y buscar nuevas fuentes de datos de precipitaciones. En este sentido el presente trabajo pretende evaluar la validez y aplicabilidad de los datos de precipitaciones mensuales estimadas a través de la misión satelital TRMM (por sus siglas en inglés de la Misión Tropical de Medición de Precipitaciones) en dos cuencas, la del río Carcarañá y la del río San Antonio (Sección 1.5) que poseen diferentes tamaños y características, con la finalidad de aplicarlas luego a estudios sobre el fenómeno hidrometeorológico de la sequía.

2.4.2. Información utilizada

2.4.2.1. Cuenca del río Carcarañá

Debido a que esta cuenca es de gran extensión y puede considerarse de macroescala espacial, para obtener una alta densidad de información pluviométrica, fue necesario evaluar alternativas de obtención de datos, ya que solamente se contaba con dos estaciones pluviométricas con series útiles, por su longitud, como lo son las estaciones Marcos Juárez y Río Cuarto. Además y con los fines de validación se incorporaron siete estaciones con datos

observados en la región serrana, perteneciente a la cuenca alta de la misma. Dichas estaciones se detallan en la Tabla 2.8 y su ubicación se muestra en la Figura 2.16.

Se utilizaron valores de precipitaciones estimadas a través de la TRMM en las mismas ubicaciones geográficas (definidas por coordenadas) correspondientes a las estaciones con registros en superficie. Se obtiene datos de precipitaciones diarias en cada punto a partir del año 1998 hasta el año 2014, las cuales fueron procesadas y agregadas en paso de tiempo mensual.

Dicha misión se desarrolló de manera conjunta entre la NASA y la agencia japonesa de exploración aeroespacial: JAXA, con el fin de estudiar las precipitaciones para investigaciones climatológicas (Fuente: <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>). La TRMM comenzó en noviembre de 1997 y finalizó en abril del año 2015, ofreciendo alrededor de 17 años de información para la investigación y mejora del conocimiento sobre variables climáticas. TRMM a través de sus sensores (Kummerow *et al.*, 1998) cubre el globo entre los $\pm 50^\circ$ de latitud, con una resolución espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Estos datos admiten aplicaciones para la evaluación de la dinámica hidrológica, por ejemplo en la llanura pampeana (Campos *et al.*, 2014)

Tabla 2.8. Coordenadas y altura de las estaciones pluviométricas seleccionadas en la cuenca del río Carcarañá.

Estación	Coordenadas geográficas (en decimales)		Altura (msnm)
	Latitud	Longitud	
El Durazno	-32,23	-64,78	1095
Cerro Blanco	-32,13	-64,92	2106
El Manzano	-32,37	-64,88	1813
La Puerta	-32,33	-64,78	1259
Lutti	-32,30	-64,73	1037
Pampichuela	-32,13	-64,82	1185
Yacanto	-32,10	-64,75	1132
Las Tapias	-32,85	-64,95	1455
Marcos Juárez	-32,42	-62,1	114
Río Cuarto	-33,07	-64,1	421

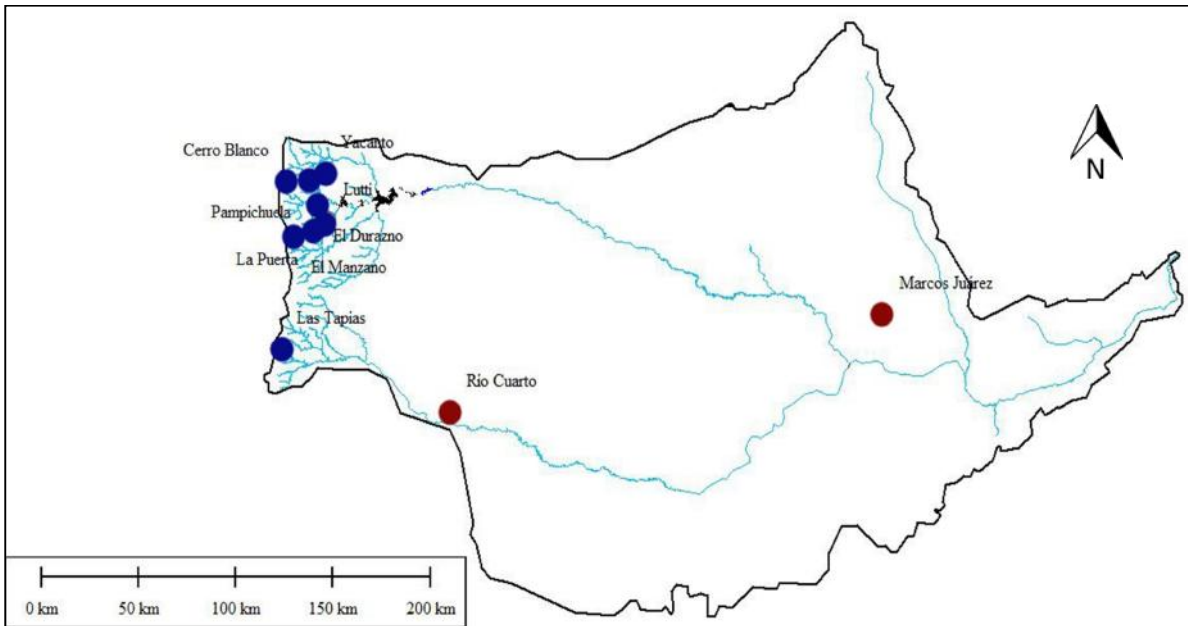


Figura 2.16. Ubicación de las estaciones pluviométricas en la cuenca del río Carcarañá.

2.4.2.2. Cuenca del río San Antonio

En la cuenca del río San Antonio se cuenta con datos de precipitaciones diarias de las estaciones correspondientes a la red telemétrica del INA-CIRSA (Figura 1.11 y Tabla 2.9). Debido a que dichas series tenían registros faltantes (periodo 1998-2014), no era posible contar con valores mensuales completos. El porcentaje de datos faltantes y región de la cuenca (alta, media o baja) a la que pertenece cada estación seleccionada, se detalla en la Tabla 2.10.

Tabla 2.9. Estaciones y características pertenecientes a la red telemétrica INA-CIRSA de la cuenca del río San Antonio.

Nº Estación	Nombre	Coordenadas geográficas (en decimales)		Altura [msnm]
		Latitud	Longitud	
100	Santo Tomas	-31,56	-64,82	2260
200	Puesto Pereyra	-31,44	-64,80	2284
300	La Casita	-31,48	-64,74	1531
400	Copina	-31,57	-64,71	1705
500	El Galpón	-31,50	-64,82	2324
600	Barrio El Canal	-31,44	-64,51	668
700	Confluencia el Cajón	-31,49	-64,63	1029
900	Puesto Garay	-31,41	-64,73	1630
1010	C. Malambo	-31,50	-64,68	1340
1200	Las Ensenadas	-31,58	-64,78	2213
1800	Cañada Honda	-31,45	-64,69	1211

Tabla 2.10. Número de meses sin datos completos en cada estación del INA- CIRSA y región a la que pertenecen (1998-2014)

Nº Estación	Región	Cant. meses sin datos	Meses sin datos (%)
100	Alta	98	50,26
200	Alta	7	3,59
300	Media	8	4,10
400	Media	4	2,05
500	Alta	4	2,05
600	Baja	7	3,59
700	Baja	8	4,10
900	Media	4	2,05
1010	Media	2	1,03
1200	Alta	2	1,03
1800	Media	9	4,62

2.4.3. Validación de estimaciones pluviométricas realizada con TRMM

Para la validación de los datos de precipitaciones mensuales estimados con TRMM se utilizó el coeficiente de concordancia estadística que es un coeficiente que muestra cuán acordes son un grupo de observaciones respecto de otro, siendo que ambos identifican el mismo fenómeno. Uno de los grupos se establece como patrón de referencia. Para el caso de observaciones continuas y para mejorar otras metodologías estadísticas (Vigiak y Bende-Michl, 2013), Lin (1989) presentó el Coeficiente de Correlación Concordancia (CCC) el cual se define como:

$$CCC = \frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 - \sigma_{(X-Y)}^2}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + (\overline{(X-Y)})^2}$$

Donde:

σ_X^2 : Varianza del grupo X

σ_Y^2 : Varianza del grupo Y

$\sigma_{(X-Y)}^2$: Varianza de la diferencia entre los grupos X e Y

$\overline{(X-Y)}$: Diferencia promedio de los grupos X e Y.

Este coeficiente, que contempla en sí mismo las diferencias aleatorias y sesgo representadas por $\sigma_{(X-Y)}^2$ y $\overline{(X-Y)}$ respectivamente, califica la concordancia entre los valores como "sustancial" si CCC es mayor a 0,95; "moderada" si está entre los valores de 0,90

y 0,95 y “pobre” si el CCC es inferior a 0,90. El mismo contempla la exactitud y precisión de los conjuntos de datos, ya que si se representa gráficamente es posible visualizar cuánto se desvían respecto de una línea recta que parte del origen y está a 45° (concordancia ideal) en un plano cartesiano. La cercanía y la dispersión de los pares de datos respecto de dicha línea son indicadores relacionados a la exactitud y a la precisión, respectivamente, de los datos. Además se determina la correlación y el sesgo entre los conjuntos de datos con la finalidad de comparar y evaluar los resultados.

Para establecer la correlación entre las variables de precipitación observadas y obtenidas por la TRMM en una misma localización, se utiliza el Coeficiente de Correlación (CC) y se evalúa a través del método de Pearson (Pearson, 1896). Los coeficientes de correlación miden la fuerza de la relación lineal entre dos series de datos, mediante los valores entre los umbrales -1 a $+1$. Mientras mayor sea el valor absoluto de la correlación, más fuerte es la relación lineal entre las dos variables. El coeficiente de correlación entre dos variables aleatorias X e Y es el cociente que se muestra en la siguiente expresión:

$$CC_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Donde:

σ_{XY} es la covarianza de (X,Y) y σ_X y σ_Y son las desviaciones típicas de cada una de las variables. Para los valores de coeficiente:

$CC_{XY} = 1$, indica un acuerdo total entre las dos variables denominada relación directa.

$0 < CC_{XY} < 1$, existe una correlación positiva.

$CC_{XY} = 0$, no existe relación lineal.

$-1 < CC_{XY} < 0$, existe una correlación negativa.

$CC_{XY} = -1$, indica un acuerdo total pero de signo contrario entre las dos variables llamada relación inversa.

El sesgo, por definición hace referencia a la valoración de las observaciones de una muestra respecto de las observaciones de otra muestra, según las discrepancias entre sus distribuciones marginales. Es decir que no existe sesgo si se acepta la hipótesis nula de que cada par de observaciones pertenecientes a ambas muestras poseen una homogeneidad marginal y simetría exactas. La metodología empleada para evaluar el sesgo es descriptiva pero no informa acerca

si es o no significativa. Para el caso del presente trabajo, se determinó el sesgo (S) en base a la media de las series de precipitaciones observadas (X) y la media de la serie de precipitaciones obtenidas por TRMM (Y), donde:

$$S = X - Y \text{ y el sesgo relativo: } Sr = (X - Y) / Y$$

De tal manera que si S es positivo, se visualiza una subestimación de las precipitaciones obtenidas por TRMM respecto de los valores observados y viceversa, en caso de un S negativo, se observa una sobreestimación de dichas condiciones.

2.4.4. Resultados y discusión

2.4.4.1. Cuenca del río Carcarañá

Los resultados obtenidos de cada uno de los parámetros estadísticos aplicados se muestran en la Tabla 2.11 y Figura 2.17. A través de estos parámetros se observa que en la región de llanura, específicamente para las estaciones de Marcos Juárez y Río Cuarto, los datos obtenidos de TRMM poseen una concordancia moderada respecto de los datos observados, están significativamente correlacionados y sobreestiman las precipitaciones levemente. Mientras que, las estaciones que se encuentran en la región serrana de la cuenca, a pesar que las correlaciones podrían considerarse aceptables, en todos los casos la concordancia es menor y se observa una subestimación de las precipitaciones del TRMM respecto de las observadas, que varían entre el 16% y 36%, aproximadamente.

Tabla 2.11. Parámetros estadísticos calculados entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para las mismas localizaciones en la cuenca del río Carcarañá.

	Marcos Juárez	Río Cuarto	El Durazno	Cerro Blanco	El Manzano	La Puerta	Lutti	Pampichuela	Yacanto	Las Tapias
Concordancia	0,91	0,93	0,78	0,54	0,73	0,7	0,78	0,76	0,78	0,77
CC	0,92	0,93	0,88	0,67	0,85	0,83	0,85	0,89	0,88	0,81
Sesgo (%)	-12,22	-0,94	26,26	35,84	28,09	29,38	19,8	30,53	27,2	16,59
Sesgo relativo	-0,1222	-0,0094	0,2626	0,3584	0,2809	0,2938	0,198	0,3053	0,272	0,1659

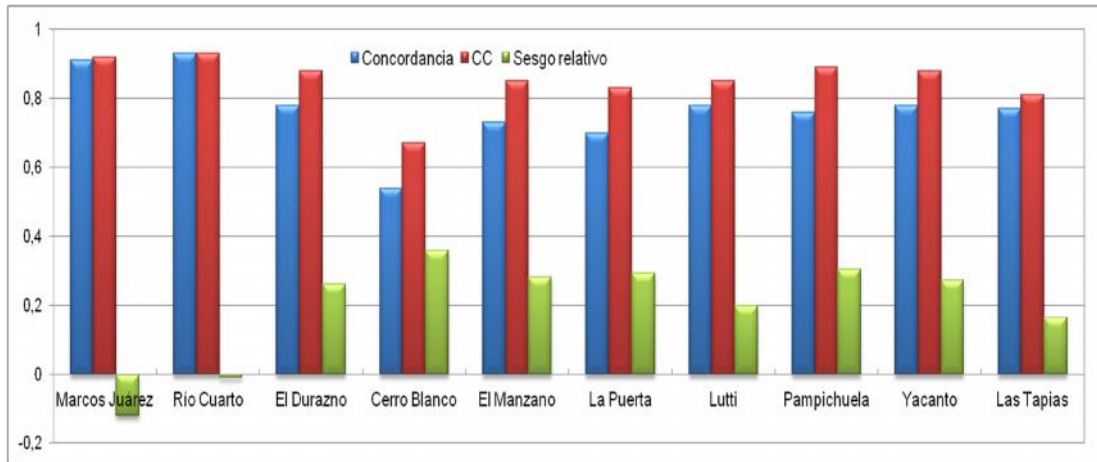


Figura 2.17. Parámetros estadísticos calculados entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para estaciones en la cuenca del río Carcarañá

A continuación, se muestran los gráficos de las series de precipitaciones mensuales observadas y obtenidas por TRMM de tres estaciones, la que mayor CCC presenta: Río Cuarto (Figura 2.18); la que menor: Cerro Blanco (Figura 2.19) y una estación que refleja el valor que más se repite de dicho parámetro: Lutti (Figura 2.20), respectivamente; luego se presentan los gráficos de tales índices de concordancias (Figuras 2.21, 2.22 y 2.23).

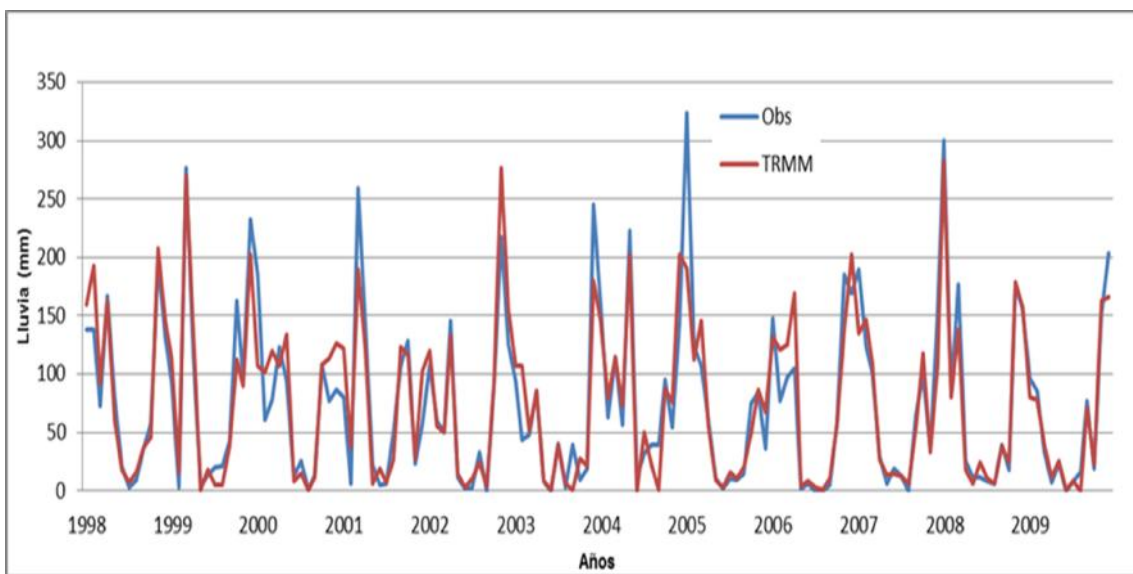


Figura 2.18. Precipitación mensual observada y obtenida a través de TRMM para la estación de Río Cuarto

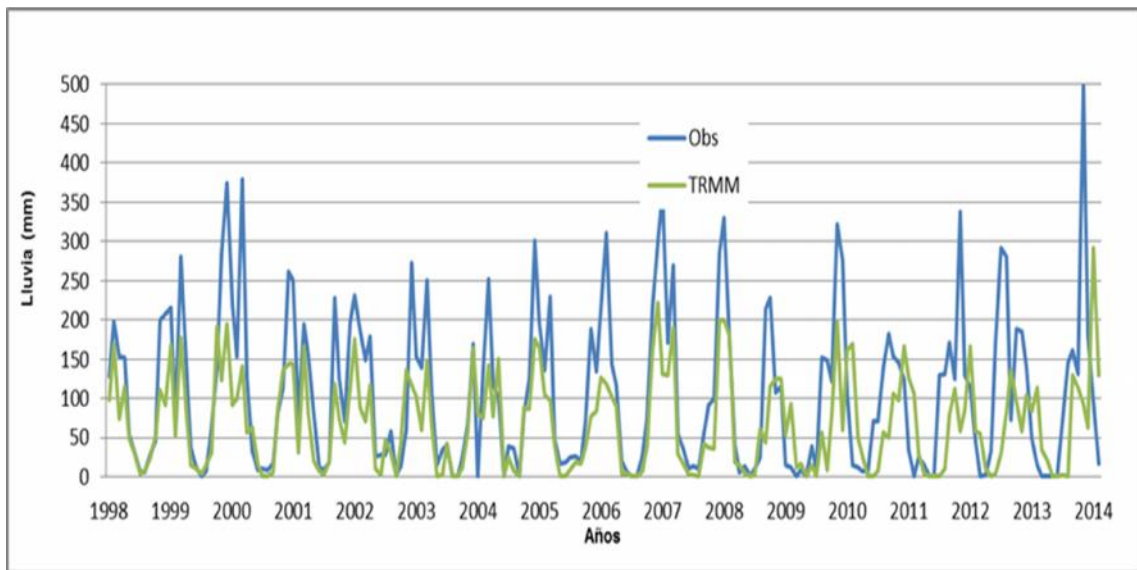


Figura 2.19. Precipitación mensual observada y obtenida a través de TRMM para la estación de Cerro Blanco

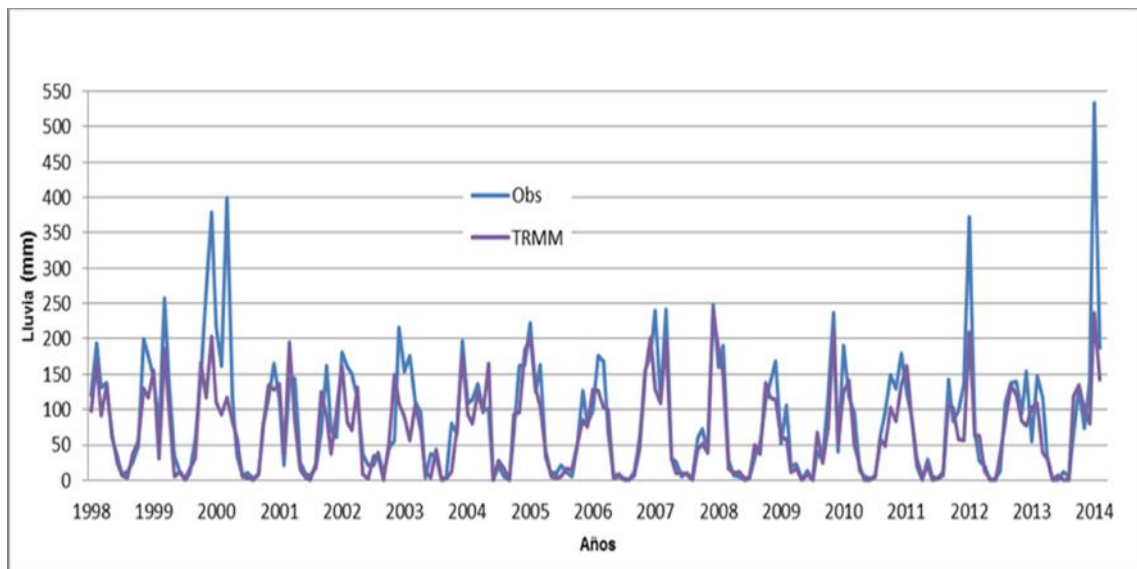


Figura 2.20. Precipitación mensual observada y obtenida a través de TRMM para la estación de Lutti

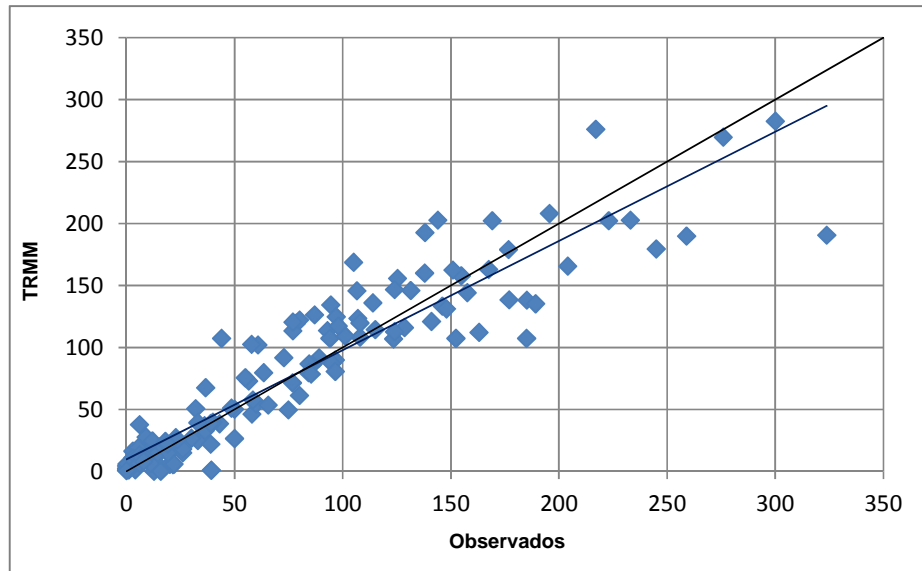


Figura 2.21. Concordancia entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para la localización de la estación de Río Cuarto y su línea de tendencia.

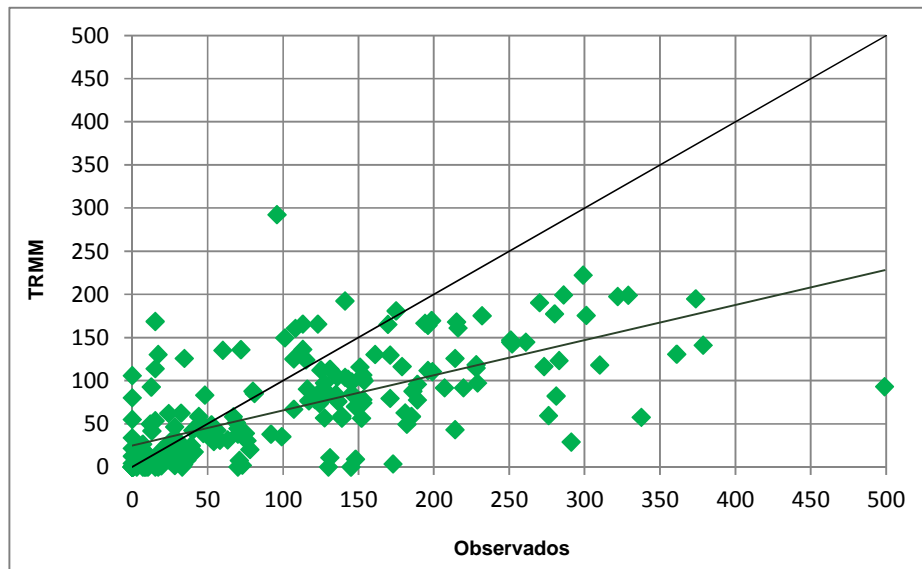


Figura 2.22. Concordancia entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para la localización de la estación de Cerro Blanco y su línea de tendencia.

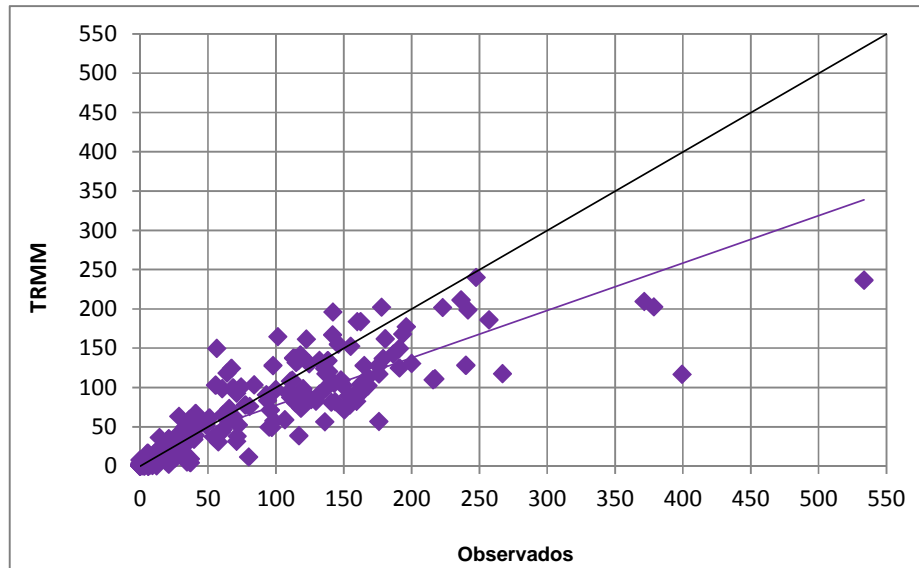


Figura 2.23. Concordancia entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para la localización de la estación de Lutti y su línea de tendencia

Se observa una variación consecuente respecto de la altitud en la que se encuentran emplazadas las mencionadas estaciones, de tal manera que se grafica cada uno de los parámetros respecto de dicha característica topográfica y se muestran en la Figura 2.24. De esta manera se puede visualizar una clara tendencia (negativa o positiva) en los parámetros estadísticos que relacionan las precipitaciones mensuales observadas y las obtenidas con TRMM a medida que las estaciones se encuentran en emplazamientos más elevados.

A partir de lo observado se considera conveniente destacar que los valores de precipitaciones mensuales, son menos confiables en zonas de altura respecto de las áreas de llanura, con lo cual se debe estudiar detalladamente su validez sobre todo para casos locales.

Para evaluar las sequías meteorológicas en tres localizaciones (Río Cuarto, Cerro Blanco y Lutti) se calculó el índice SPI tanto para las series de datos observadas como para las obtenidas por TRMM. Los resultados se muestran en las Figuras 2.25, 2.26 y 2.27, respectivamente. Se observó que al estar el valor de la media en el entorno del cero, el sesgo se desestima y debido a esto los coeficientes de concordancia y de correlación se asemejan.

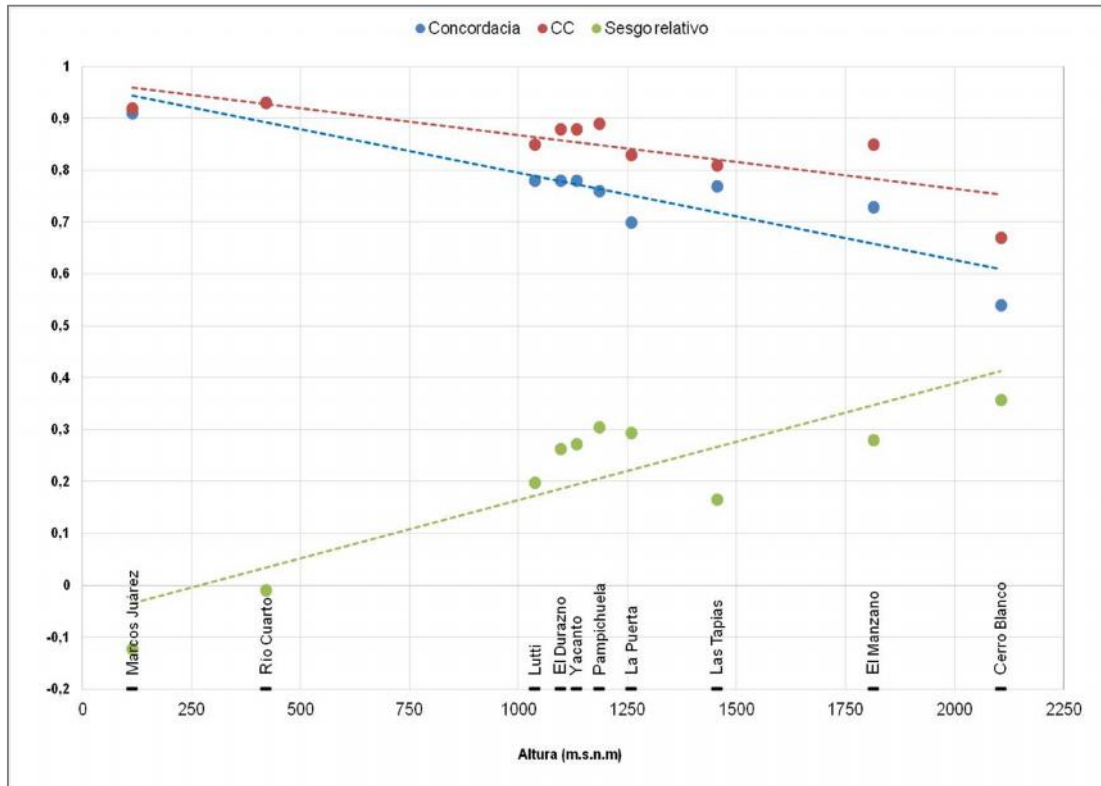


Figura 2.24. Concordancia, correlación y sesgo entre las series de precipitaciones observadas y obtenidas por el TRMM en las estaciones seleccionadas en la cuenca del río Carcarañá, ordenadas según su altura topográfica (m.s.n.m)

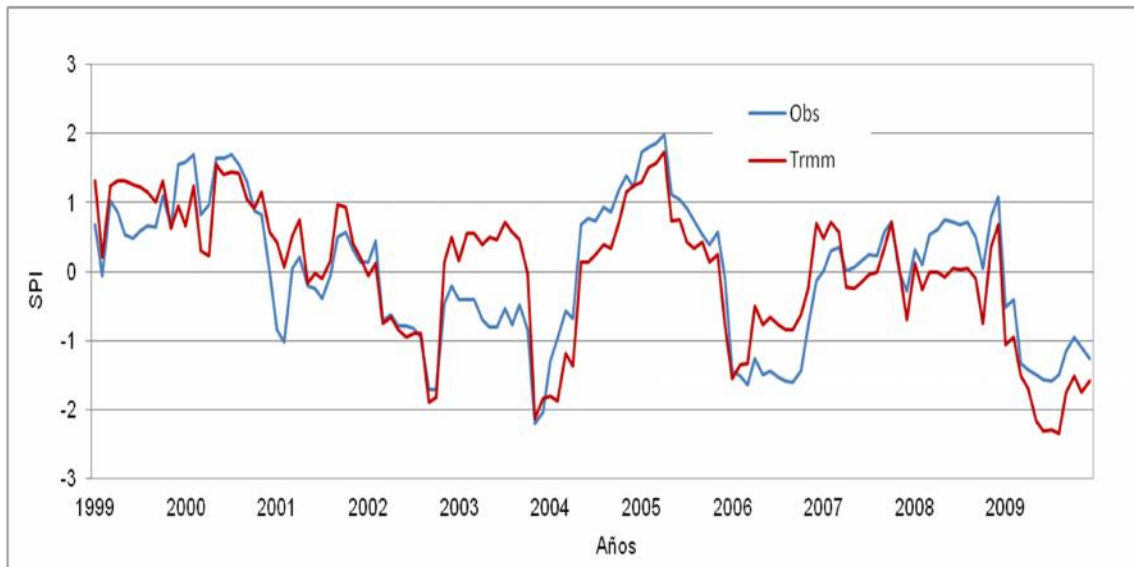


Figura 2.25. Índice SPI calculado a partir de las series de precipitaciones observadas y obtenido con TRMM para la localización de Río Cuarto

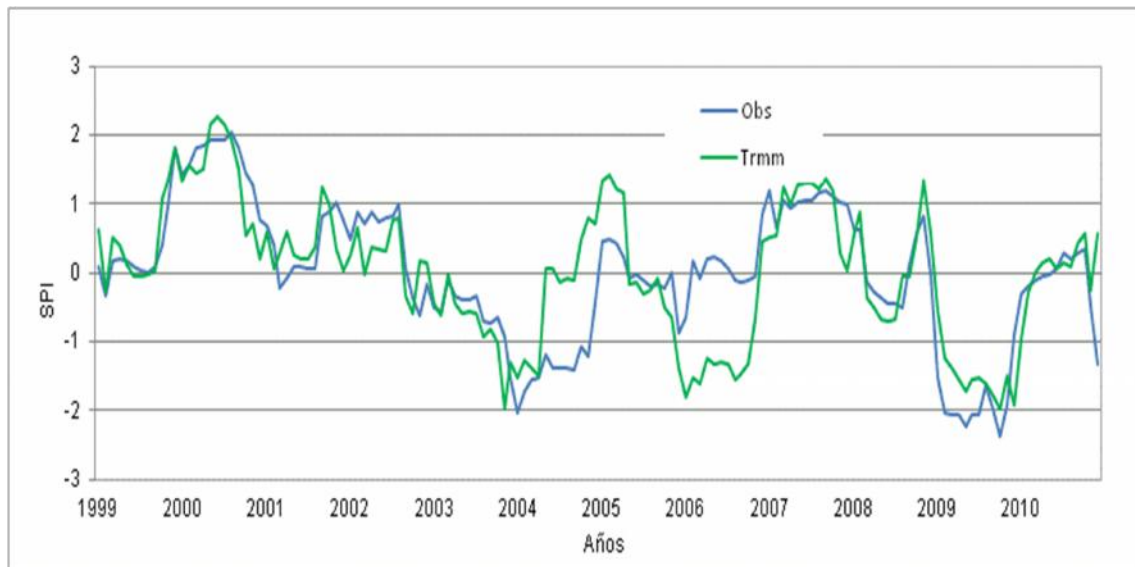


Figura 2.26. Índice SPI calculado a partir de las series de precipitaciones observadas y obtenido con TRMM para la localización de Cerro Blanco

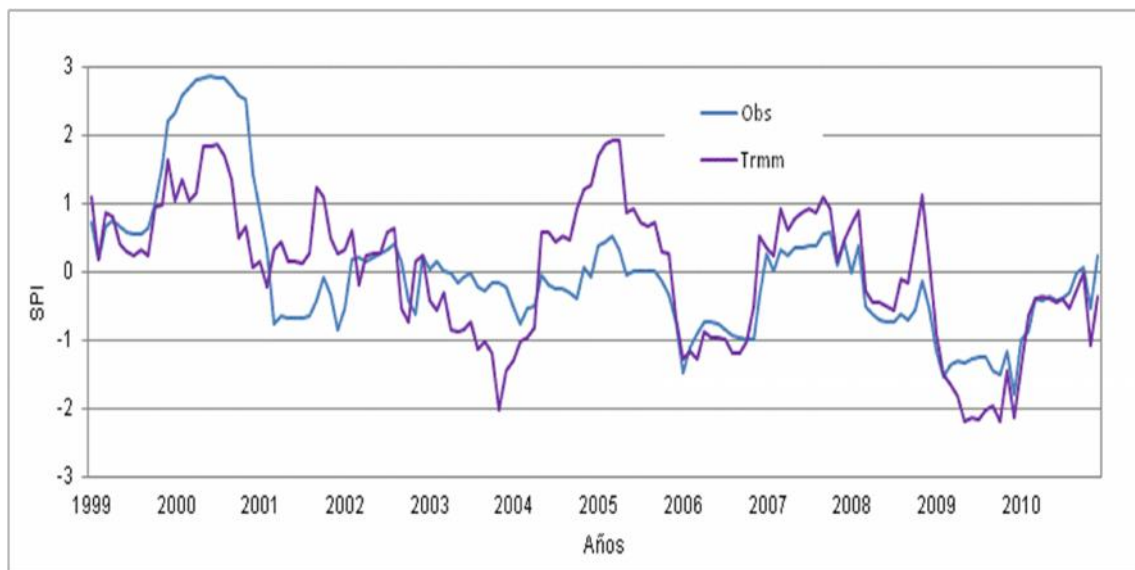


Figura 2.27. Índice SPI calculado a partir de las series de precipitaciones observadas y obtenido con TRMM para la localización de Lutti

En la Tabla 2.12 se muestran los coeficientes para los casos de correlación de las series (observadas y obtenidas por TRMM) de precipitaciones y a partir de éstas, de las series de los índices SPI para las tres localizaciones analizadas. La correlación entre las precipitaciones observadas y calculadas no muestra en primera instancia una proporcionalidad o función coherente con la correlación entre los índices SPI calculados a partir de dichas series. Se observa que en el caso de Río Cuarto y Lutti, la correlación entre los índices de las series decrece entre un 10 y un 16 % respectivamente, mientras que para el caso de Cerro Blanco, la correlación mejora en un 16%.

Tabla 2.12. Coeficientes de Correlación (CC) entre las series de precipitaciones observadas y obtenidas por TRMM y entre sus respectivas series de índice SPI en tres localizaciones analizadas en la cuenca del río Carcarañá.

	Precipitaciones	SPI	Altura (m.s.n.m)
	CC		
Río Cuarto	0,93	0,84	421
Lutti	0,85	0,71	1037
Cerro Blanco	0,67	0,78	2106

2.4.4.2. Cuenca del río San Antonio

En primera instancia se observó que un pixel utilizado para la estimación de precipitaciones a través de TRMM cubría gran parte de la cuenca del San Antonio, es decir que estimaba iguales valores para siete estaciones de un total de 11 y para tres de las cuatro estaciones restantes. Es decir que no resulta posible observar la variabilidad espacial de las precipitaciones en la cuenca, ni la influencia de la topografía en la relación entre datos observados y estimados. Por esto, se decidió utilizar valores promedio de precipitaciones observadas y estimadas a través de TRMM, agregadas en paso de tiempo mensual en cada una de las ubicaciones (definidas por coordenadas geográficas) de las estaciones de la red telemétrica, como así también en el caso puntual de la estación 1200 ya que es una de las estaciones con menos datos faltantes; con la finalidad de comparar resultados y verificar la posibilidad de aplicar información remota para el relleno de series en la cuenca. En la Tabla 2.13 se resumen los parámetros estadísticos como parte de los resultados más relevantes. Luego, para cada caso se muestran los gráficos de las series de precipitaciones mensuales observadas y obtenidas por TRMM (Figuras 2.28 y 2.29, respectivamente) y los gráficos representativos de la concordancia (Figuras 2.30 y 2.31).

Tabla 2.13. Parámetros estadísticos calculados entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para la precipitación promedio y para la estación 1200 de la cuenca del río San Antonio.

	Media areal	1200
Concordancia	0,92	0,83
CC	0,92	0,88
Sesgo (%)	2	5,03
Sesgo relativo	0,032	0,07

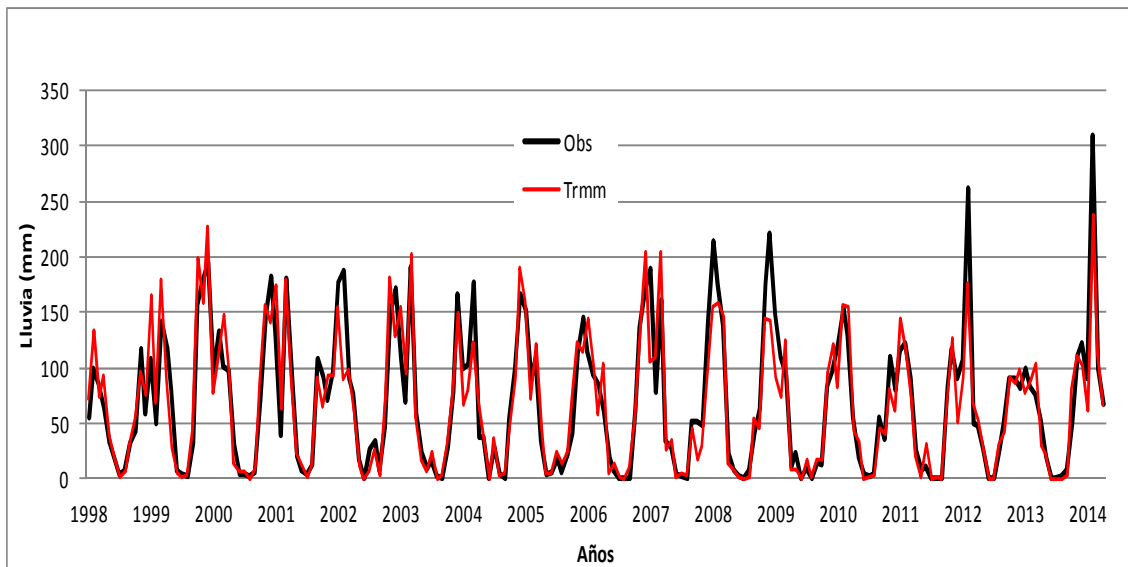


Figura 2.28. Promedio de la precipitación mensual observada y obtenida a través de TRMM en la cuenca del río San Antonio

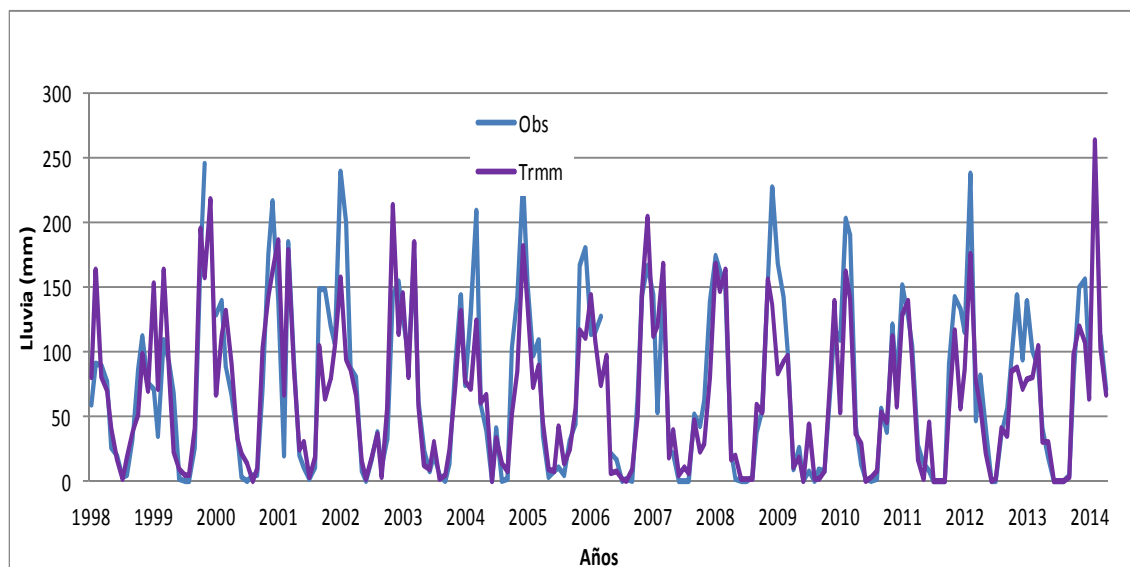


Figura 2.29. Precipitación mensual observada y obtenida a través de TRMM para la estación 1200 de la cuenca del río San Antonio

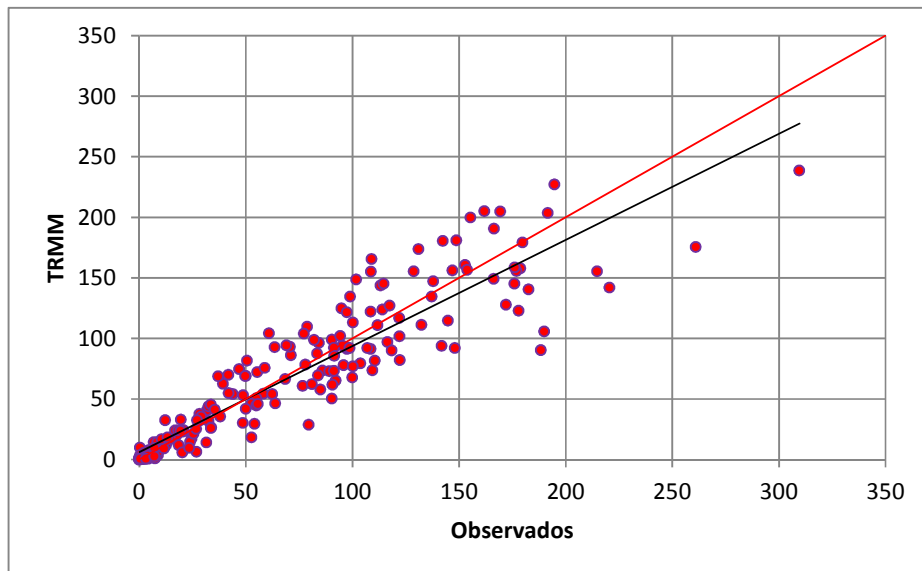


Figura 2.30. Concordancia entre las series promedio de precipitaciones observadas y obtenidas a través de TRMM de la cuenca del río San Antonio y su línea de tendencia

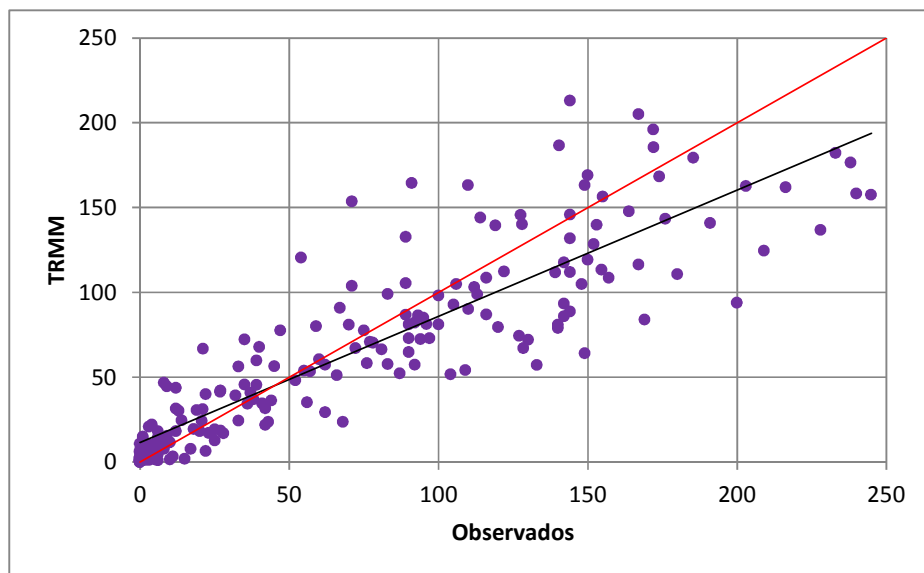


Figura 2.31. Concordancia entre las series de datos observados y obtenidos a través de TRMM para la estación 1200 de la cuenca del río San Antonio y su línea de tendencia

Se considera factible estimar el valor de precipitación media areal de la cuenca a nivel mensual, a partir de datos estimados por TRMM. Sin embargo para poder completar valores faltantes de las series de precipitaciones mensuales en cada estación de la red telemétrica con los estimados por la TRMM (además de que los valores estimados se repiten para varias estaciones) se debe considerar la influencia del sesgo, ya que el mismo demuestra una subestimación de los valores de precipitación obtenidos por TRMM respecto de los observados (esto se condice con los resultados obtenidos para las estaciones de mayor altitud de la cuenca del río Carcarañá).

Para los dos casos analizados en la cuenca se calculó el índice SPI tanto para las series de datos observados como para las obtenidas por TRMM. Tal como se indica en el apartado 2.4.4.1, al estimar los parámetros estadísticos entre las series de este índice, el sesgo se torna insignificante y los coeficientes de concordancia y de correlación se asemejan. En la cuenca del río San Antonio, para el promedio areal de los índices SPI (Figura 2.32) y para la estación 1200 estos coeficientes rondan el valor de 0,75 y 0,55, respectivamente.

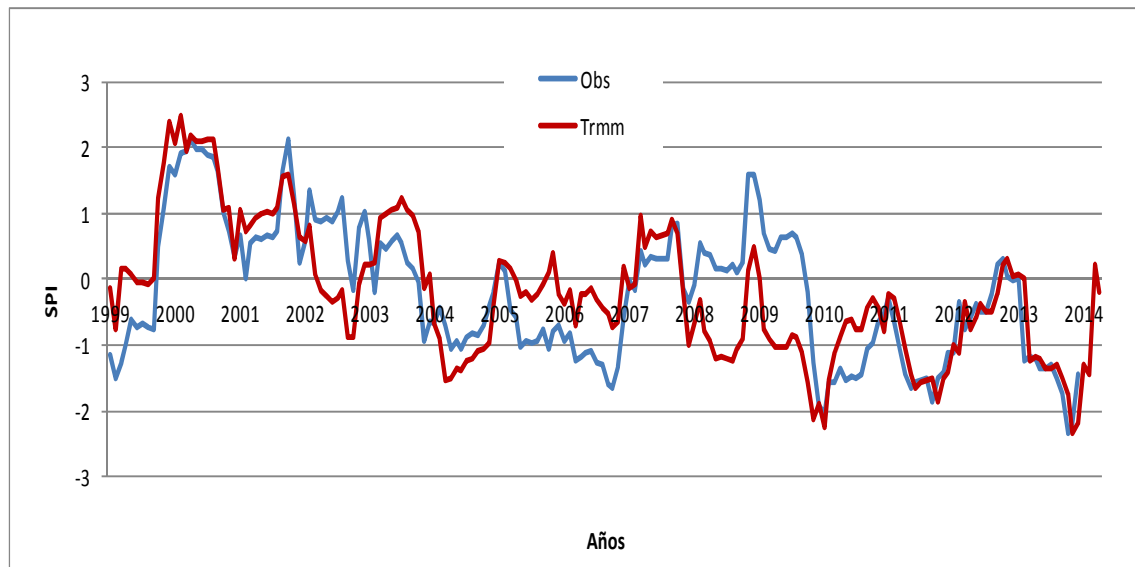


Figura 2.32. Índice SPI calculado a partir de las series promedio de precipitaciones observadas y obtenidas a través de TRMM en la cuenca del río San Antonio

CAPÍTULO 3

***IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN DISTINTAS
ESCALAS ESPACIALES***

3.1. INTRODUCCIÓN

Como se mencionó en el marco referencial de esta tesis, las sequías se clasifican según el objetivo de estudio y la variable hidrológica utilizada. La sequía hidrológica se determina a partir de una reducción en las escorrentías en cursos fluviales, en los niveles de lagos y embalses.

Una de las metodologías utilizadas en la actualidad para identificar y caracterizar sequías hidrológicas se basa en el análisis del índice de sequía hidrológico SDI (por su sigla en inglés: Streamflow Drought Index). Las series históricas de caudales que se utilizan para determinar el índice, presentan variaciones temporales generadas por distintos procesos: a) variaciones en su tendencia temporal debido a cambios climáticos; b) fluctuaciones de baja frecuencia en períodos de varios años como por ejemplo las fluctuaciones generadas por el fenómeno denominado El Niño Southern Oscillation (ENSO por su sigla en inglés); c) fluctuaciones de alta frecuencia debido a variaciones interanuales en el caso de que el análisis se realice en paso de tiempo mensual; d) fluctuaciones aleatorias debido a la aleatoriedad de los procesos hidrológicos y al ruido asociado al registro de los datos. En algunas situaciones, cuando una o más de estas fluctuaciones son relevantes podrían afectar la bondad del modelo del SDI para detectar y cuantificar los periodos de sequía.

En este capítulo se presenta y se evalúa en primera instancia el rendimiento del índice SDI para caracterizar periodos de déficit y excesos con distintos intervalos de tiempo de agregación. La evaluación se realiza utilizando series sintéticas que incluyen componentes esperables de todas las fluctuaciones temporales citadas anteriormente, con la finalidad de analizar sus influencias en la serie de caudales medios mensuales y su efecto en la identificación y caracterización de sequías hidrológicas en distintos intervalos de tiempo. La ventaja de utilizar series sintéticas es que sus características son conocidas y definidas a priori. Para ello se generan dos conjuntos de series sintéticas, en los cuales se utilizan los principales parámetros estadísticos (por ejemplo el promedio y desvío estándar) representativos de una serie histórica de caudales de un curso fluvial de llanura y por otro lado, los representativos de un río de montaña.

Luego, una vez que el índice ha sido validado con series sintéticas se lo aplica a dos cuencas con características diferentes en la zona de estudio (Región Centro de Argentina) con el objetivo de evaluar las sequías hidrológicas.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Información utilizada

En la región de la llanura pampeana se utilizaron datos de caudales medios mensuales registrados en el período 1981-2013 pertenecientes a la única estación hidrométrica activa en la cuenca baja del río Carcarañá, denominada Pueblo Andino (32° 40' 24,00"S; 60° 51' 57,40"W), la cual se encuentra emplazada dentro de la provincia de Santa Fe a 30 km, aproximadamente, antes de la desembocadura de dicho río al sistema del río Paraná (Figura 1.12).

En el caso de la zona de montaña se utilizan los registros hidrológicos de la cuenca del río San Antonio, específicamente de la estación de aforo construida en Barrio El Canal o N° 600 (Figura 1.11) ya que constituye el cierre artificial de la cuenca del río San Antonio (Colladón y Pazos, 2014).

3.2.2. Índice seleccionado para evaluar sequías hidrológicas

Para analizar las sequías hidrológicas se utilizó el índice de sequía hidrológica SDI desarrollado por Nalbantis (2008). La aplicación del SDI es una herramienta que permite realizar de forma sencilla la determinación y clasificación de las sequías que pueden ocurrir en una cuenca. Sin embargo, su cálculo requiere datos de caudal de alta calidad y de longitud suficiente para estimar con precisión la frecuencia de los eventos de sequía (Wagner Gómez *et al.*, 2012).

Nalbantis (2008) indica que este índice de sequía se basa en el análisis de los valores de caudales, volúmenes o escurrimientos agregados durante períodos de tres, seis, nueve y doce meses dentro de cada año hidrológico, denominados k1, k2, k3 y k4, respectivamente. Dichos intervalos permiten analizar, en caso de que se detecten eventos de sequías, la evolución de los mismos dentro de cada periodo considerado.

Para estimar este índice se calcula:

$$V_{ik} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{ij}$$

$$i = 1,2, \dots, n; j = 1,2, \dots, 12; k = 1,2,3,4$$

Donde V_{ik} corresponde a los caudales acumulados para el año i (desde 1 hasta n cantidad de datos), en j meses correspondientes a los respectivos intervalos k .

Siendo:

$$SDI_{ik} = \frac{V_{ik} - V_k}{s_k}$$

Donde SDI_{ik} es el índice de sequía de caudales para el año i y el intervalo considerado k . V_k y s_k son, respectivamente, el valor promedio y desvío estándar de todos los valores de V para el intervalo k considerado en la serie de datos históricos. Los rangos de valores del índice SDI para calificar el nivel de las sequías hidrológicas se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores del índice SDI según los distintos estados de sequía hidrológica (Nalbantis, 2008)

Descripción	Criterio
Sin sequía	$SDI_{i,k} > 0$
Sequía suave	$-1 \leq SDI_{i,k} < 0$
Sequía moderada	$-1,5 \leq SDI_{i,k} < -1$
Sequía severa	$-2 \leq SDI_{i,k} < -1,5$
Sequía extrema	$SDI_{i,k} < -2$

3.2.3. Series sintéticas de caudales y aplicación del índice SDI

La hidrología estocástica se basa en la premisa de que las series históricas de datos temporales varían según una componente determinística y otra probabilística. La necesidad de profundizar y validar estudios relacionados a los recursos hídricos y debidos a la escasez de registros hidrometeorológicos para tal fin ha motivado el análisis de distintos fenómenos hidrológicos a través de la generación de series sintéticas. Dicho procedimiento se enmarca dentro de la hidrología estocástica ya que tiene la finalidad de observar y cuantificar la influencia de las distintas componentes que conforman un modelo representativo de una determinada variable hidrológica, siendo el de Thomas y Fiering (1962) uno de los primeros estudios al respecto y luego se desarrollaron otras técnicas (Moreno Cadavid y Salazar, 2008).

Para validar la implementación del índice SDI para identificar sequías hidrológicas, se generaron series de datos sintéticas asumiendo que la variación de distintas componentes contribuye al valor del caudal medio mensual Q (m^3/s) en un tiempo t determinado.

Donde:

$$Q(t) = Q_{0(t)} + Q_{af(t)} + Q_{bf(t)} + Q_{a(t)}$$

Siendo:

$Q_{0(t)}$: componente representativa de la tendencia lineal para un tiempo t .

$Q_{af(t)}$: componente representativa de la señal de alta frecuencia para un tiempo t .

$Q_{bf(t)}$: componente representativa de la señal de baja frecuencia para un tiempo t .

$Q_{a(t)}$: componente aleatoria para un tiempo t .

Ejemplos de los procesos que podrían ser representados por estas componentes son: variabilidad o cambio climático para $Q_{0(t)}$; variabilidad interanual para $Q_{af(t)}$; fluctuaciones generadas por el fenómeno ENSO o manchas solares para $Q_{bf(t)}$ y variabilidad propia de los fenómenos climáticos para $Q_{a(t)}$ (Díaz, 2016).

Luego, las series sintéticas se generaron con características estadísticas similares a la observada en la estación Pueblo Andino (Tabla 3.2 y Figura 3.1) y se determinaron los siguientes parámetros: la tendencia lineal $Q_{0(t)}$ se definió primero con un valor medio constante = $80 \text{ m}^3/\text{s}$ (siendo este el valor aproximado a la media histórica de la serie) y luego, sobre ese valor inicial se adoptó una pendiente positiva y negativa, correspondiente al 8% de variación a lo largo de 360 meses. La señal de alta frecuencia $Q_{af(t)}$ se consideró representada por la función seno con período $T = 12$ meses y amplitud (A) variable (0, 5, 25 y $45 \text{ m}^3/\text{s}$) correspondiente a las series de valores mensuales. La señal de baja frecuencia $Q_{bf(t)}$ se representó por la función seno con período $T = 96$ meses (ocho años) y una amplitud (A) constante de $45 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente a fenómenos meteorológicos recurrentes con períodos mayores al anual y la componente aleatoria $Q_{a(t)}$ se representó por 360 valores generados de manera aleatoria con media cero y desvío estándar (DS) variable (0, 10, 20, 30, 35 y $40 \text{ m}^3/\text{s}$). De esta manera se generaron un total de 48 series sintéticas, con las características detalladas en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2. Parámetros estadísticos de la serie de caudales medios mensuales de la estación Pueblo Andino

Estadística descriptiva	
Media	82
Error típico	3
Mediana	63
Moda	101
Desvío estándar	59
Varianza	3429
Curtosis	7
Coef. de asimetría	2
Rango	386
Mínimo	16
Máximo	402

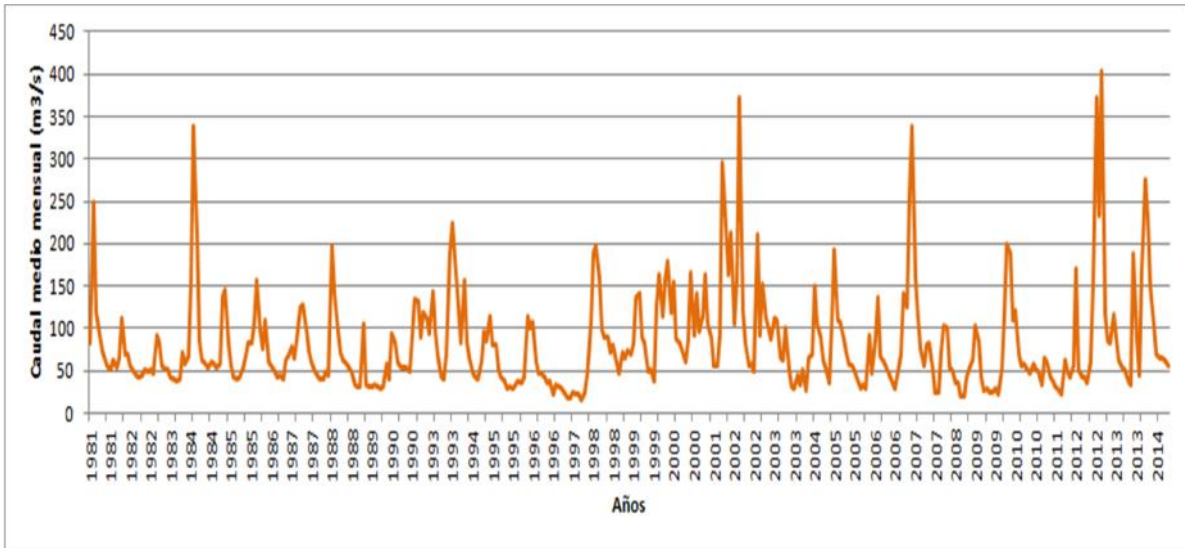


Figura 3.1. Caudales medios mensuales de la estación Pueblo Andino en la cuenca del río Carcarañá

Tabla 3.3. Parámetros utilizados en las distintas componentes que conforman las series sintéticas de caudales medios mensuales (Q)

Componente	Parámetro	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7	Grupo 8	Grupo 9	Serie 10	Serie 11	Serie 12
Tendencia (b=80 m³/s)	Pendiente	nula	(+)	(-)	nula	(+)	(-)	nula	(+)	(-)	nula	(+)	(-)
Qaf (T=12 meses)	A (m³/s)	45	45	45	25	25	25	5	5	5	0	0	0
Qbf (T=96 meses)	A (m³/s)	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Qa (m³/s)	DS (a)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	0
	DS (b)	20	20	20	20	20	20	20	20	20			
	DS (c)	30	30	30	30	30	30	30	30	30			
	DS (d)	35	35	35	35	35	35	35	35	35			
	DS (e)	40	40	40	40	40	40	40	40	40			

Se calcularon los índices SDI en cada intervalo (k1, k2, k3 y k4) con los grupos de series sintéticas 1, 4 y 7 (con tendencia lineal nula) y la Serie 10 considerada como referencia para estos grupos. Luego, se cuantificaron y se compararon las diferencias entre dichos índices para evaluar los efectos de los distintos procesos en la determinación del índice SDI y por ende, en la caracterización de las sequías hidrológicas. A continuación se describen los parámetros utilizados en la comparación en función de las diferencias que se pretenden cuantificar.

En cuanto a los parámetros representativos del contraste en la magnitud de las sequías definida por índice SDI se cuantificó:

- Máxima diferencia relativa del pico: muestra el máximo valor hallado de las diferencias entre cada valor extremo de los índices de la serie sintética y el valor correspondiente del índice de la serie de referencia para el mismo período.
- Error cuadrático medio: Corresponde al promedio de los cuadrados de las diferencias de cada uno de los valores de los índices de la serie sintética con su respectivo valor del índice calculado con la serie de referencia.

Respecto del parámetro representativo de la duración relativa del período de sequía definida por índice SDI se estimó:

- Cantidad relativa de cruces en cero: Está definido por la cantidad de veces que la función correspondiente a los índices SDI de la serie sintética cambia de signo, respecto de la cantidad de veces ocurridas para los índices de la serie de referencia.

Por último para representar los parámetros representativos del desfase entre las series de índices SDI se evaluaron:

- Eventos opuestos: muestra la cantidad de veces que un valor de SDI de la serie sintética posee signo opuesto a su correspondiente valor de SDI de la serie de referencia.
- Diferencia de Covarianza: Se establece como un valor indicativo del desfase general entre los índices de la serie sintética y la serie de referencia, a través de la diferencia entre uno y la covarianza de ambas series.

Posteriormente, se realiza la sumatoria de dichos parámetros para cada serie sintética definida y para cada intervalo k , con el fin de obtener un valor característico que indique los casos que mejor ajustan a una situación ideal predefinida y por ende, los que no lo hacen. Luego, para evaluar la influencia de la tendencia $Q_{0(t)}$, se seleccionó una serie para los tres casos de tendencia (nula, positiva y negativa) y se aplicó a las mismas el procedimiento antes descripto. Además, se analizó la influencia de la componente aleatoria $Q_{a(t)}$, aplicando la metodología ya mencionada a una serie sintética, a la cual se le modificó solamente dicha componente una cantidad de 10 veces.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. Evaluación del índice SDI utilizando series sintéticas

Con respecto a la aplicación y cuantificación de las diferencias entre los SDI de las series sintéticas seleccionadas y su correspondiente serie de referencia, se observa que para el intervalo $k1$ del índice SDI, las series presentan grandes diferencias respecto de la serie de referencia (en la Figura 3.2), donde se muestra un caso a modo de ejemplo, mientras que las diferencias disminuyen a medida que se incrementa el intervalo de análisis (Figuras 3.3 y 3.4) mejorando notoriamente el ajuste para el caso de $k4$ (Figura 3.5). Es decir, que a partir del intervalo $k2$, no se observa una diferencia marcada debido a la variación de la amplitud de la componente de alta frecuencia $Q_{af(t)}$.

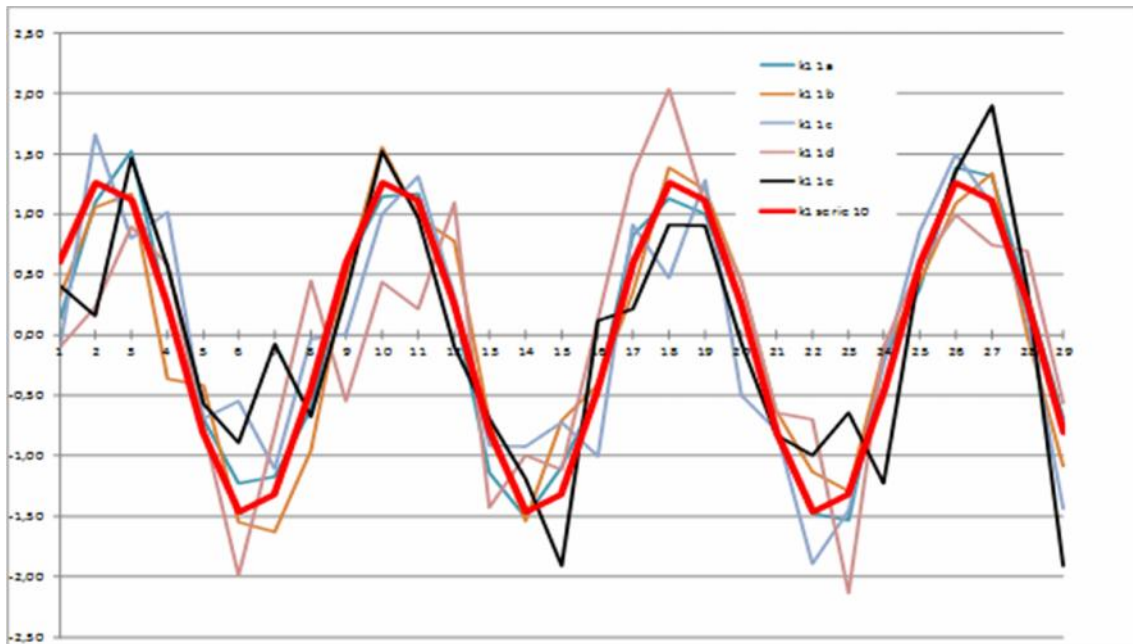


Figura 3.2. Valores del índice SDI (k1) de las series sintéticas del grupo 1 y la serie de referencia 10

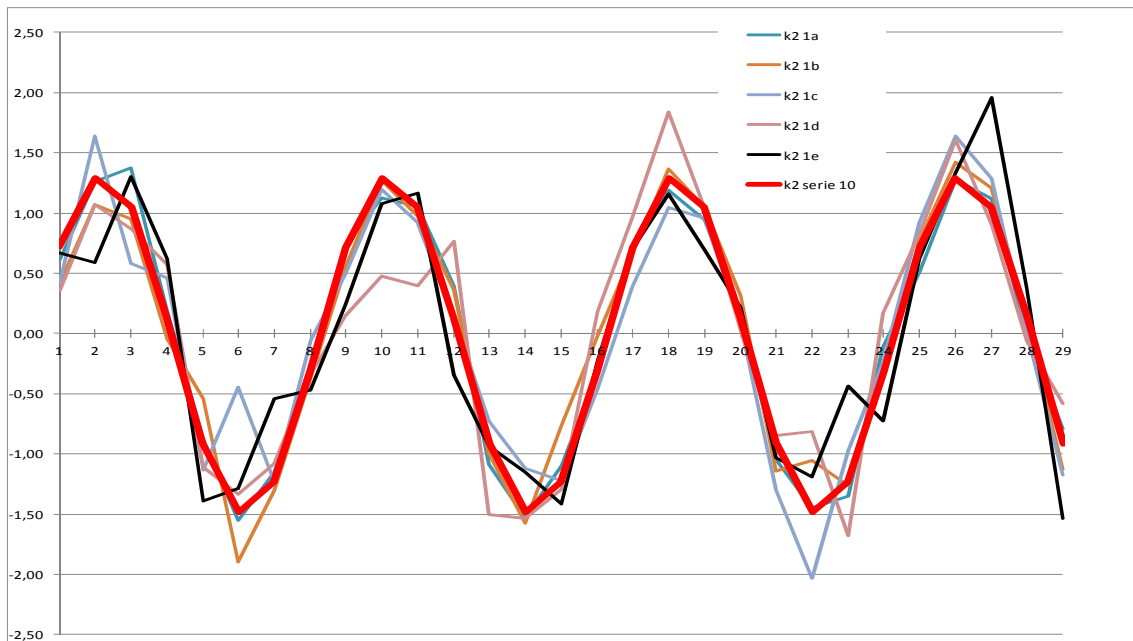


Figura 3.3. Valores del índice SDI (k2) de las series sintéticas del grupo 1 y la serie de referencia 10

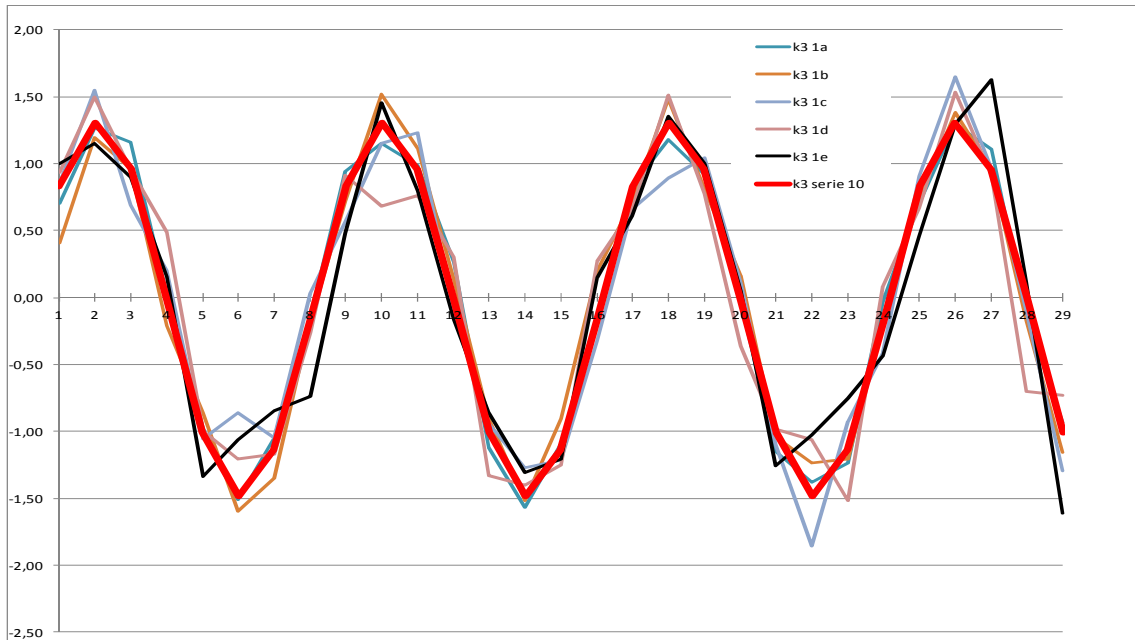


Figura 3.4. Valores del índice SDI (k3) de las series sintéticas del grupo 1 y la serie de referencia 10

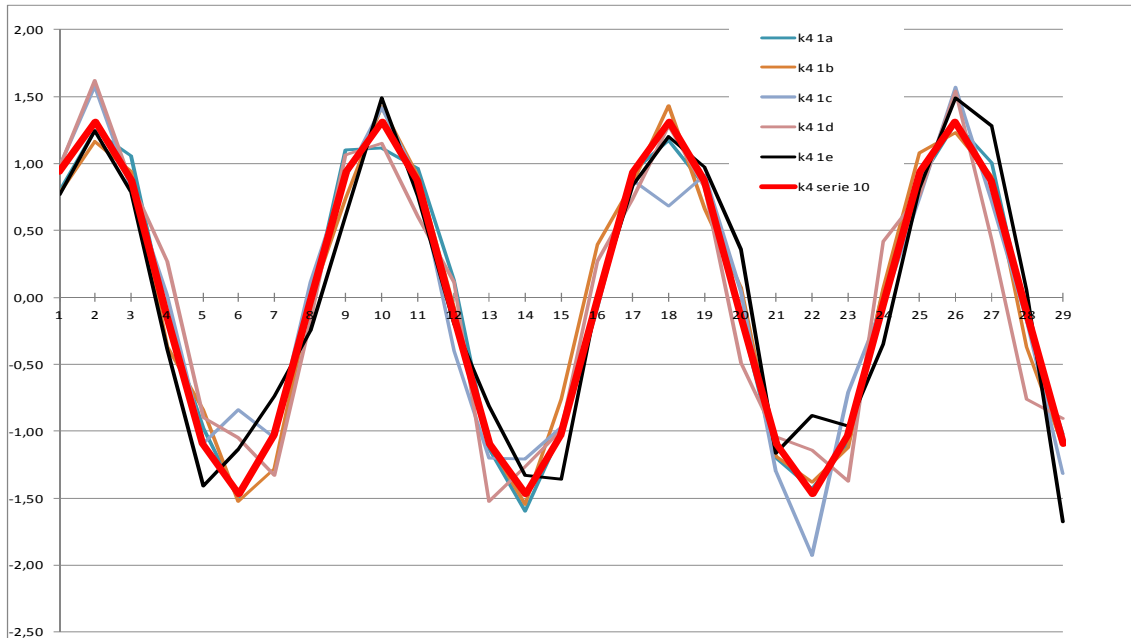


Figura 3.5. Valores del índice SDI (k4) de las series sintéticas del grupo 1 y la serie de referencia 10.

En general y para los cuatro intervalos k, las series denominadas “a” son las que menor diferencia presentan con la serie de referencia. Es decir, que a medida que se incrementa el desvío estándar de la componente aleatoria $Q_{a(t)}$, el comportamiento de la serie sintética se aleja de la serie de referencia planteada para el análisis de las sequías hidrológicas, se muestra un ejemplo para el intervalo k3 en la Figura 3.6.

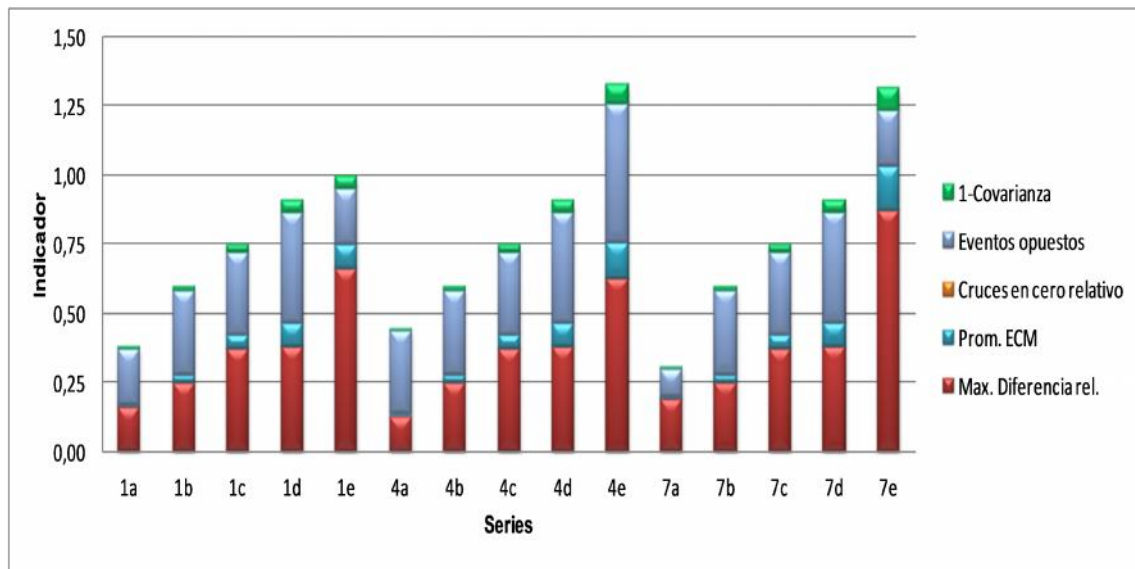


Figura 3.6. Indicador del ajuste de los índices SDI (para el intervalo k3) de las series sintéticas correspondientes a los grupos 1, 4 y 7 respecto de la serie de referencia 10.

Con el fin de analizar la influencia de las tendencias definidas por la componente $Q_{0(t)}$ se seleccionaron casos de una misma serie para los grupos con tendencia nula, positiva y negativa. Un ejemplo de las series b (desvío estándar de $20 \text{ m}^3/\text{s}$) de los grupos 1, 2 y 3 se muestran en las Figuras 3.7 a 3.10, respectivamente, para los distintos intervalos k.

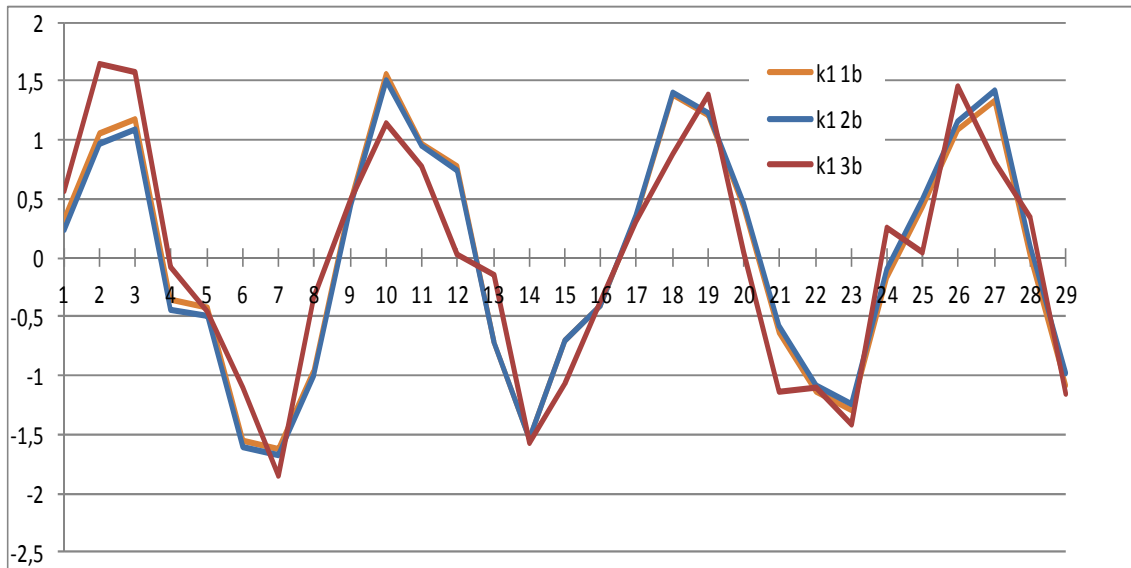


Figura 3.7. Índice SDI (k1) de las series sintéticas b de los grupos 1 (tendencia nula), 2 (tendencia positiva) y 3 (tendencia negativa).

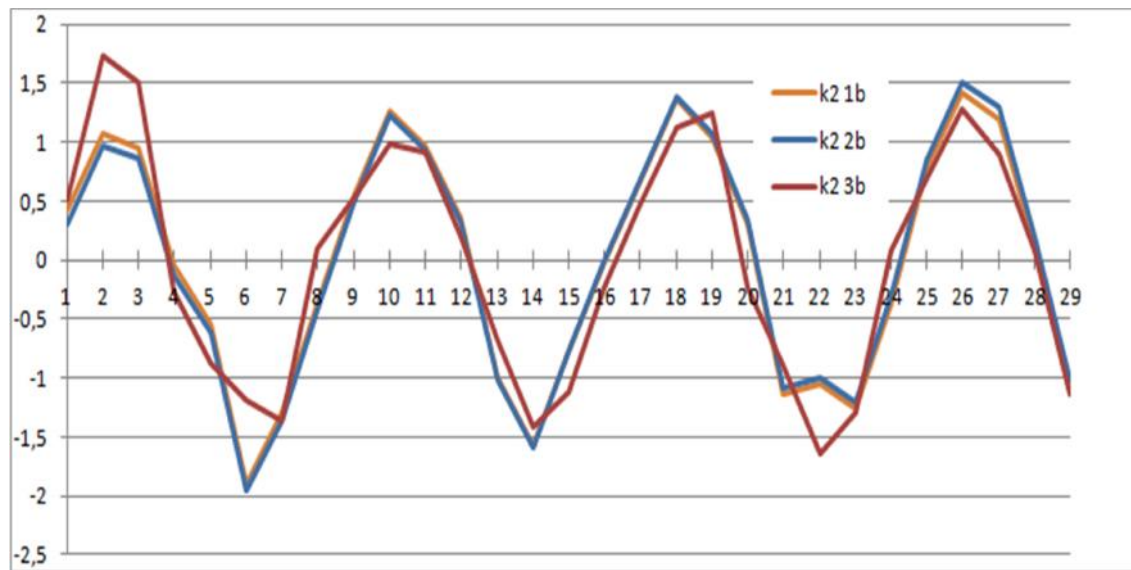


Figura 3.8. Índice SDI (k2) de las series sintéticas b de los grupos 1 (tendencia nula), 2 (tendencia positiva) y 3 (tendencia negativa).

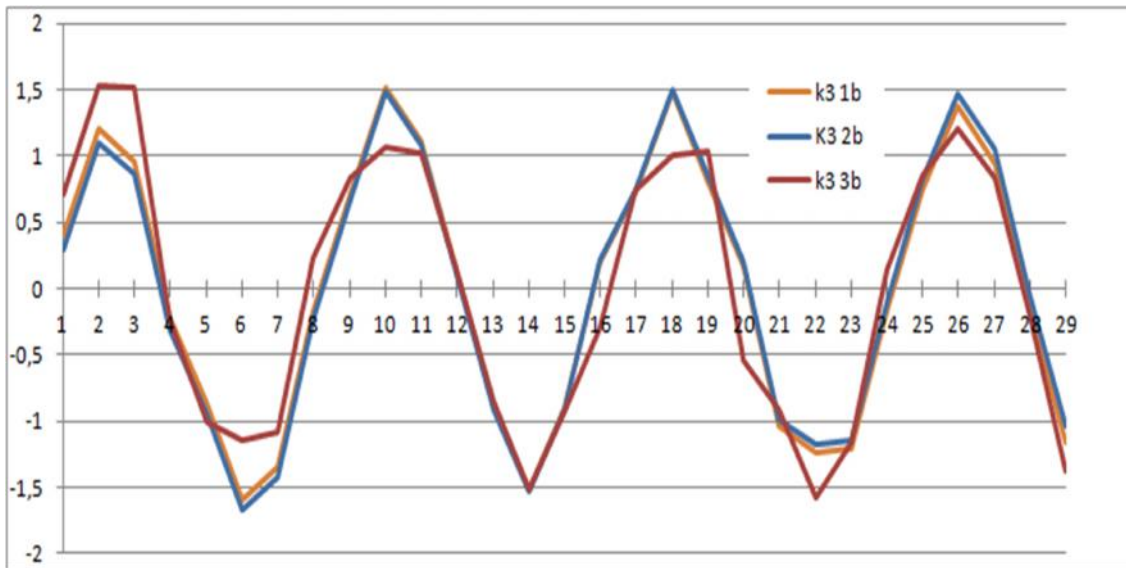


Figura 3.9. Índice SDI (k3) de las series sintéticas b de los grupos 1 (tendencia nula), 2 (tendencia positiva) y 3 (tendencia negativa).

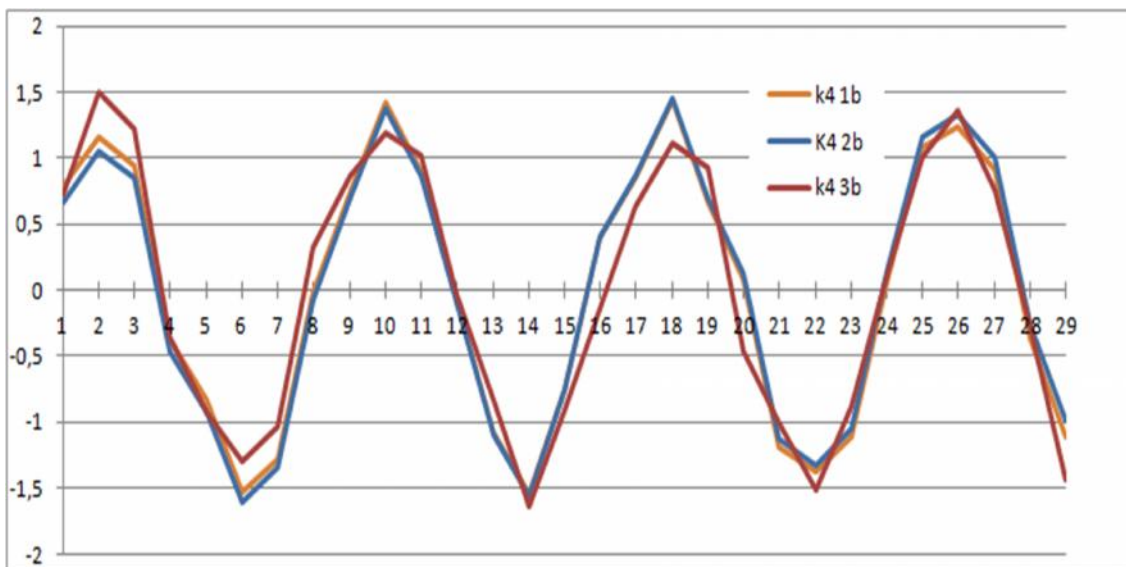


Figura 3.10. Índice SDI (k4) de las series sintéticas b de los grupos 1 (tendencia nula), 2 (tendencia positiva) y 3 (tendencia negativa).

Las gráficas no son iguales para distintas pendientes de la tendencia ya que se pudo observar variaciones en los indicadores de ajuste del índice SDI respecto del mismo índice de sus correspondientes series de referencia para los distintos k analizados. Lo que muestra que se deben tener en cuenta las variaciones en las tendencias hidrometeorológicas históricas a nivel regional, en caso de disponer de información confiable.

Para evaluar la influencia de la componente aleatoria en la conformación de las series sintéticas para el posterior análisis de las sequías hidrológicas a través del índice SDI, se adopta como caso de estudio la serie sintética 1c y se modifica 10 veces su componente aleatoria. Se observó que la influencia de la aleatoriedad es mayor para el intervalo k_1 y disminuye a medida que se utilizan k superiores. El intervalo k_4 presenta el menor promedio entre los indicadores, es decir que a nivel general, tienen menor magnitud. Por lo que, se considera conveniente utilizar el intervalo k_4 para evitar una influencia importante de la componente aleatoria de las series sintéticas en el análisis de las sequías hidrológicas a través del índice SDI. En la Figura 3.11 hasta la Figura 3.14 se muestra la variabilidad debido a la modificación (10 veces) de la componente aleatoria $Q_{a(t)}$ en una serie seleccionada (1c) en los intervalos k_1 , k_2 , k_3 y k_4 , respectivamente.

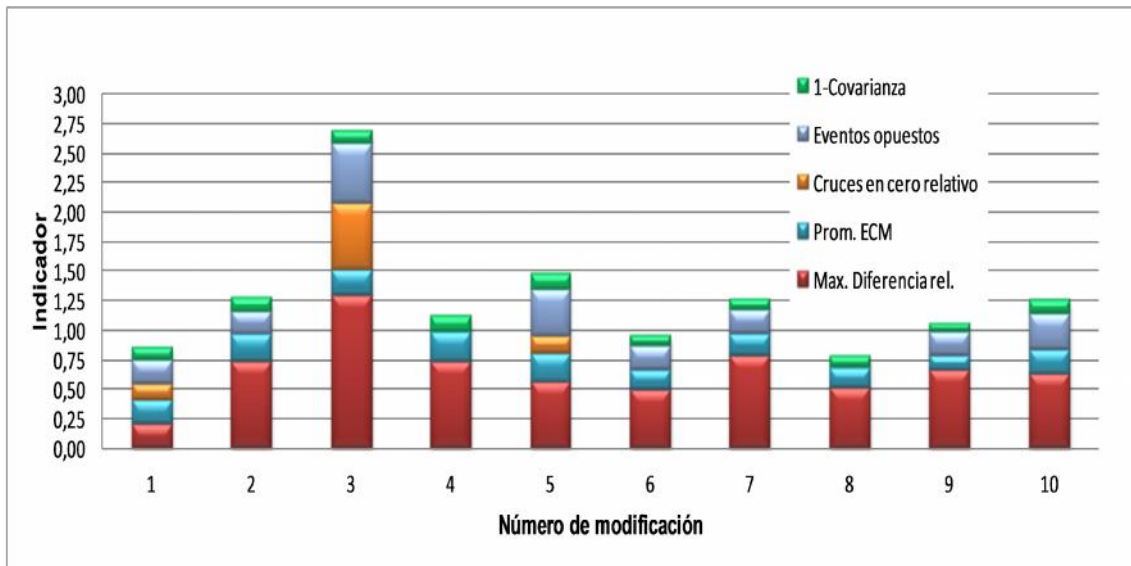


Figura 3.11. Indicador del ajuste de los índices SDI (para el intervalo k_1) de la serie sintética 1c con la componente aleatoria modificada (10 veces) respecto de su serie de referencia

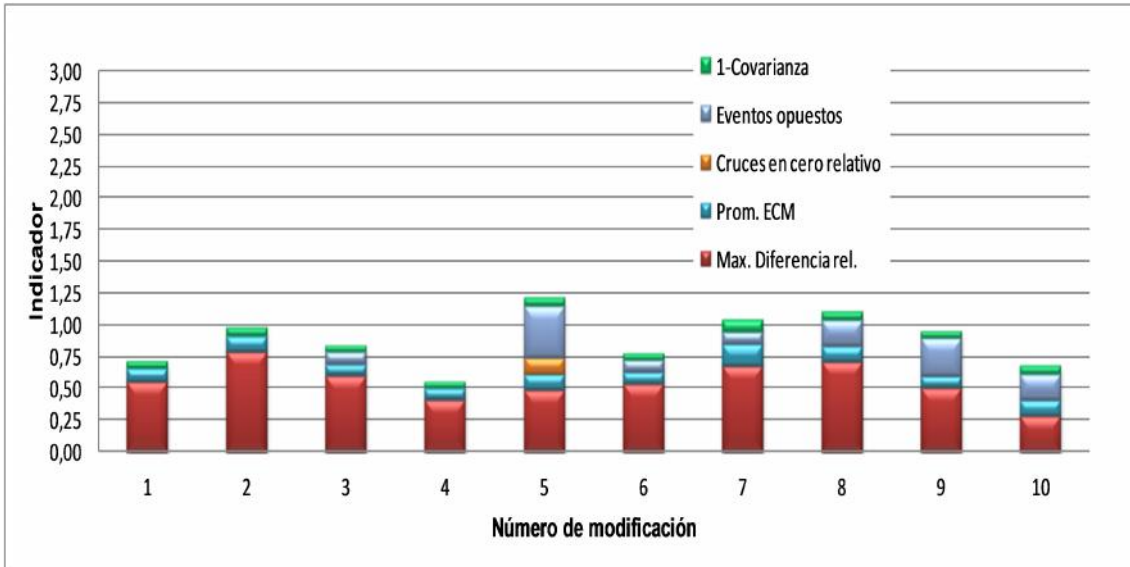


Figura 3.12. Indicador del ajuste de los índices SDI (para el intervalo k2) de la serie sintética 1c con la componente aleatoria modificada (10 veces) respecto de su serie de referencia

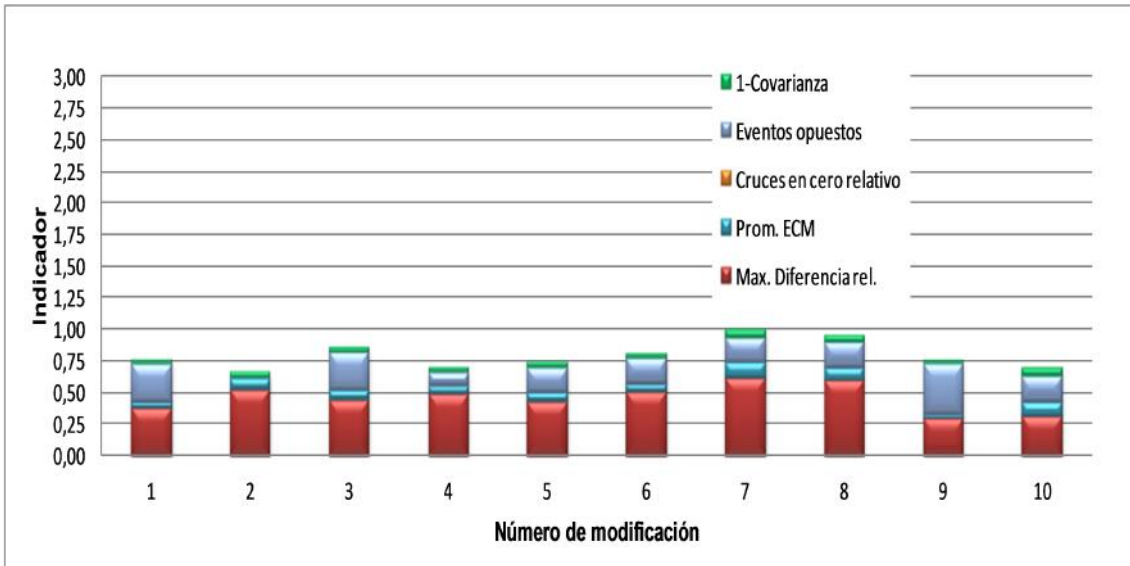


Figura 3.13. Indicador del ajuste de los índices SDI (para el intervalo k3) de la serie sintética 1c con la componente aleatoria modificada (10 veces) respecto de su serie de referencia

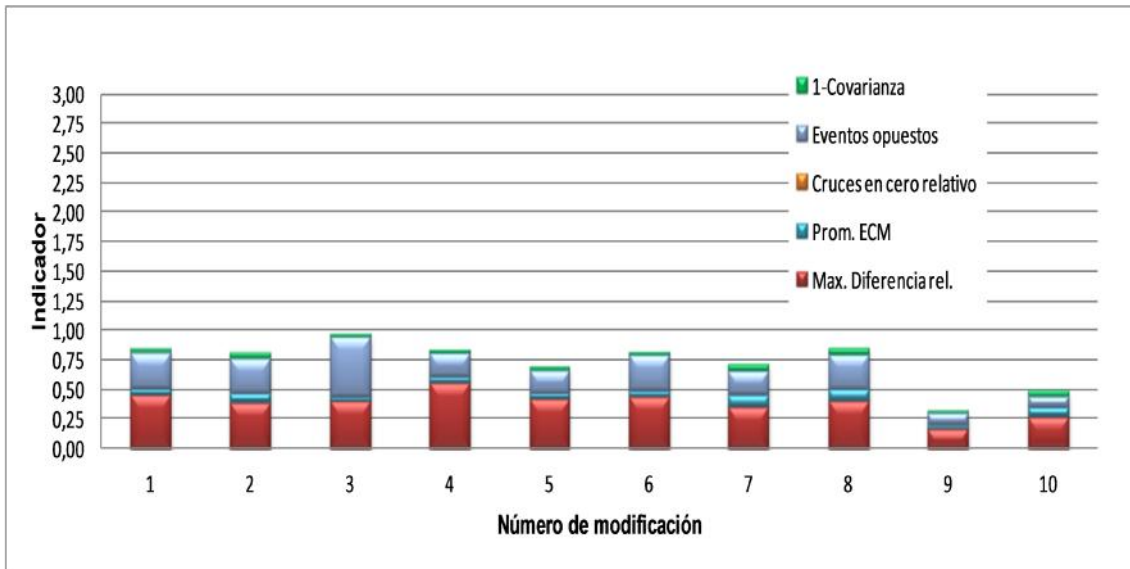


Figura 3.14. Indicador del ajuste de los índices SDI (para el intervalo k4) de la serie sintética 1c con la componente aleatoria modificada (10 veces) respecto de su serie de referencia

3.3.2. Evaluación de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Carcarañá y en la cuenca del río San Antonio

Según lo analizado en el apartado 3.3.1, es factible evaluar las sequías hidrológicas en dos cuencas con distintas características dentro de la región de estudio, a través del índice SDI en el intervalo k4. Se calcularon los índices de sequía hidrológica SDI en la estación Pueblo Andino (cuenca del río Carcarañá) y en la estación Barrio El Canal (cuenca del río San Antonio), los mismos y sus líneas de tendencia se muestran en las Figuras 3.15 y 3.16, respectivamente. Cabe destacar que los periodos corresponden a los años cuyos datos mensuales de caudales están completos. En la estación Pueblo Andino se observa que no se cuentan con datos suficientes para el cálculo del índice entre los años 1991-1993.

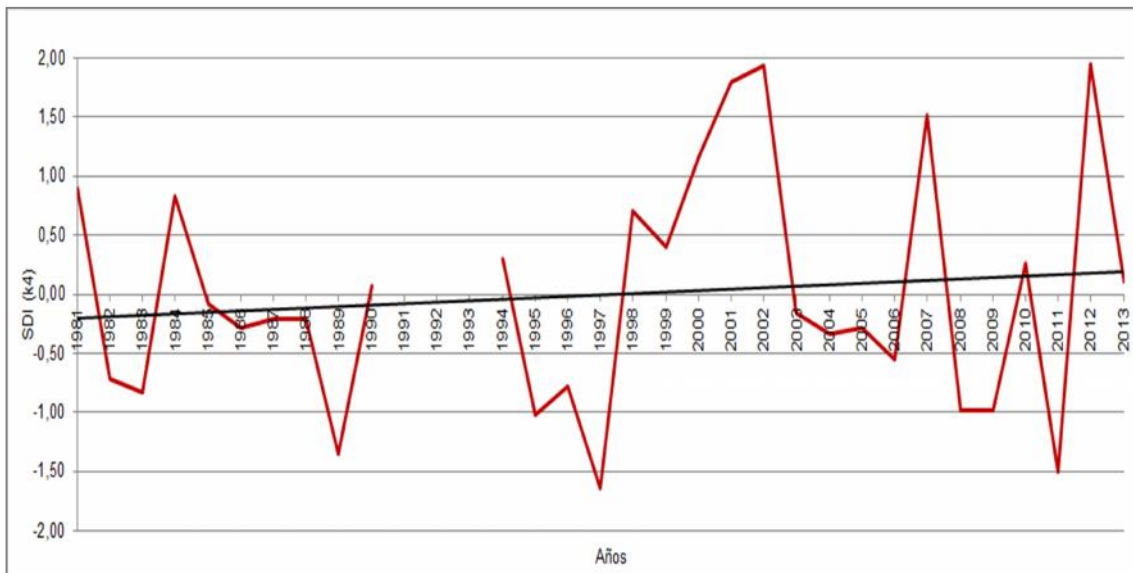


Figura 3.15. Índices SDI (k4) y su línea de tendencia en la estación Pueblo Andino de la cuenca del río Carcarañá. Periodo 1981-2013.

Como se puede observar en el caso de la estación de Pueblo Andino, se registraron sequías suaves en torno a los periodos 1982-1983, 2003-2006, 2008-2009. Desde el año 1985 hasta 1990, en el año 2010 y parte del 2011 ocurrieron periodos de sequías suaves y moderadas. Además se registró solo un periodo seco con un evento severo entre los años 1994 y 1997. Cabe destacar que hacia el año 2013 se observa una fuerte disminución de los valores del índice SDI.

En el caso de la estación Barrio el Canal se observaron sequías hidrológicas suaves desde el año 2004 hasta el 2007 y desde el año 2009 hasta el 2011; siendo periodos secos, similares a los ocurridos en el caso anterior. En el año 2013, se identifica un periodo con sequía al menos, moderada.

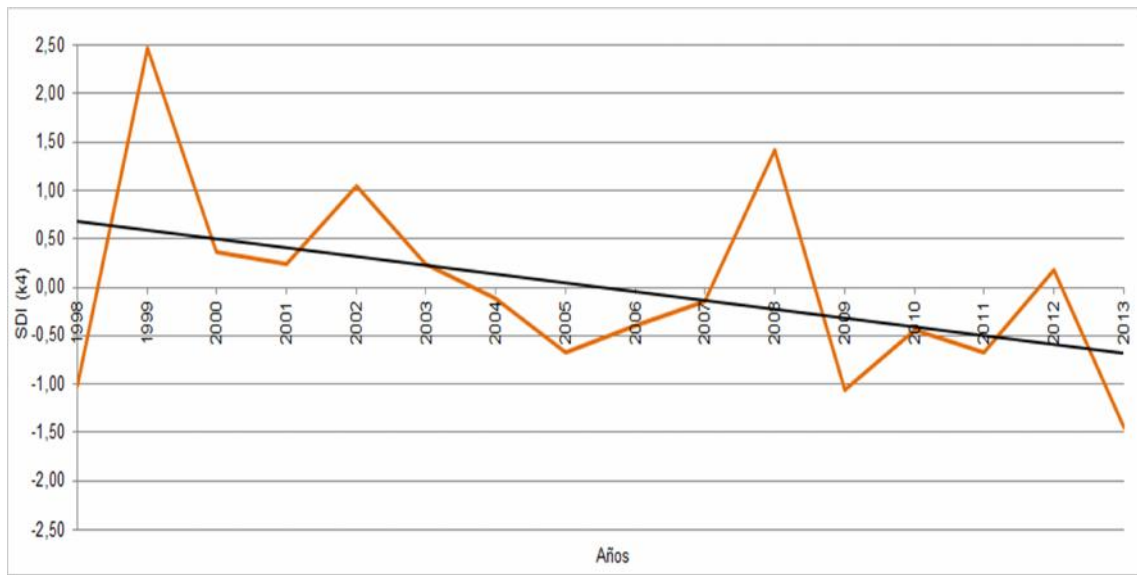


Figura 3.16. Índices SDI (k4) y su línea de tendencia en la estación Barrio El Canal de la cuenca del río San Antonio. Período 1998-2013

Comparativamente, las tendencias de los índices SDI son opuestas entre las estaciones analizadas, siendo en el primer caso positiva, y en el segundo caso negativa, lo cual evidenciaría un posible proceso de déficit hídrico en la zona serrana.

Además se pudo observar que de la cantidad de años evaluados a través del índice SDI en cada una de las estaciones, en Pueblo Andino el 43% presentó la ocurrencia de una sequía suave y con igual frecuencia se dieron sequías moderadas y severas (6,7%). Mientras que en la estación Barrio El Canal el 37,5% de los años evidenció una sequía suave y el 12,5% una sequía moderada. En ninguno de los casos ocurrieron años con sequías extremas (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Frecuencias (%) de años con algún tipo de sequía hidrológica para el intervalo k4 del índice SDI

Tipo de sequía según SDI	Frecuencia (%)	
	Est. Barrio El Canal (San Antonio)	Est. Pueblo Andino (Carcaraña)
Suave	37,5	43,0
Moderada	12,5	6,7
Severa	0	6,7
Extrema	0	0

CAPÍTULO 4

***RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES E ÍNDICES
REPRESENTATIVOS DE SEQUÍAS
METEOROLÓGICAS E HIDROLÓGICAS***

4.1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad hidrometeorológica afecta de distinta manera a la Región Centro de la Argentina, no solo debido a la variabilidad meteorológica existente sino también a la interacción de la misma con diversos factores geográficos, topográficos, antrópicos, etc. Dada la importancia socioeconómica de dicha región dentro del país, el análisis y evaluación de las relaciones temporales entre las variables representativas precipitación y caudal adquiere gran relevancia en el plano de los recursos hídricos, además de su relevancia en el estudio de los fenómenos hidrológicos extremos, tales como los distintos tipos de sequía.

El objetivo fundamental del presente capítulo es la evaluación de la relación entre las variables relevantes que describen a las sequías meteorológicas y a las sequías hidrológicas, como lo son la precipitación y el caudal, respectivamente, como así también de los índices representativos de cada tipo de las sequías mencionadas. Este análisis se realiza en dos cuencas con diferentes características, una de gran tamaño de llanura y una cuenca serrana pequeña, dentro de la Región Centro de Argentina.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. Información utilizada

Se analizaron datos de las cuencas del río Carcarañá y San Antonio. La descripción de las mismas se realizó previamente en el apartado 1.5. En esta sección se muestran las áreas de aporte de los principales tributarios ya que esta información es requerida para el análisis realizado en este capítulo. En la Tabla 4.1 y Figura 4.1 se detallan y muestran, respectivamente, las subcuencas del río Tercero, del río Saladillo, del arroyo Tortugas y se identifican dos áreas de importancia para el análisis realizado en este capítulo denominadas subcuenca Interior y Baja, en la cuenca del río Carcarañá. En la Tabla 4.2 y Figura 4.2 se muestran tres subregiones en base a la altitud en la cuenca del río San Antonio.

Tabla 4.1. Subcuencas de aporte del río Carcarañá. Superficies aproximadas y porcentajes respecto del total de la superficie de la cuenca

Denominación de la subcuenca	Superficie [km ²]	% del total de la cuenca
río Tercero	9380	16
río Saladillo	12420	21
arroyo Tortugas	11430	19
Interior	14825	25
Baja	11370	19

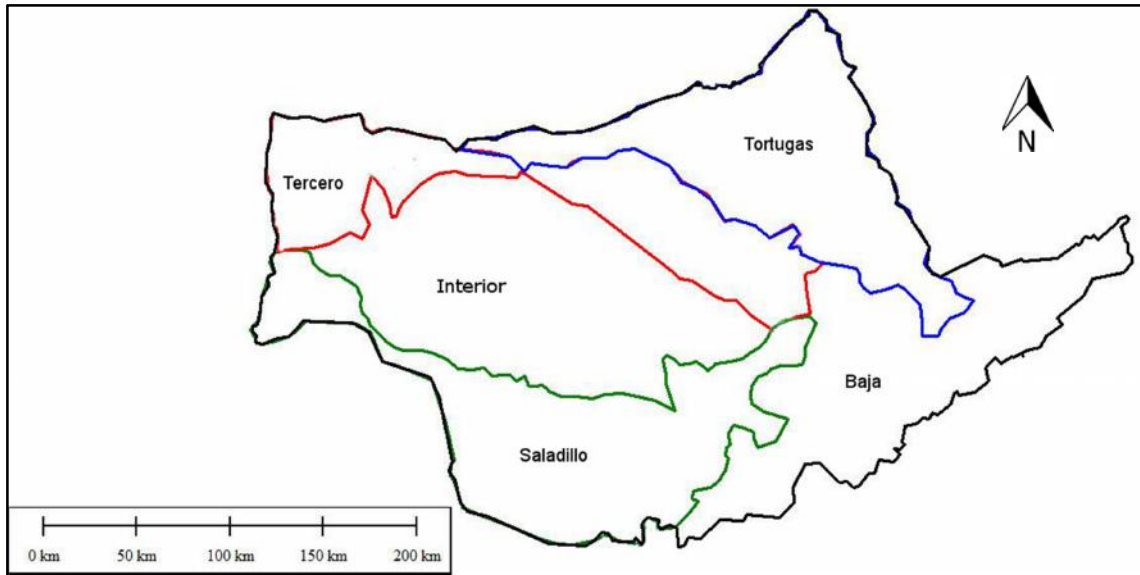


Figura 4.1. Esquema de las subcuencas de los ríos Tercero, Saladillo, y del arroyo Tortugas. Se indican las denominadas subcuencas Interior y Baja, en la cuenca del río Carcarañá.

Tabla 4.2. Regiones de aporte de la cuenca del río San Antonio según la altitud

Denominación de la región	Limites [msnm]	Superficie [km ²]	Altura media [msnm]
Alta	Más de 2000	108	2190
Media	Desde 1200 a 2000	205	1532
Baja	Menos de 1200	205	873

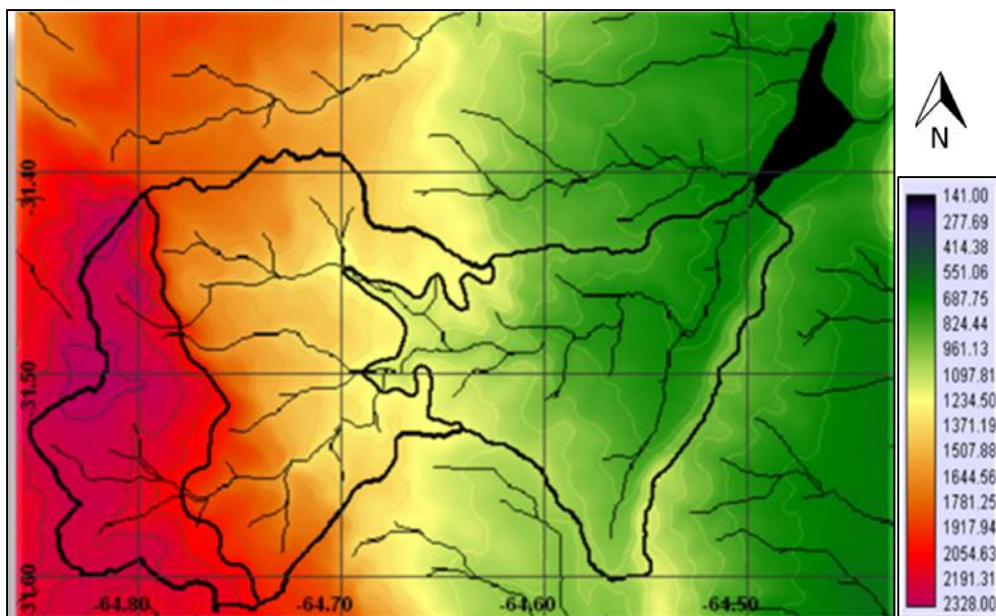


Figura 4.2. Regiones de aporte denominadas: alta, media y baja (identificadas con los colores rojo, amarillo y verde, respectivamente) en la cuenca del río San Antonio. Fuente: Gil Montero (2009).

4.2.1.1. Cuenca del río Carcarañá

Para lograr una mejor caracterización de la información pluviométrica es necesario evaluar distintas alternativas de fuentes de datos, ya que solamente se contaban con dos estaciones pluviométricas con series históricas útiles en toda el área de estudio como lo son las estaciones Marcos Juárez y Río Cuarto. Con el fin de lograr una mejor cobertura espacial se utilizaron valores de precipitaciones estimadas a través de la TRMM obtenidos a nivel diario y agregados en paso de tiempo mensual. En el apartado 2.4 de la presente tesis se evaluó la validez de la información estimada, lo que posibilita su utilización en el presente capítulo.

En esta cuenca se establecieron 80 localizaciones (píxeles) de la TRMM, de manera arbitraria pero distribuida homogéneamente dentro de la cuenca del río Carcarañá (Figura 4.3) y se obtuvieron las precipitaciones diarias que luego fueron agregadas en paso de tiempo mensual. Para caracterizar la variabilidad espacial de las precipitaciones mensuales con la finalidad de evaluar si el comportamiento del régimen pluviométrico en la superficie de la cuenca es homogéneo o no, se utilizó el Índice de Homogeneidad Climática (IHC) el cual fue definido por García (2013) para evaluar la variabilidad de las láminas precipitadas diarias por la frecuencia de distintos tipos de tormenta que da origen a las mismas; ya sean convectivas (con una pequeña área de influencia pero intensas) o frontales (con un área de influencia amplia y de características más uniformes). En este estudio el IHC se estima utilizando la precipitación media areal de un periodo de tiempo determinado por la precipitación máxima registrada en dicho periodo para una localización dada. Los valores cercanos a uno indicarían la ocurrencia de tormentas homogéneas y valores cercanos a cero indicarían tormentas localizadas y heterogéneas en el periodo de tiempo analizado. Con respecto a los caudales, al igual que en el capítulo anterior, se utilizaron los valores medio mensuales pertenecientes a la única estación hidrométrica activa en la cuenca baja del río Carcarañá denominada Pueblo Andino (Figura 3.1)

En la Figura 4.3 se observa la distribución espacial de los 80 puntos definidos para el cálculo de los valores de precipitación de la TRMM, además de las ubicaciones de las estaciones pluviométricas de Marcos Juárez y Río Cuarto y de la estación hidrométrica Pueblo Andino.

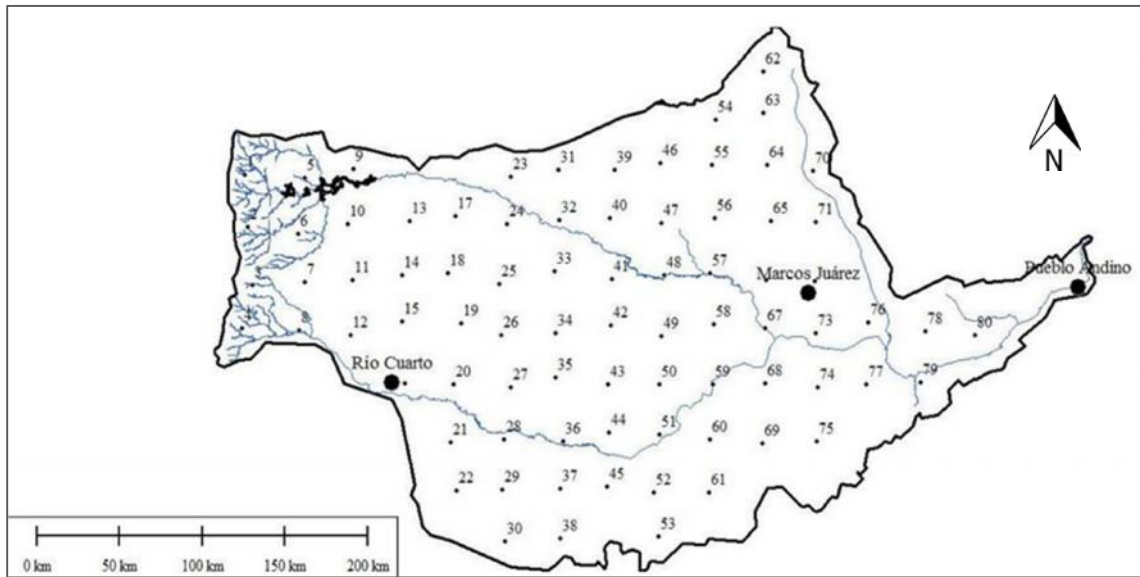


Figura 4.3. Localización de los puntos denominados del 1 al 80 con datos estimados de precipitaciones (TRMM) y ubicaciones de las estaciones pluviométricas de Marcos Juárez y Río Cuarto y de la estación hidrométrica Pueblo Andino.

4.2.1.2. Cuenca del río San Antonio

En la cuenca del río San Antonio se cuentan con una importante densidad de registros de precipitaciones de las estaciones correspondientes a la red telemétrica del INA-CIRSA (Figura 1.11). Debido a que dichas series tenían registros faltantes (periodo 1998-2014) se utilizaron valores de precipitaciones estimadas a través de la TRMM, agregadas en paso de tiempo mensual, en cada punto de ubicación de las estaciones existentes para completar los registros faltantes en las series observadas. Una vez definidas las series de datos de cada estación utilizada en la cuenca del río San Antonio se aplicó el indicador IHC (sección 4.2.1.1).

Se utilizaron datos de caudales medios mensuales pertenecientes a la estación hidrométrica ubicada a la salida de la cuenca del río San Antonio, identificada con el N° 600 o denominada Barrio El Canal. Esta estación cuenta con la curva altura – caudal (H-Q), pero debido a distintas causas de orden operacional y técnico, los registros son escasos (aproximadamente el 46% en el periodo utilizado) y poco confiables (Vicario *et al.*, 2007).

García (2013) aplicó y validó varios modelos hidrológicos distribuidos para completar la serie de datos de caudales mensuales en el período 1998-2014, en la estación mencionada previamente. El autor consideró que el modelo hidrológico que hace una mejor representación de

la forma del hidrograma y que mostró un mayor índice de eficiencia es el llamado J2K (Krause, 2000 y 2002). De tal manera que en el presente trabajo se utiliza la serie de caudales mensuales estimados a partir de este modelo.

4.2.2. Metodología utilizada para el análisis de datos

Para relacionar los datos estimados de precipitaciones de la TRMM en la cuenca del río Carcarañá con los registros observados de caudal escurridos en el cierre de la cuenca, se procedió a agrupar los valores de las localizaciones determinadas para la TRMM, según dos criterios: a) Se agruparon respetando las divisiones físicas de las cinco subcuencas demarcadas en la Figura 4.1 y b) Se agruparon según el método estadístico de conglomerados. Para el primer caso, simplemente se identificaron los puntos contenidos en cada subcuenca, se agruparon y se obtuvo el valor promedio de precipitaciones para cada una. A través del análisis de conglomerados, cuya metodología se encuentra descripta en el apartado 2.3.3, se determinaron tres, cinco y siete conjuntos de puntos para observar la eficacia de la metodología en función de la cantidad de divisiones que se realice sobre la información. Para las respectivas instancias se calcularon los valores promedios de precipitaciones de cada uno de los grupos, los cuales se identificaron por color. Para relacionar los datos observados de precipitaciones en las distintas estaciones de la cuenca del río San Antonio con los registros estimados de caudal en el cierre de la cuenca, se procedió a agrupar los puntos según dos criterios a) Se agruparon respetando las divisiones físicas de las tres regiones demarcadas en la Figura 4.2 y b) Se agruparon según el método estadístico de Conglomerados. Para el primer caso, simplemente se identificaron las estaciones contenidas en cada región (alta, media y baja) y se obtuvo el valor promedio de las precipitaciones para cada una. En el análisis de Conglomerados se determinaron 3 conjuntos de estaciones en función de que sea fácilmente comparable con la cantidad de regiones físicas analizadas previamente y en relación a la densidad de estaciones existentes. Luego se calcularon los valores promedios de precipitación para cada uno de los grupos, los cuales se identificaron por color.

Para establecer la correlación entre las variables de precipitación (P) - caudal (Q) en ambas cuencas, se utilizó el coeficiente de correlación (CC) y se evalúa a través del método de Pearson (sección 2.4.3). De esta manera, se evaluó la relación entre valores de precipitaciones mensuales de cada grupo discriminado por subcuenca y por conglomerados, con los caudales

mensuales de las estaciones de aforo ubicadas al cierre de cada una de las cuencas. También, para ambos casos, se evaluó la relación al incorporar la variable del caudal inmediato anterior al periodo considerado.

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1. Correlación entre Precipitación- Caudal

4.3.1.1. Cuenca del río Carcarañá

Se pudo observar que el valor promedio del índice IHC calculado con los 80 datos de precipitaciones mensuales (TRMM) para el periodo 1998-2014 y distribuidos uniformemente en el área de la cuenca es de 0,08. Esto indica que los fenómenos que prevalecen afectan a pequeños sectores de la cuenca. Esto, conjuntamente con su amplia superficie provoca una marcada heterogeneidad en cuanto a los fenómenos que dan origen a las precipitaciones y a las características con las que las mismas impactan en distintos sectores del territorio. A su vez, esta particularidad genera la necesidad de contar con información distribuida de las precipitaciones para el análisis conjunto del comportamiento de las variables de precipitación y caudal.

Una vez realizado el agrupamiento de datos de precipitación por subcuencas (Figura 4.4), se combinaron distintas opciones para correlacionar los promedios de las mismas con la serie de caudales medios mensuales de la estación hidrométrica de Pueblo Andino. Se plantearon modelos de regresión lineal simple, como así también la posibilidad de elevar los términos a potencias superiores a uno. También se incorporó la variable del caudal en periodos precedentes. En este sentido, resumiendo los resultados de relevancia, se pudo observar que utilizando solo el valor de precipitaciones medias de las subcuencas (P_i) para ajustar una función (a) que explique la variable dependiente del caudal (Q_i), el CC es 0,44 ($R^2 = 0,19$). Mientras que si se agregan los valores de caudal en el periodo inmediato anterior (Q_{i-1}) el CC es 0,67 ($R^2 = 0,45$) (función b).

Las respectivas funciones se muestran a continuación, donde los subíndices corresponden al nombre de cada una de las subcuencas donde se calculó la precipitación promedio para el periodo i :

$$Q_i = 0,56 P_{Baja} + 0,28 P_{Tortugas} + 0,23 P_{Interior} - 0,66 P_{Tercero} - 0,1 P_{Cuarto} + 59,4 \quad (a)$$

$$R^2 = 0,19$$

$$Q_i = 0,52 Q_{i-1} + 0,45 P_{Baja} + 0,20 P_{Tortugas} + 0,07 P_{Interior} - 0,43 P_{Tercero} - 0,03 P_{Cuarto} + 17,11 \quad (b)$$

$$R^2 = 0,45$$

Posteriormente se agruparon las estaciones según un criterio netamente estadístico como lo es el método de análisis multivariado de conglomerados. De esta manera se dividieron en cinco grupos para utilizar la misma cantidad de clasificaciones realizadas en base a la división física de subcuencas. Los grupos clasificados por color en la cuenca se presentan en la Figura 4.4 y además se detallan en la Tabla 4.3.

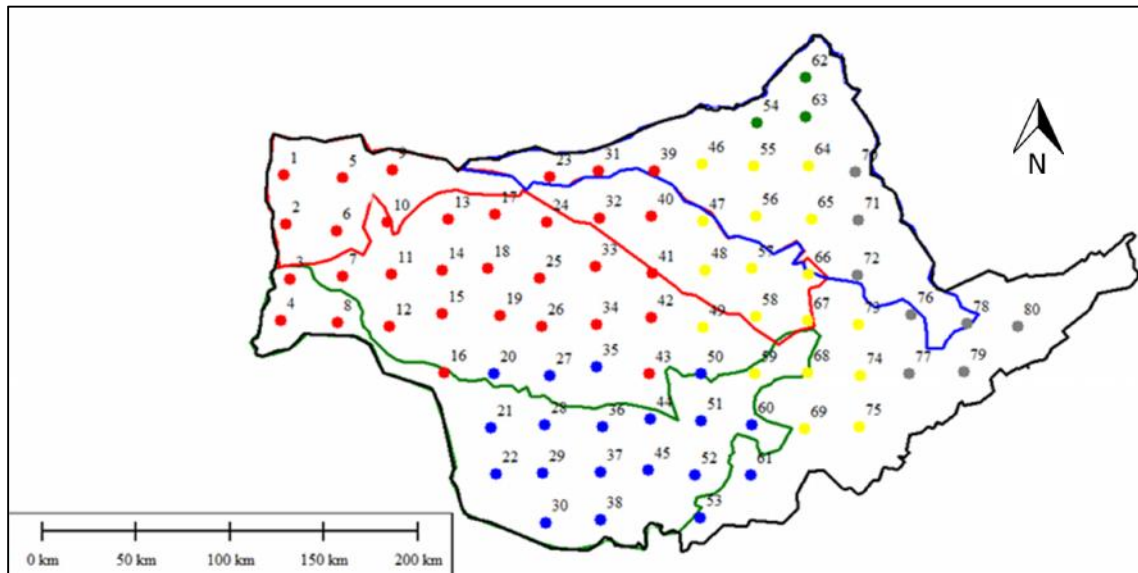


Figura 4.4. Localización de los puntos (80) con datos estimados de precipitaciones (TRMM) respecto de las subcuencas que integran la cuenca del río Carcarañá y clasificación de los mismos según el método estadístico de Conglomerados, identificados según los colores: Rojo, Azul, Amarillo, Verde y Gris.

Tabla 4.3. Puntos con datos de precipitación (TRMM) agrupado por color (Conglomerados) en la cuenca del río Carcarañá

Puntos por color (GRUPO)				
Rojo	Azul	Amarillo	Verde	Gris
1 al 19	20	46	54	70
23	21	47	62	71
24	22	48	63	72
25	27	49		76
26	28	55		77
31	29	56		78
32	30	57		79
33	35	58		80
34	36	59		
39	37	64		
40	38	65		
41	44	66		
42	45	67		
43	50	68		
	51	69		
	52	73		
	53	74		
	60	75		
	61			

De igual manera que para el caso anterior se combinaron distintas opciones para correlacionar los parámetros de precipitación de los grupos con la serie de caudales mensuales de la estación hidrométrica de Pueblo Andino. Los resultados muestran que los CC se mantienen muy semejantes al caso anterior, variando en apenas una centésima los valores de los mismos.

Además se aplicó la metodología para siete grupos formados por conglomerados, con la finalidad de verificar si a mayor cantidad de divisiones, permitía un mejor ajuste de las correlaciones y no se observaron mejoras de notoriedad.

4.3.1.2. Cuenca del río San Antonio

En primera instancia se calculó un valor promedio del índice IHC de 0,59. Esto indicaría que la cuenca del río San Antonio posee un comportamiento relativamente más homogéneo a nivel mensual comparado con los valores obtenidos (en la misma cuenca) por García (2013) a nivel diario, cuyo promedio se aproxima a 0,3 y comparado con la cuenca del río Carcarañá (sección 4.3.1.1) teniendo en cuenta la diferencia en la escala espacial de ambas. Esta característica da un indicio a priori, de que no es necesario dividir en grupos la información de precipitaciones a nivel mensual para el análisis de la relación entre las variables.

No obstante para cotejar lo anterior, se agruparon las estaciones según ambos criterios descriptos en el apartado 4.2.2. Los grupos definidos según la región de la cuenca y según el método de conglomerados clasificados por color se muestran en la Figura 4.5 y además del último método, se detallan los grupos en la Tabla 4.4.

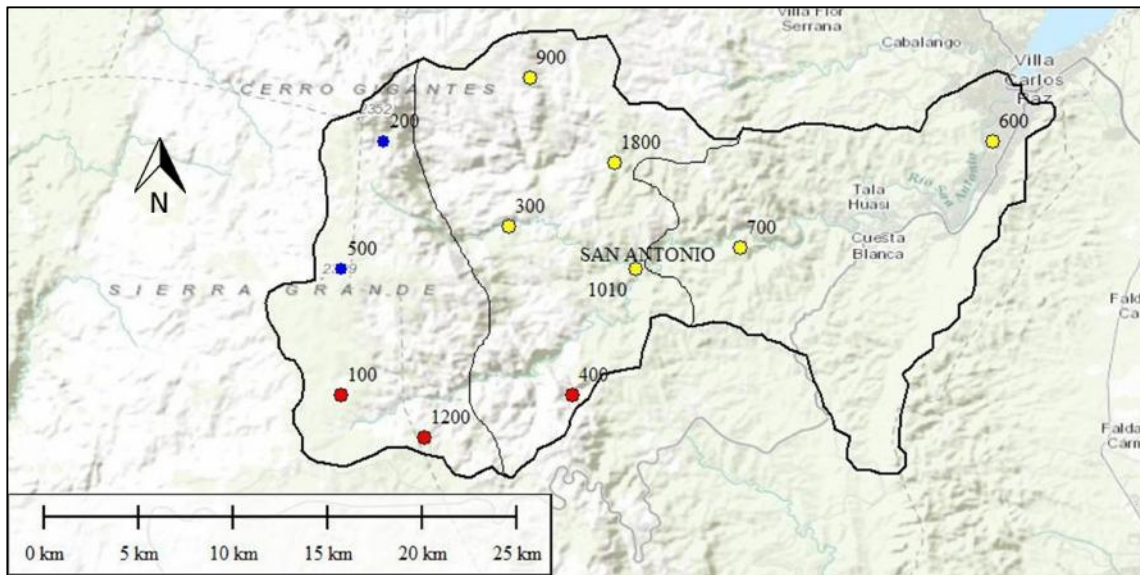


Figura 4.5. Clasificación de las estaciones con datos de precipitación en la cuenca del río San Antonio, según región de la cuenca: Alta, Media y Baja y por el método estadístico de Conglomerados identificados según los colores: amarillo, Azul y Rojo

Tabla 4.4. Estaciones con datos de precipitación agrupadas por color (Conglomerados) en la cuenca del río San Antonio

Puntos por color (GRUPO)		
Rojo	Azul	Amarillo
100	200	400
500	300	
1200	600	
	700	
	900	
	1010	
	1800	

De igual manera que para el caso de la cuenca del río Carcarañá, se combinaron distintas opciones para correlacionar los parámetros de precipitación de los grupos con la serie de caudales mensuales de la estación hidrométrica de Barrio El Canal.

Resumiendo los resultados de relevancia, se pudo observar que utilizando solamente los valores promedios de precipitaciones de las regiones (P_i) o de los grupos de conglomerados para correlacionar con el caudal (Q_i) el CC es de 0,93. Mientras que si se agrega como variable el caudal en el periodo inmediato anterior (Q_{i-1}) el CC varía levemente a 0,94. Así, para el caso de una cuenca serrana, el caudal mensual inmediato anterior no tendría una influencia notable para explicar la ocurrencia del caudal en el periodo analizado.

Si se establece la función directa (c) entre el promedio aritmético de las precipitaciones de la cuenca (sin agrupar los datos por región ni color) y el caudal, el CC es 0,93 o bien, el R^2 es 0,86. Es decir que para este caso no se logran mejoras al analizar las precipitaciones de manera discretizada en el espacio, sino en su conjunto, debido a las dimensiones reducidas de la cuenca. La función se muestra a continuación, donde el subíndice corresponde al valor promedio de las precipitaciones en la cuenca para el periodo i:

$$Q_i = 2,40 P_{iCuenca} - 20$$

$$R^2 = 0,86 \quad (c)$$

4.3.2. Correlación de índices de sequías meteorológicas e hidrológicas

4.3.2.1. Cuenca del río Carcarañá

Una vez obtenido el promedio de las precipitaciones mensuales en cada subcuenca se calcularon sus respectivos índices SPI (sección 2.2.4.2) a nivel mensual y luego, fueron calculados sus promedios anuales ya que los índices SDI con los cuales se va a estimar el nivel de correlación se utilizaron en el intervalo k4 (ver apartado 3.2.2).

A nivel anual, en primera instancia se analizó la correlación entre los índices SDI y SPI para el periodo 1999-2010 (Figura 4.6). Se obtuvo un valor de CC igual a 0,82 o bien un R^2 de 0,67, cuya función (d) se muestra a continuación y en la que el subíndice indica la inicial de la cuenca analizada.

$$SDI_C = 1,15 SPI_C + 0,36 \quad R^2=0,67 \quad (d)$$

Esta función presenta la ventaja de la simplicidad puesto que si se eleva en órdenes de magnitud la misma, la variación en la correlación son del orden de la centésima, lo cual no implica una mejora considerable.

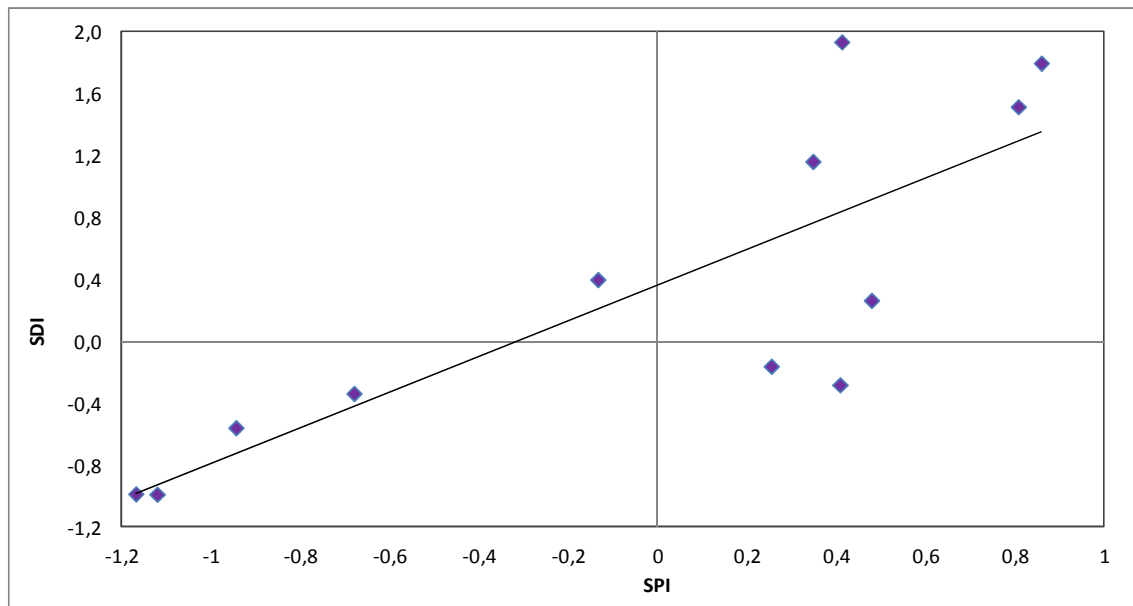


Figura 4.6. Correlación entre los índices de sequías meteorológicas e hidrológicas: promedio anual SPI (12 meses) y SDI (k4), respectivamente, en la cuenca del río Carcarañá (1999-2010).

4.3.2.2. Cuenca del río San Antonio

A nivel anual, en primera instancia se analizó la correlación entre los índices calculados para el periodo 1999-2010 (Figura 4.7), donde se obtuvo un valor de CC igual a 0,26 (o $R^2=0,07$) cuya función (e) se muestra a continuación y en la que el subíndice indica las iniciales de la cuenca analizada.

$$SDI_{SA} = 0,32 SPI_{SA} + 0,16$$

$$R^2=0,07 \quad (e)$$

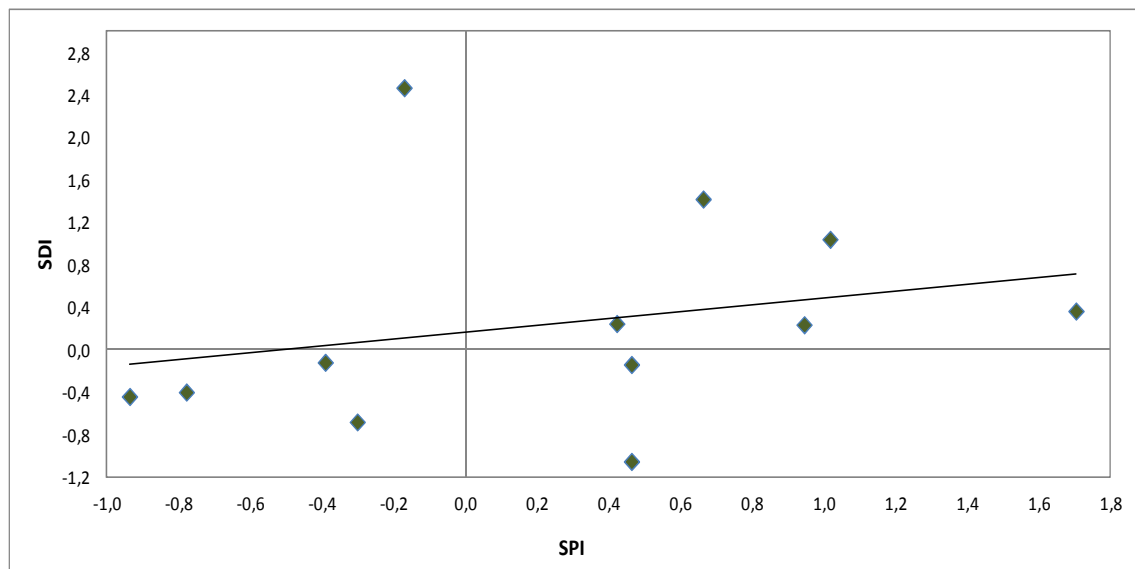


Figura 4.7. Correlación entre los índices de sequías meteorológicas e hidrológicas: promedio anual SPI (12 meses) y SDI (k4), respectivamente, en la cuenca del río San Antonio (1999-2010).

CAPÍTULO 5

***IDENTIFICACIÓN DE PERIODICIDADES
PLURIANUALES EN LAS SERIES DE ÍNDICES DE
SEQUIÁS Y SU RELACIÓN CON LA EVOLUCIÓN
TEMPORAL DE INDICADORES
MACROCLIMÁTICOS***

5.1. INTRODUCCIÓN

Las estimaciones de períodos de tiempo o frecuencias características de las fluctuaciones temporales que presentan algunas variables o indicadores meteorológicos e hidrológicos, es de gran interés para la evaluación, diseño, planificación y gestión de los recursos hídricos.

En relación a esto, los fenómenos hidrológicos extremos tal como el caso de las sequías de distinto tipo, requieren ser caracterizados de la manera más amplia posible, identificando duración, intensidad y magnitud, además de estimar la frecuencia de ocurrencia de valores o situaciones críticas. Existen estudios tendientes a relacionar dichas características a periodos de tiempo correspondientes a otros fenómenos posiblemente involucrados (Özger *et al.*, 2009).

El clima de un sitio en particular es el estado promedio de la atmósfera durante un periodo prolongado de tiempo. Existe una amplia variedad de índices macroclimáticos o de teleconexiones descritos en la literatura. Cada uno de ellos se basa en determinadas variables y describe solo ciertos aspectos del clima. Ellos son definidos por ecuaciones que utilizan variables que son determinantes en el sistema climático ya sea de tipo atmosférico, como la presión, la temperatura, la precipitación y la radiación solar, o de otro tipo, como la temperatura superficial marina o la cobertura de hielo. Estos patrones de teleconexión pueden explicar parte de la variabilidad climática de un lugar.

En trabajos anteriores (Díaz *et al.*, 2016) se ha demostrado que los indicadores TSA (Índice del Atlántico Sur Tropical), AMM (Modo Meridional del Atlántico), Niño 1+2 (Temperatura Promedio de la superficie del mar en las regiones 2+1); ONI (Índice del Niño Oceánico); SOI (Índice de Oscilación Sur); MS (Manchas Solares) y AAO (Oscilación del Antártico) explican de forma estadísticamente significativa la variabilidad interanual de los caudales escurridos superficialmente en sistemas fluviales de Argentina.

Por lo anteriormente expuesto, en el presente capítulo se identifican las periodicidades plurianuales en las series temporales de índices representativos de sequías meteorológicas e hidrológicas utilizados a lo largo de la presente tesis cuya longitud permitieron un estudio estadístico eficiente. Luego, se realiza la comparación con periodicidades de indicadores macroclimáticos; con la finalidad de identificar y relacionar la escala temporal de las fluctuaciones que predominan, en dos cuencas de diferentes características de la Región Centro de Argentina.

5.2. MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1. Cuenca del río Carcarañá

Para la identificación de periodicidades plurianuales de índices relacionados a las sequías meteorológicas, se utilizó la serie del índice SPI para el intervalo de 12 meses (periodo 1980-2009) en la estación Río Cuarto que se muestra en la Figura 5.1. La metodología utilizada para calcular este índice se encuentra explicada en el apartado 2.2.3. A su vez, para el caso de las sequías hidrológicas se utilizó la serie de índices SDI (k4) para el periodo 1981-2013 (Figura 3.15) correspondiente a los valores de caudales mensuales de la estación Pueblo Andino, cuya ubicación se indica en la Figura 1.12 del presente trabajo. Cabe destacar que el periodo 1991-1993 de esta serie se rellenaron los datos faltantes utilizando un polinomio de grado 6 que se generó a partir de 4 años antes y después del periodo a rellenar. La metodología utilizada para calcular este índice se detalla en el apartado 3.2.2. En la Tabla 5.1 se describen las características de las estaciones mencionadas y de la información utilizada.

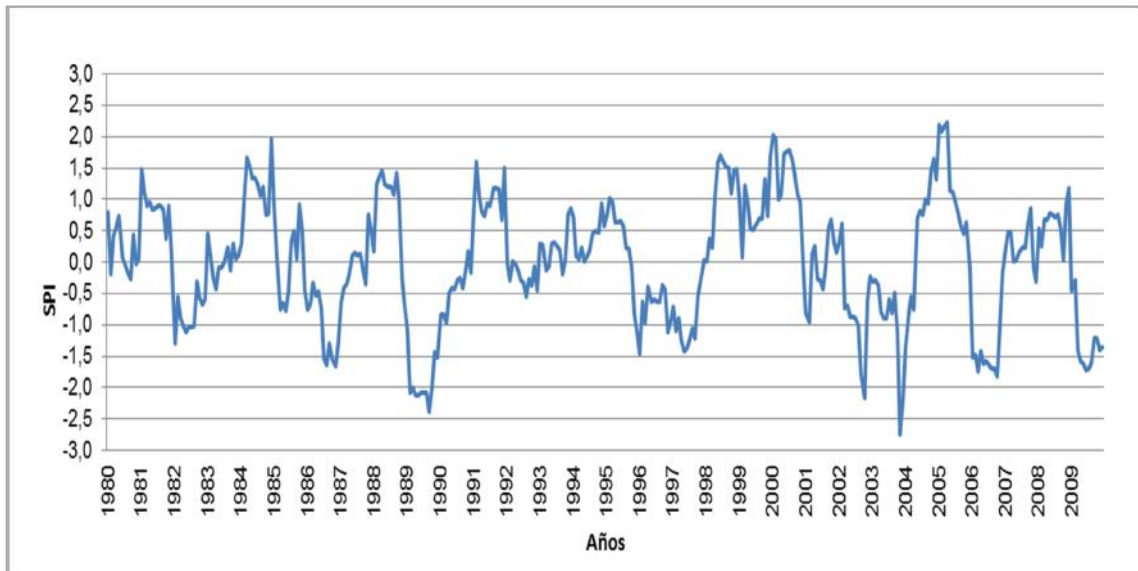


Figura 5.1. Índices SPI (12 meses) en la estación Río Cuarto. Período 1980-2009

Tabla 5.1. Características de las estaciones seleccionadas y de la información de las series utilizadas en la cuenca del río Carcarañá.

Estación	Coordenadas geográficas (en decimales)		Altura (msnm)	Tipo estación	Información de las series	
	Latitud	Longitud			Variables	Periodo
Río Cuarto	-33,07	-64,1	421	Pluviométrica	SPI	1980-2009
Pueblo Andino	-32,67	-60,87	18	Hidrométrica	SDI	1981-2013

5.2.2. Cuenca alta del río Suquía

Para llevar a cabo la identificación de periodicidades plurianuales de índices relacionados a las sequías meteorológicas en la cuenca alta del río Suquía se utilizó la estación San Roque, cuya ubicación dentro de la cuenca se muestra en la Figura 1.10.

Según el análisis incluido en la sección 2.4, a pesar de que la serie de precipitaciones en la estación San Roque tiene registros hasta el año 1999, fue posible extender la serie de los índices SPI en dicha estación hasta el año 2015 (Figura 5.2) utilizando valores de precipitaciones mensuales calculados a partir de TRMM, con el fin de completar una serie de mayor longitud para identificar periodicidades de tiempo más largas. En la Tabla 5.2 se describen las características y se sintetiza la información de dichas series.

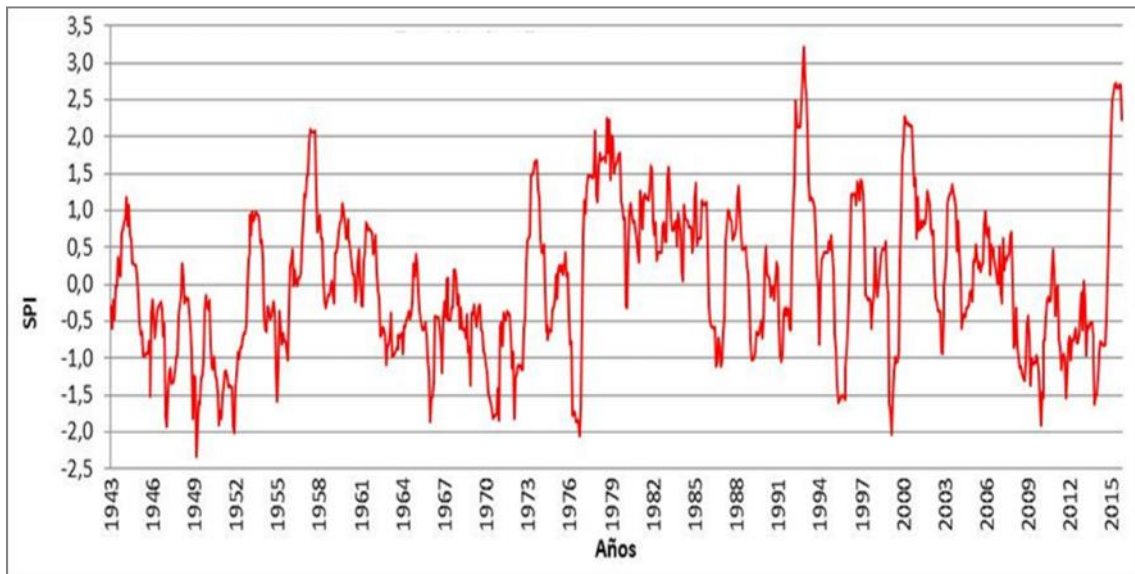


Figura 5.2. Índice SPI (periodo 1943-2015) obtenida a partir de registros observados y estimados de TRMM, en la estación San Roque.

Tabla 5.2. Características de la estación y de la información de la serie utilizada en la cuenca alta del río Suquia

Estación	Coordenadas geográficas (en decimales)		Altura (msnm)	Tipo estación	Información de las series	
	Latitud	Longitud			Variables	Periodo
San Roque	-31,37	-64,45	650	Pluviométrica	SPI	1943-2015

5.2.3. Indicadores macroclimáticos

Los indicadores macroclimáticos utilizados se sometieron al mismo análisis espectral que las series de índices de sequías para conocer si existe una relación entre su evolución temporal con las sequías en las distintas escalas de tiempo. En la Tabla 5.3 se describen los indicadores macroclimáticos analizados.

Tabla 5.3. Resumen de los indicadores macroclimáticos utilizados

Indicador	Descripción	Periodo
TSA	Índice del Atlántico Sur Tropical	1948-2013
AMM	Modo Meridional del Atlántico	1948-2001
SOI	Índice de Oscilación Sur	1951-2013
AAO	Oscilación del Antártico	1979-2013
MS	Manchas Solares	1700-2013
ONI	Índice del Niño Oceánico	1950-2012
Niño 1+2	Temperatura Promedio de la superficie del mar en las regiones 2+1	1950-2013

Las series de indicadores AAO, AMM, ONI, SOI, NIÑO 1+2 y TSA, se obtuvieron del sitio web del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2015), mientras que la serie de manchas solares MS se obtuvo de SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations, 2015).

5.2.4. Análisis espectral

La evolución temporal de series de información meteorológica e hidrológica presenta fluctuaciones generadas por procesos cuasi periódicos de distintas frecuencias.

Una señal periódica de la variable “s” se puede definir como:

$$s(t + T) = s(t) \quad 0 < t < +\infty \quad (A)$$

Donde:

t es el tiempo

T es el periodo de la señal y debe ser el menor valor que cumple la ecuación:

$T = 1/f$, donde f es la frecuencia.

Por ejemplo, la expresión general para una onda sinusoidal característica es:

$$s(t) = A \operatorname{sen}(2\pi ft + \phi) \quad -\infty < t < +\infty \quad (\text{B})$$

Donde:

A es la amplitud

ϕ es la fase

f es la frecuencia: $f = 1/T$, donde T es el periodo

El análisis de Fourier demuestra que cualquier señal cuasi periódica está constituida por componentes sinusoidales de distintas frecuencias. La transformada rápida de Fourier (TRF) permite la transformación de una función de tiempo en una función de frecuencia y es utilizada para el análisis espectral de variables dependientes del tiempo ya que optimiza la función original reduciendo las operaciones al mínimo posible (Cooley y Tuckey, 1965). Para el cálculo del espectro de energía de las fluctuaciones de las series de índices SPI y SDI se utilizó la transformada finita de Fourier (Bendat y Piersol, 2000), cuya función es:

$$G_{xx}(f) = \frac{2}{T} |X(f, T)|^2 \quad (\text{C})$$

Siendo: $f = 1/T$; T el periodo y el rango finito de la transformada de Fourier de un valor real o de un registro complejo $x(t)$: $X(f, T)$. De manera resumida, la resolución de la expresión (A) se define a través de la Transformada Discreta de Fourier (TDF) con la cual se obtiene:

$$X(f_m) = \Delta t \sum X_m \quad (\text{D})$$

Donde f_m son valores discretos de frecuencia y m varía de uno hasta $N/2$. Siendo N la cantidad de puntos de una serie de tiempo, equidistantes a una distancia Δt de separación.

De tal manera que reemplazando (D) en (C) y siendo $T = N \Delta t$, el espectro de energía de las fluctuaciones se calcula como:

$$G_{xx}(f_m) = \frac{2\Delta t}{N} |X_m|^2 \quad (\text{E})$$

En esta sección, para el cálculo de $G_{xx}(f)$ se utilizó el programa MATLAB. Los conceptos y metodologías mencionados anteriormente se aplicaron con el fin de obtener los espectros de energía de las fluctuaciones de las series temporales de índices relacionados a las sequías en el área de estudio. De esta manera se busca identificar las frecuencias dominantes en cada caso, teniendo en cuenta las limitaciones debido a la disponibilidad de datos, para relacionarlas a otros procesos o fenómenos posiblemente involucrados.

5.2.5. Análisis de correlación entre series filtradas de índices de sequías e indicadores macroclimáticos para distintos anchos de bandas.

En función de las frecuencias dominantes encontradas, se procedió a filtrar las series, a través de filtros pasa-banda entre los siguientes rangos de frecuencia:

N5: con periodos de las fluctuaciones entre 3-7 años

N11: con periodos de las fluctuaciones entre 7-13 años

Nbd: con periodos de las fluctuaciones entre 13-35 años

El filtro pasa banda utilizado consiste en un filtro de Fourier haciendo que la energía de las fluctuaciones sean iguales a cero para los rangos de frecuencias no incluidos en la banda del filtro “pasa banda” utilizado.

En este análisis se calculó el coeficiente de correlación entre las series filtradas de los índices de sequías (Nbd, N11, N5) y las series filtradas de los índices macroclimáticos, en el mismo ancho de banda.

5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1. Cuenca del río Carcarañá

Para el caso de los índices SPI de la estación Río Cuarto, a nivel mensual se encontraron frecuencias dominantes entre 1/3 y 1/7 años aproximadamente. En la Figura 5.3 se muestra el espectro adimensional (utilizando el valor máximo para su adimensionalización) y se resaltan las frecuencias dominantes mencionadas previamente.

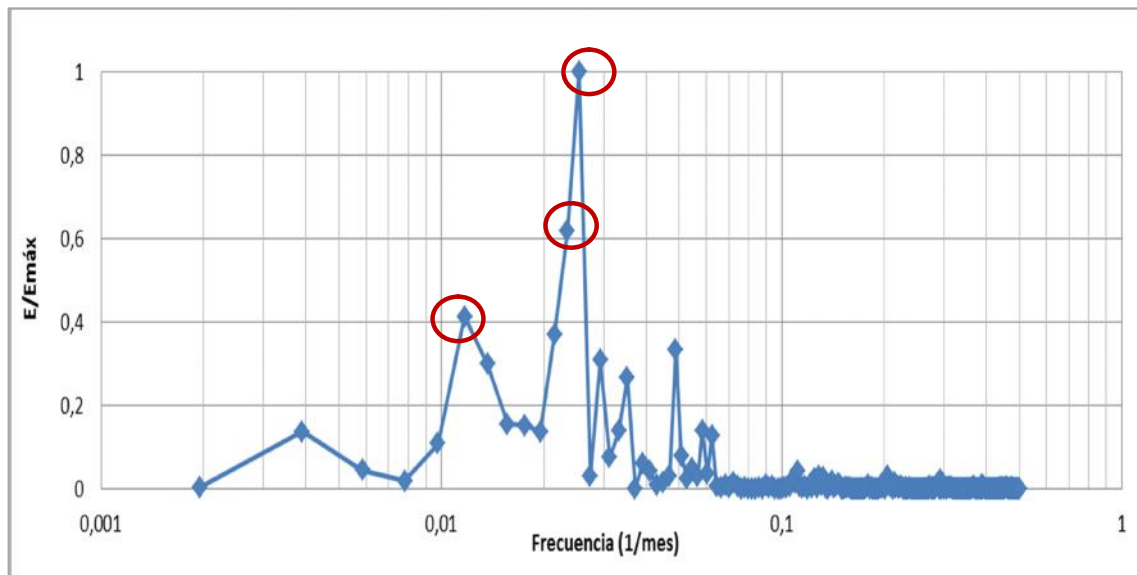


Figura 5.3. Espectro de energía de las fluctuaciones obtenidas de la serie mensual de índices SPI correspondientes a la estación Río Cuarto.

En la Tabla 5.4 se muestran los coeficientes de correlación (CC) entre la serie del índice SPI de la estación Río Cuarto y las series de los indicadores macroclimáticos, directas y filtradas para tres rangos de frecuencia. Se observó una alta correlación con el indicador AMM a nivel decadal. Y además se aprecia una alta correlación a nivel bidecadal (13-35 años) con los índices TSA, Niño 1+2, SOI y MS. Estos casos se muestran en las Figuras 5.4 a 5.8.

Tabla 5.4. Coeficientes de correlación entre las series de índices SPI de la estación Río Cuarto y las series de los distintos indicadores macroclimáticos. Se destacan los valores de interés

Series	TSA	AMM	Niño 1+2	ONI	SOI	MS	AAO
Directa	0,13	0,08	-0,05	-0,17	0,06	0,09	0,02
Nbd	-0,54	0,28	0,72	-0,08	-0,53	0,51	0,35
N11	-0,38	-0,59	0,34	-0,16	-0,07	0,33	-0,10
N5	0,30	0,17	-0,13	-0,19	0,17	-0,02	0,02

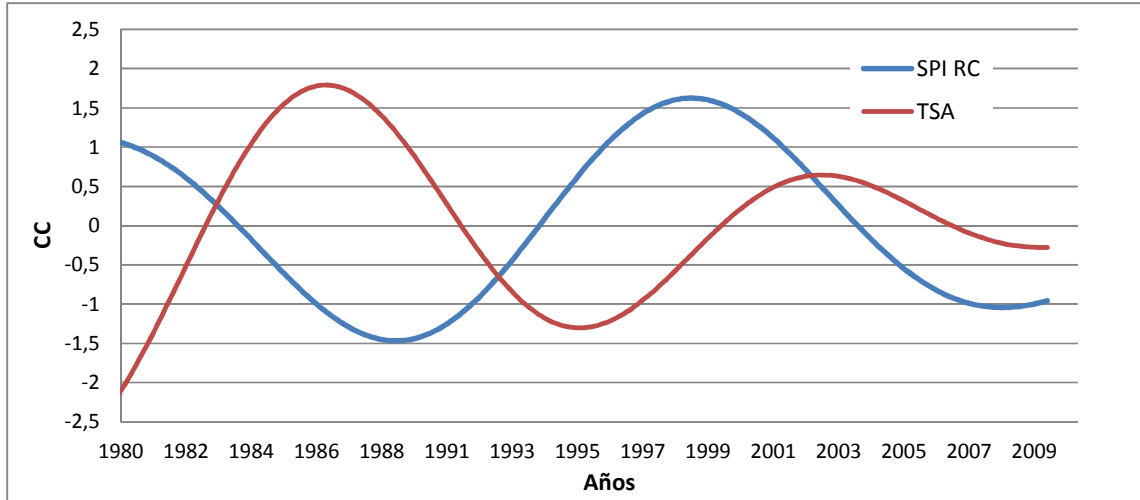


Figura 5.4. Índice SPI normalizado de estación Río Cuarto e indicador TSA con filtro pasa-banda entre 13-35 años

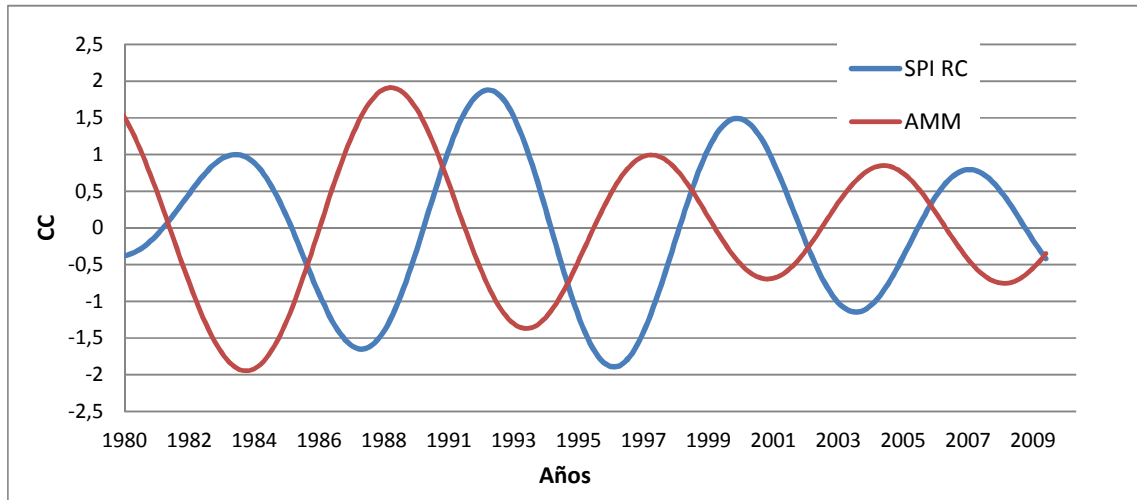


Figura 5.5. Índice SPI normalizado de estación Río Cuarto e indicador AMM con filtro pasa-banda entre 7-13 años

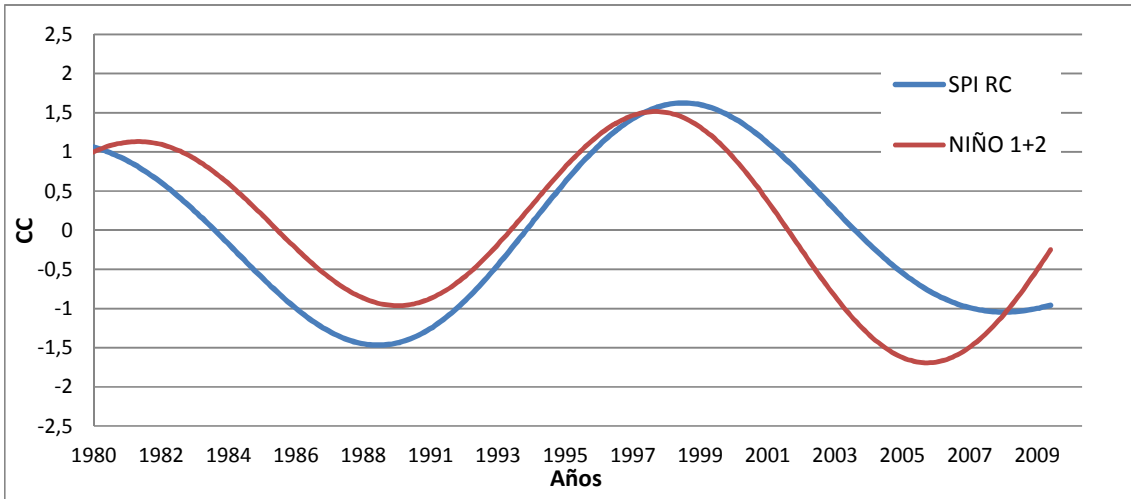


Figura 5.6. Índice SPI normalizado de est. Río Cuarto e indicador NIÑO 1+2 con filtro pasa-banda entre 13-35 años

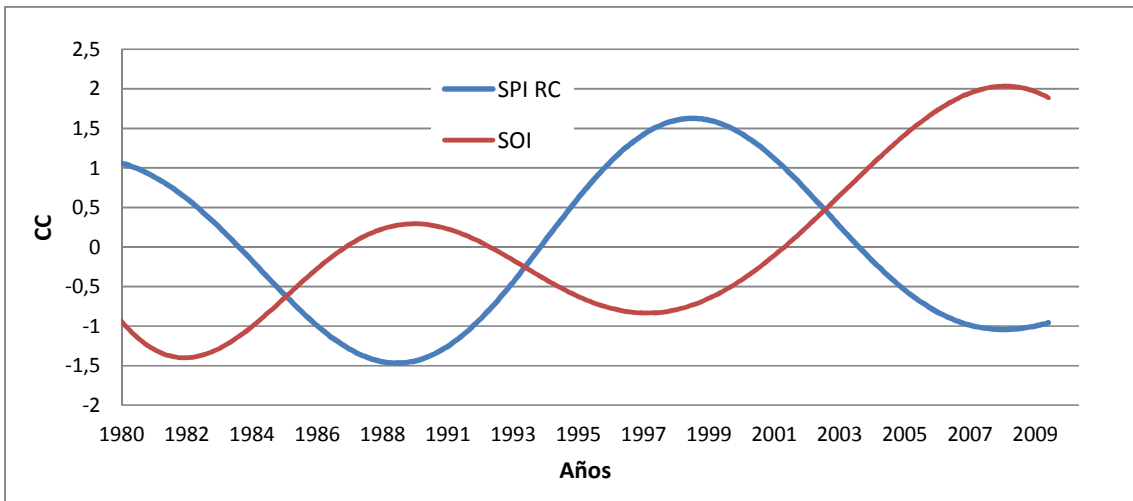


Figura 5.7. Índice SPI normalizado de estación Río Cuarto e indicador SOI con filtro pasa-banda entre 13-35 años

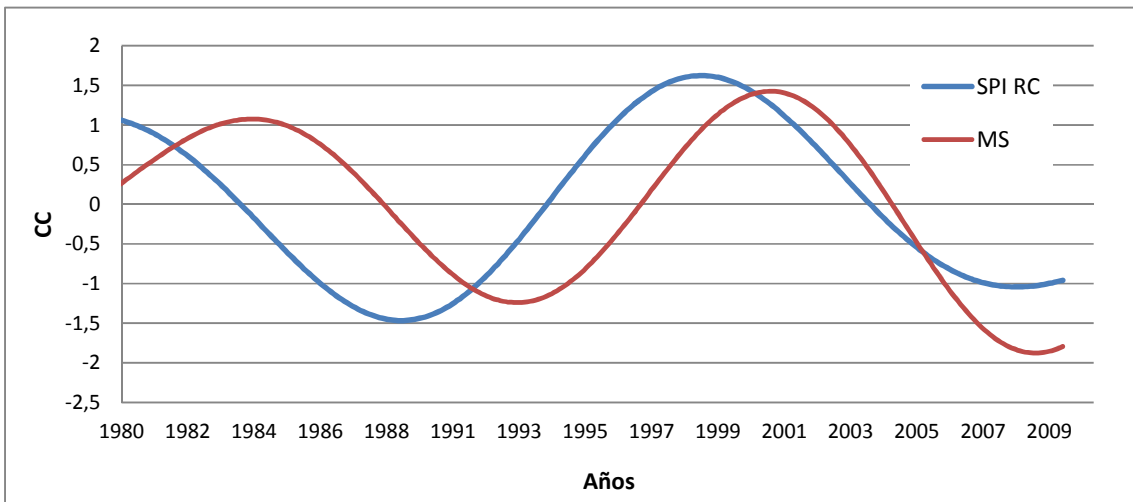


Figura 5.8. Índice SPI normalizado de estación Río Cuarto e indicador MS con filtro pasa-banda entre 13-35 años

El procedimiento anterior se repite para los índices SDI en el intervalo k4 (anual) calculados a partir de los caudales medios mensuales de la estación hidrométrica de Pueblo Andino. En este caso las frecuencias dominantes que se destacaron fueron 1/7,1; 1/9,1 y 1/10,6 años, aproximadamente. En la Figura 5.9 se muestra el espectro adimensional (utilizando el valor máximo para su adimensionalización) y se resaltan las frecuencias dominantes mencionadas previamente.

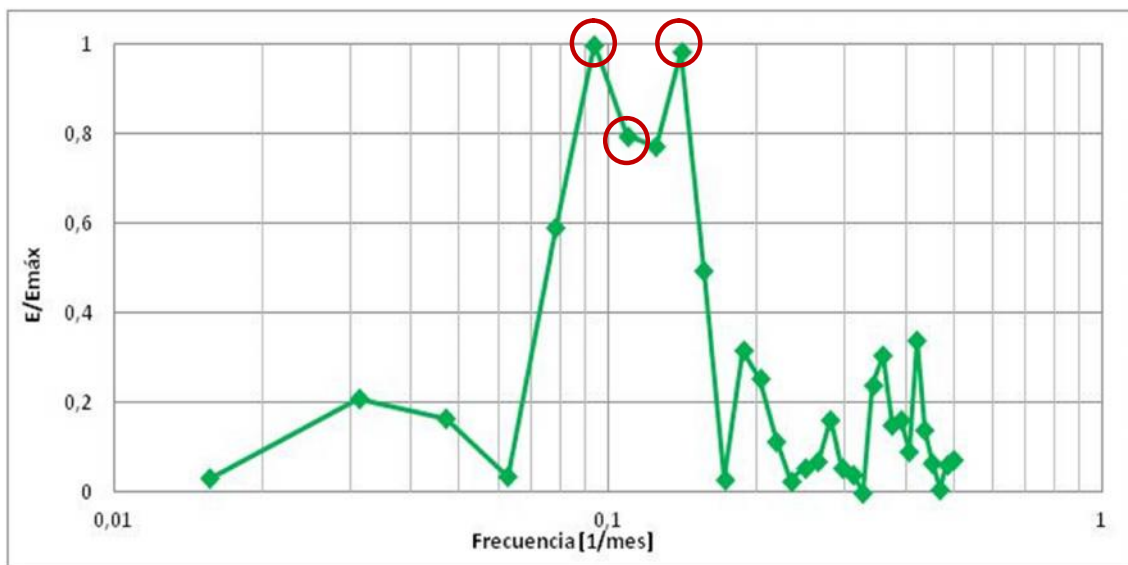


Figura 5.9. Espectro de energía de las fluctuaciones obtenidas de la serie de índices SDI (k4) correspondientes a la estación hidrométrica Pueblo Andino

En la Tabla 5.5 se muestran los coeficientes de correlación (CC) entre la serie del índice SDI (k4) de la estación Pueblo Andino y las series de los indicadores macroclimáticos, directas y filtradas para tres rangos de frecuencia. Se observó una correlación negativa superior a 0,50 con los indicadores macroclimáticos TSA, AMM y SOI lo que indicaría que fases positivas de dichos indicadores en escalas decadales y bidecales, estarían asociados a ciclos secos. Con los indicadores Niño 1+2 y MS se observa una correlación positiva a nivel bidecadal. Estos casos se muestran en las Figuras 5.10 a 5.14.

Tabla 5.5. Coeficientes de correlación entre las series de índices SDI (k4) de la estación Pueblo Andino y las series de los distintos indicadores macroclimáticos. Se destacan los valores de interés.

Series	TSA	AMM	Niño 1+2	ONI	SOI	MS
Directa	-0,34	-0,23	-0,08	0,06	-0,25	0,34
Nbd	-0,55	-0,67	0,24	0,43	-0,37	0,00
N11	-0,72	-0,56	-0,17	0,19	-0,35	0,55
N5	-0,23	0,28	0,12	0,11	-0,10	-0,09

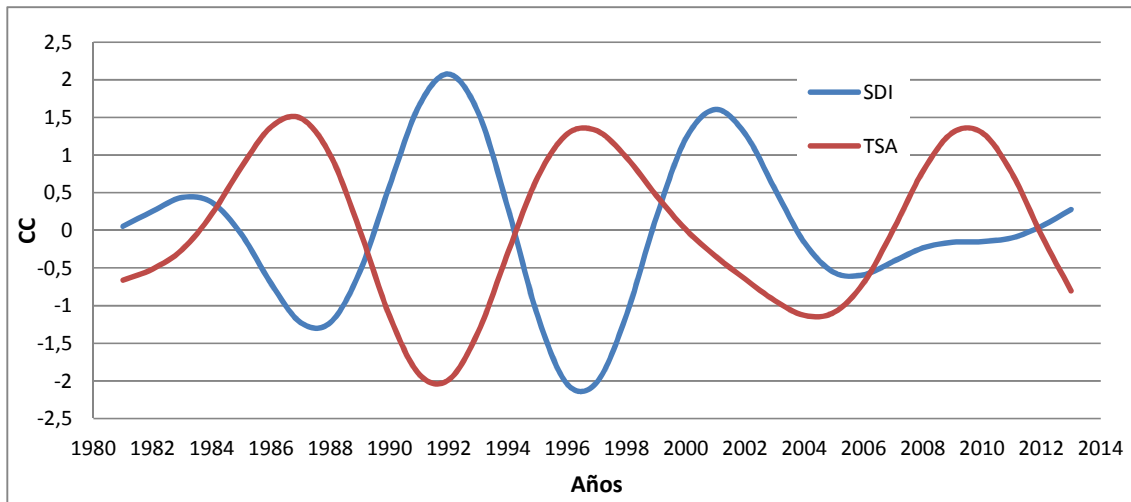


Figura 5.10. Índice SDI normalizado de est. Pueblo Andino e indicador TSA con filtro pasa-banda entre 7-13 años

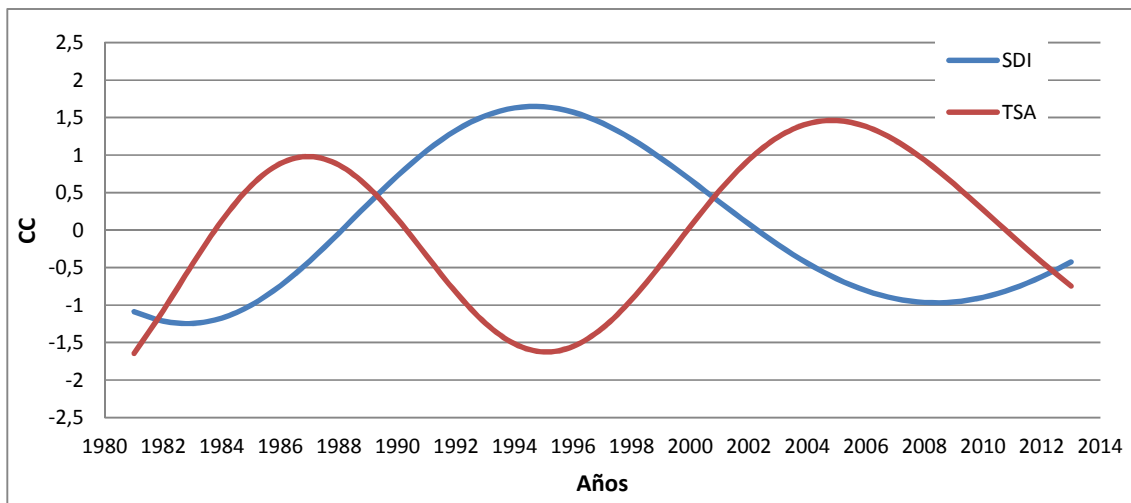


Figura 5.11. Índice SDI normalizado de est. Pueblo Andino e indicador TSA con filtro pasa-banda entre 13-35 años

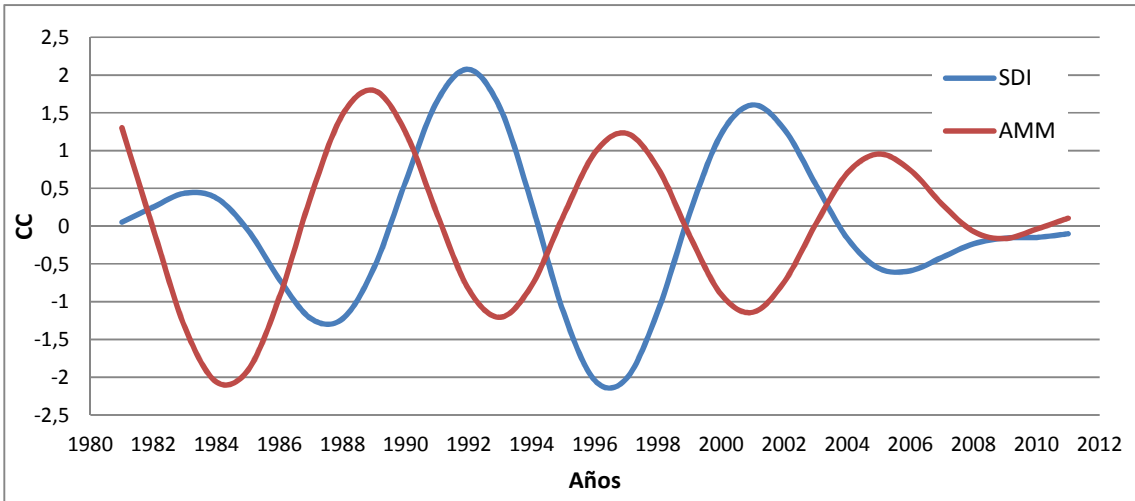


Figura 5.12. Índice SDI normalizado de est. Pueblo Andino e indicador AMM con filtro pasa-banda entre 7-13 años

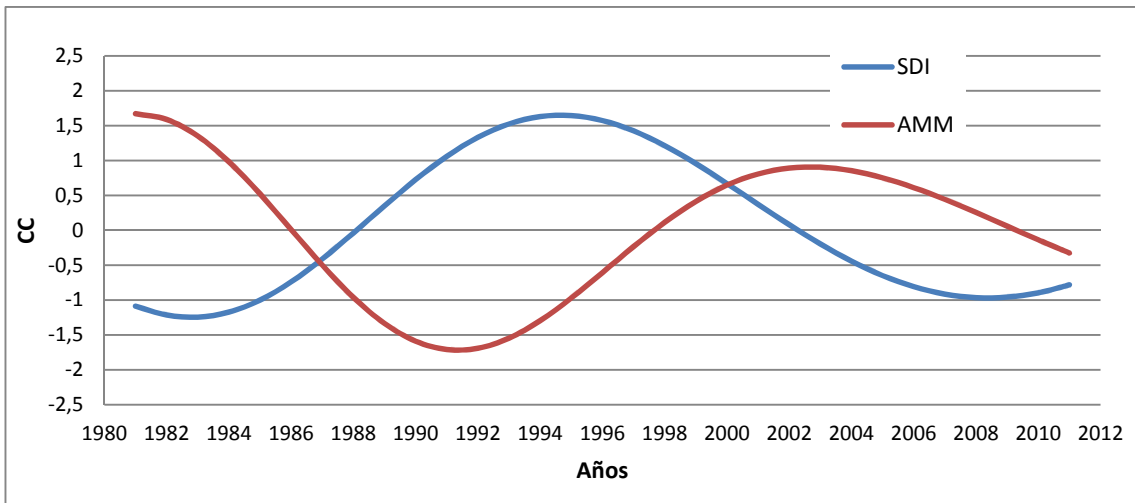


Figura 5.13. Índice SDI normalizado de est. Pueblo Andino e indicador AMM con filtro pasa-banda entre 13-35 años

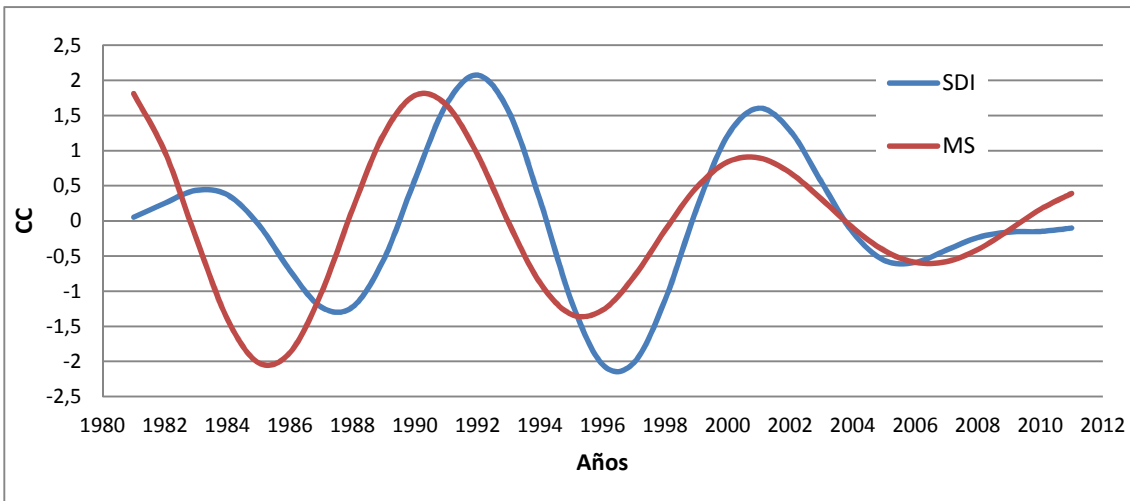


Figura 5.14. Índice SDI normalizado de est. Pueblo Andino e indicador MS con filtro pasa-banda entre 7-13 años

5.3.2. Cuenca alta del río Suquía

Para el caso de la serie de índices SPI de la estación San Roque, se observó que las frecuencias dominantes (y que pueden tenerse en cuenta en función de que no excedan la longitud de la serie original) son de 1/21, 1/12 y 1/4,7 años, aproximadamente. Dicha periodicidad podría tener su origen en procesos físicos relacionados a las oscilaciones bidecadales. El gráfico del espectro adimensional de energía (utilizando el valor máximo para su adimensionalización) de las fluctuaciones correspondientes a las series del índice SPI de la estación pluviométrica San Roque se muestran en la Figura 5.15. En el mismo se resaltan las frecuencias dominantes del espectro.

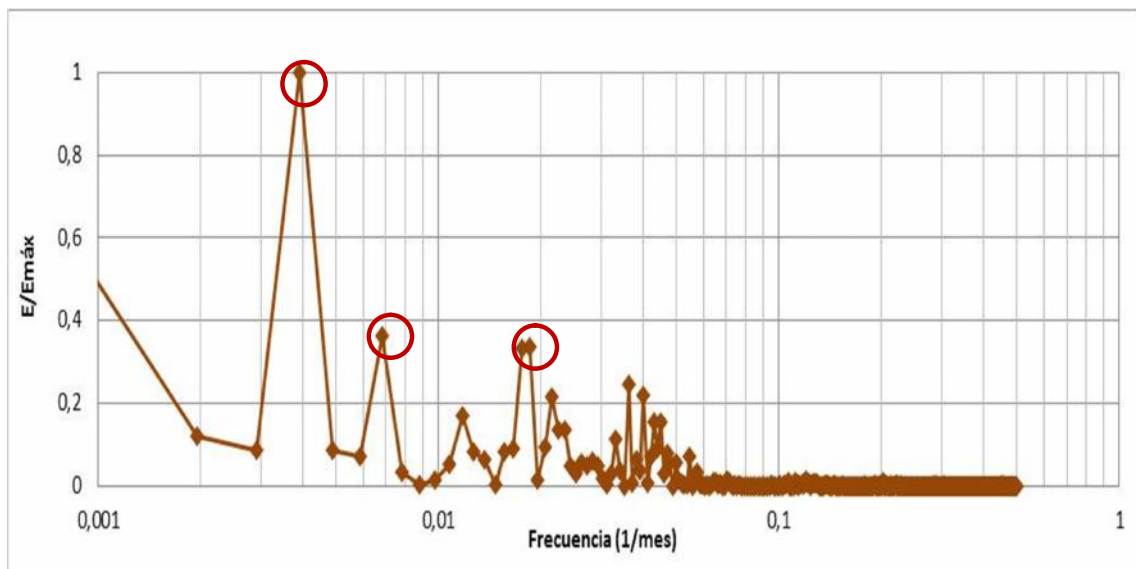


Figura 5.15. Espectro de energía de las fluctuaciones obtenidas de la serie mensual de índices SPI correspondientes a la estación San Roque

En la Tabla 5.6 se muestran los coeficientes de correlación (CC) entre la serie del índice SPI de la estación San Roque y las series de los indicadores macroclimáticos, directas y filtradas para tres rangos de frecuencia. Se observó que las correlaciones negativas con el indicador TSA y correlaciones positivas con los indicadores AMM y MS se mantienen para las escalas bidecadales. Además se encontró una alta correlación positiva con el indicador ONI (0,75) y correlaciones negativas importantes con los indicadores TSA, SOI y AAO a nivel decadal. Estos casos se muestran en las Figuras 5.16 a 5.22.

Tabla 5.6. Coeficientes de correlación entre las series de índices SPI de la estación San Roque y las series de los distintos indicadores macroclimáticos. Se destacan los valores de interés

Series	TSA	AMM	Niño 1+2	ONI	SOI	MS	AAO
Directa	0,02	-0,05	0,06	0,10	-0,14	0,18	0,01
Nbd	-0,60	0,57	0,32	0,17	-0,02	0,65	-0,16
N11	-0,77	-0,03	0,19	0,75	-0,77	0,41	-0,55
N5	0,17	-0,26	0,15	0,15	-0,17	0,00	-0,05

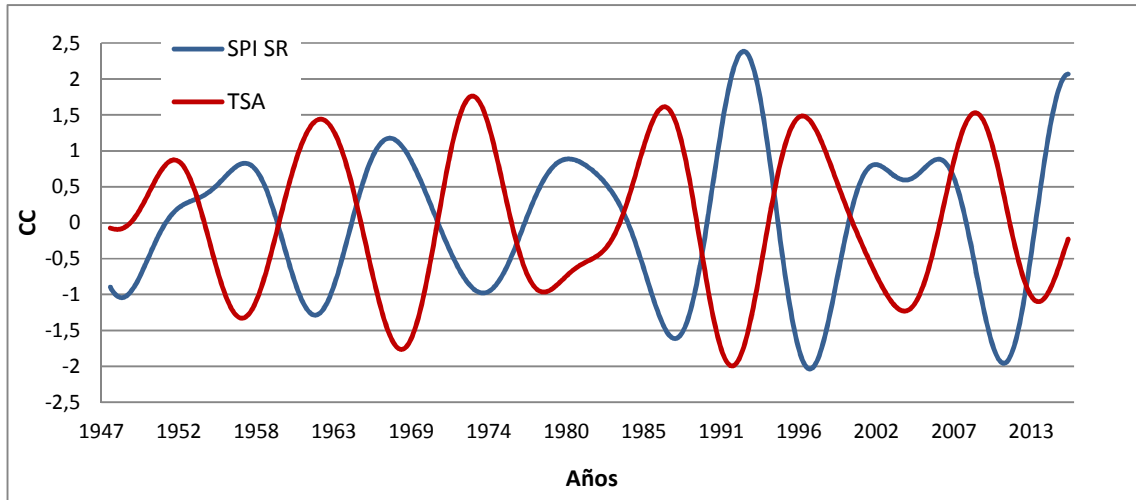


Figura 5.16. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador TSA con filtro pasa-banda entre 7-13 años

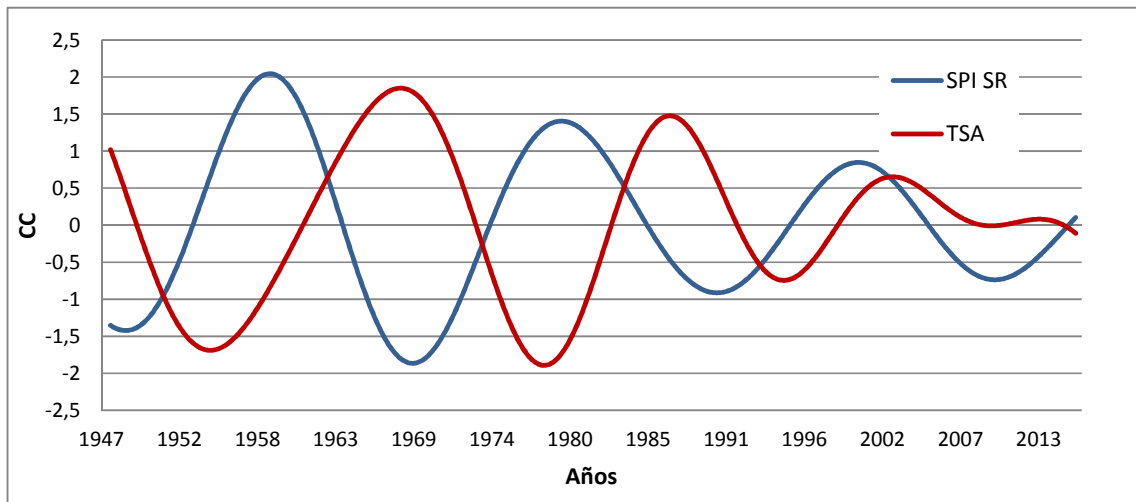


Figura 5.17. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador TSA con filtro pasa-banda entre 13-35 años

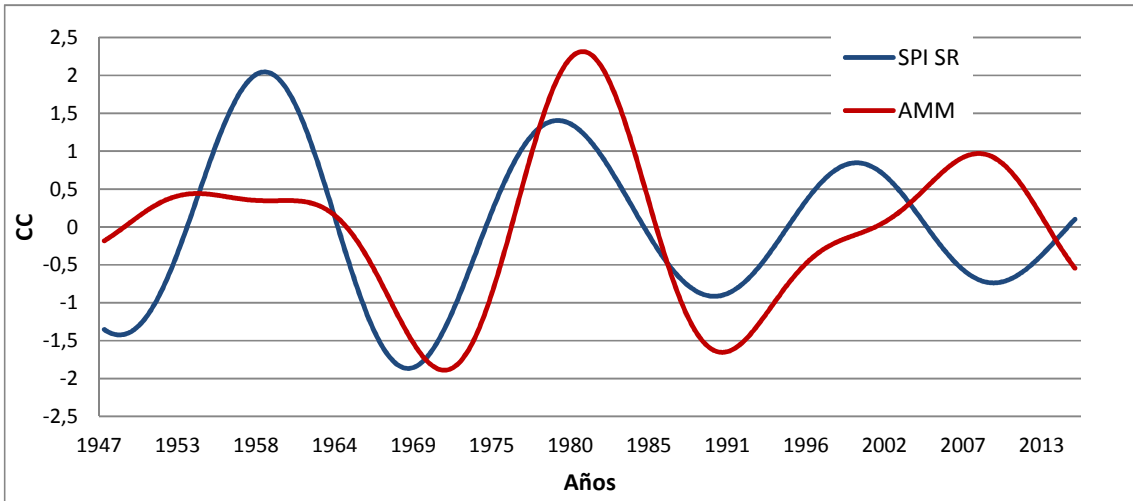


Figura 5.18. Índice SPI normalizado de est. San Roque e indicador AMM con filtro pasa-banda entre 13-35 años

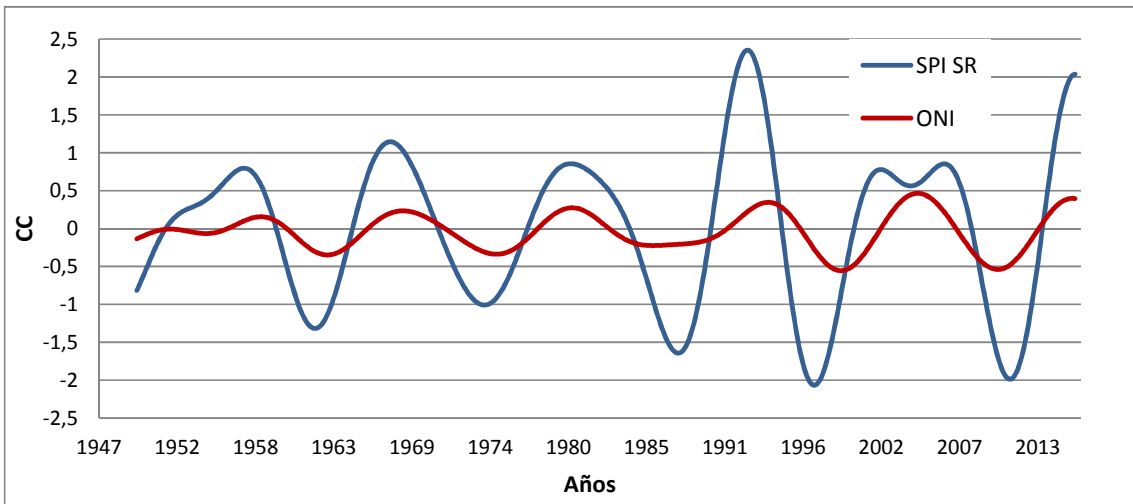


Figura 5.19. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador ONI con filtro pasa-banda entre 7-13 años

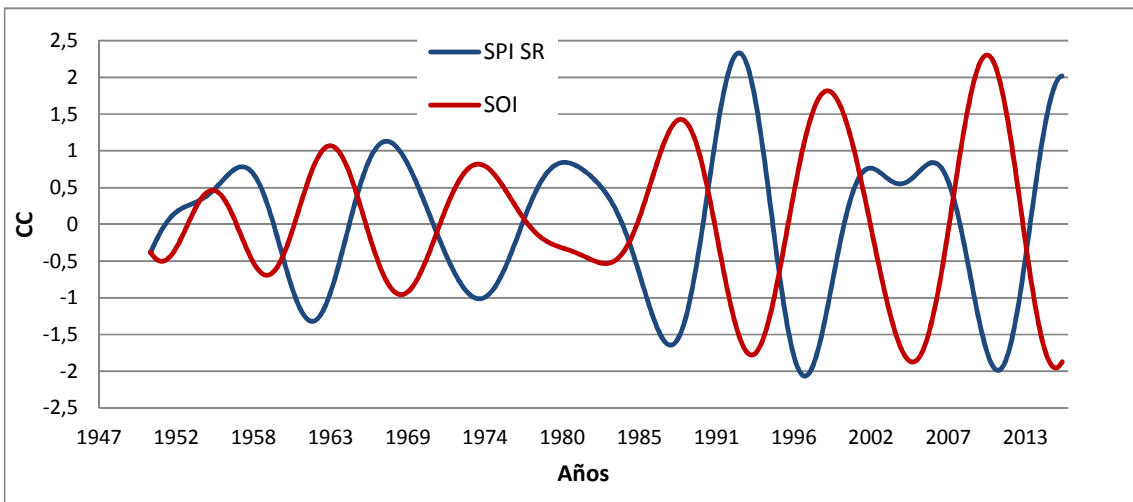


Figura 5.20. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador SOI con filtro pasa-banda entre 7-13 años

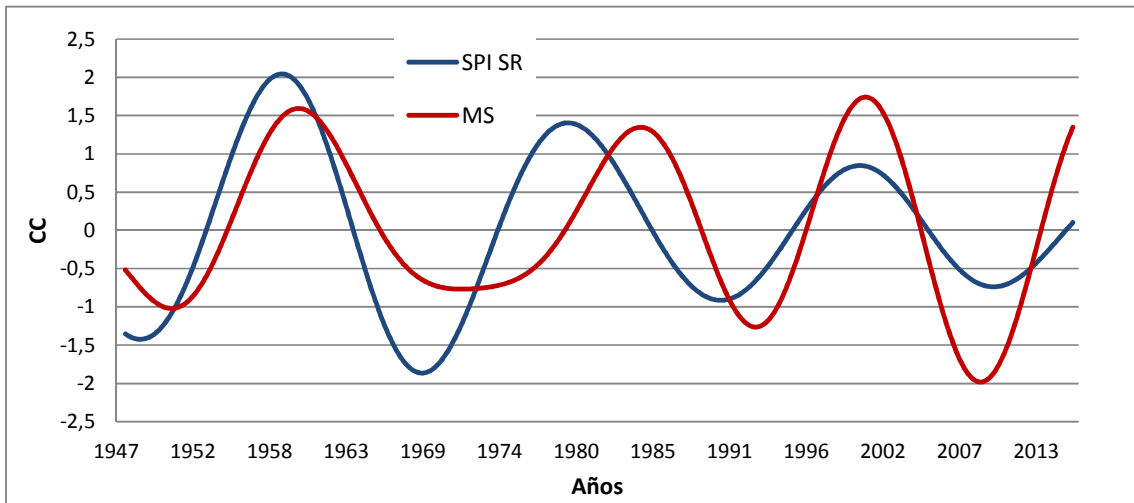


Figura 5.21. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador MS con filtro pasa-banda entre 13-35 años

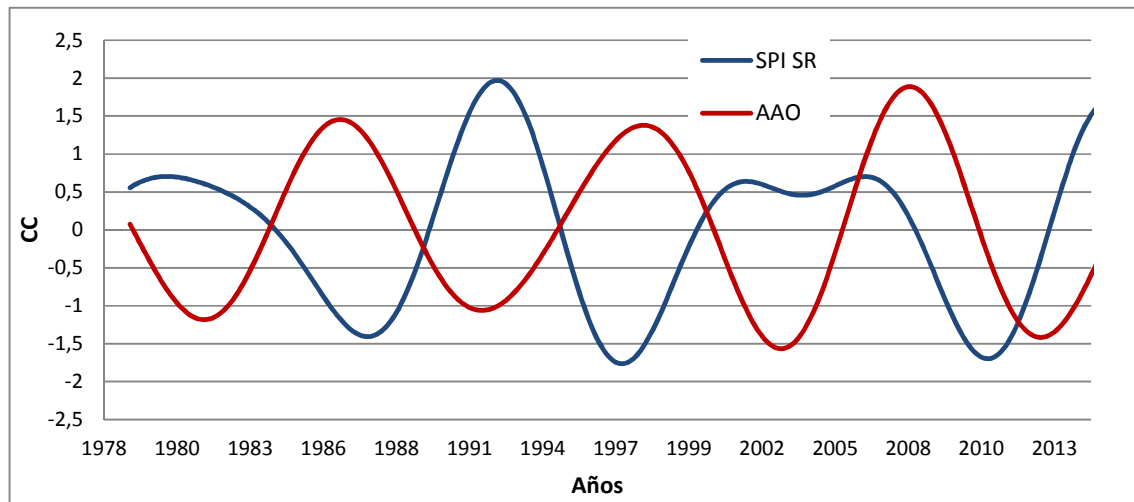


Figura 5.22. Índice SPI normalizado de estación San Roque e indicador AAO con filtro pasa-banda entre 7-13 años

CAPÍTULO 6

***CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES***

6.1. CONCLUSIONES

A través de esta tesis fue posible generar avances en el conocimiento de los aspectos técnicos y científicos asociados a la identificación y evaluación de sequías meteorológicas e hidrológicas en cuencas seleccionadas de la Región Centro de Argentina. En general, fue posible aplicar técnicas tradicionales y no convencionales para la identificación y caracterización, tanto de las principales variables, como de los índices representativos de ambos tipos de sequías. En una instancia final, fue posible integrar conceptos y resultados obtenidos en las cuencas seleccionadas; al lograr identificar frecuencias dominantes en las series de las variables e índices de sequías meteorológicas e hidrológicas, para caracterizar la evolución temporal de los procesos involucrados y establecer un primer contraste con el comportamiento de indicadores macroclimáticos.

De esta manera se aportan conocimientos que conforman las bases y amplían los antecedentes necesarios para profundizar estudios futuros relacionados a las sequías en la Región Centro de Argentina. A continuación se resumen las principales conclusiones obtenidas durante el desarrollo de la tesis en relación a cada uno de los objetivos específicos planteados al inicio.

6.1.1. Sequías meteorológicas

En la cuenca alta del río Suquía, fue posible evaluar sequías meteorológicas con los índices PDI y SPI. Se consideró que, en caso de contar con datos de la recarga del suelo y de evapotranspiración, además de la precipitación, el índice PDI es representativo del fenómeno de sequía, ya que tiene en cuenta las condiciones hidrológicas. Si solo se cuenta con datos de precipitación o el área de estudio presenta una marcada variabilidad espacial, el SPI es considerado un índice aceptable para caracterizar las sequías meteorológicas. Se observaron varios períodos plurianuales con sequías severas y extremas que alternan con períodos normales a húmedos, de manera cíclica. Los períodos de sequías más intensos y prolongados sucedieron en la segunda mitad de la década del '40 y a fines de la década del '60 a partir del cual existieron extensos períodos húmedos y muy húmedos. Desde la década del '80 existieron eventos de sequías aislados y menos severos. Se observó que, a excepción de noviembre y diciembre, el resto de los meses presentan una probabilidad superior al 50% de caracterizarse como secos. En el período 1943-1999 la mayor frecuencia de ocurrencia de sequías severas en la cuenca

estudiada se observó en el mes de marzo, pero no se registraron eventos de sequías extremas en dicho mes.

Luego, a través de un análisis regional de las sequías meteorológicas en la Región Centro de Argentina se lograron identificar grupos de estaciones con comportamiento similar en lo que se refiere a los procesos pluviométricos y en particular, a aquellos relacionados con las sequías intensas, lo que permite identificar subáreas de influencia de los fenómenos de déficit hidrometeorológico. Fue posible identificar tres grupos de estaciones denominados: Grupo 1: estaciones de Sauce Viejo, Rosario, Paraná y Gualeguaychú; Grupo 2: estaciones de Villa María de Río Seco, Pilar y Córdoba y Grupo 3: estaciones de Río Cuarto, Laboulaye, Venado Tuerto, Marco Juárez, el Trébol y Ceres. Tomando como referencia el índice SPI (12 meses) se corroboró que las estaciones pertenecientes a cada uno de los grupos conformados poseen un comportamiento similar respecto de los períodos de sequías. Específicamente, en los tres grupos se observaron períodos de sequías severas y/o extremas alrededor de los años 1989, 1995-1997 y 2008-2009 en todas las estaciones, además de eventos puntuales de sequías intensas en algunas de las ellas a fines de la década del '90. Esto indicaría un posible déficit hidro-meteorológico a nivel regional en la segunda mitad de cada década. Comparando con los resultados obtenidos en la cuenca alta del río Suquía en el periodo de tiempo común a ambos casos (1980-1999) solamente es posible verificar que también hacia fines de la década del '90, específicamente en el año 1999 ocurrieron sequías extremas. Además se observó que, hacia el este de la Región Centro de Argentina y a partir de fines de la década del '90, los períodos húmedos fueron más intensos.

Posteriormente se observó que la estimación de datos de precipitaciones utilizando TRMM es una herramienta de utilidad para estudiar sequías meteorológicas a nivel mensual en grandes cuencas que presentan comportamiento hidrometeorológico no uniforme, sobre todo para las localizaciones de llanura y teniendo en cuenta que para el caso de localizaciones en alturas elevadas existe un sesgo que subestima los valores mensuales de precipitaciones, de manera significativa. Específicamente, en la cuenca del río Carcarañá se pudo observar una clara tendencia de que los parámetros estadísticos que relacionan las precipitaciones medias mensuales observadas y las obtenidas con TRMM empeoran a medida que las estaciones se encuentran en emplazamientos más elevados. Es decir que, las series de precipitaciones mensuales obtenidas por TRMM son menos confiables en zonas de mayor altitud respecto de las áreas de llanura. Además, el comportamiento de la correlación entre las precipitaciones observadas y calculadas no mostró en primera instancia, una relación con la correlación entre los índices SPI calculados a

partir de dichas series, para una misma localización. Pero se observó que entre las series del índice SPI (calculadas a partir de series precipitaciones observadas y estimadas con TRMM) para una misma localización, el sesgo tiende a cero y los coeficientes de correlación se consideran aceptables; lo cual permite la utilización de los valores de precipitación calculados por la TRMM para complementar o completar la respectiva serie de los índices SPI. En la cuenca del río San Antonio, debido a la cobertura extensa de un mismo pixel sobre la superficie, la variabilidad de los fenómenos hidrometeorológicos no se ve contemplada. Aun así, resulta una herramienta de utilidad para la estimación de la precipitación media areal en la cuenca y para el relleno de series de precipitaciones con escasos datos faltantes. La correlación entre los índices SPI calculados a partir de las precipitaciones medias areales observadas y obtenidas por TRMM se considera aceptable, aunque se recomienda un análisis detallado para cada caso.

6.1.2. Sequías hidrológicas

Los resultados de la evaluación del índice SDI a través de la utilización de series sintéticas mostraron que, para el intervalo de tres meses se observaron grandes diferencias respecto de una situación conocida a priori, mientras que, las diferencias disminuyen a medida que se incrementa el intervalo de análisis. Se mostró que se debe tener en cuenta la tendencia que presenten los registros, ya que tiene influencia en los resultados. A partir de esto se considera que es posible analizar las sequías hidrológicas utilizando el índice SDI en el intervalo de 12 meses (k4), de tal manera de minimizar la influencia de algunos de los procesos temporales que componen la variable caudal y que no serían representativos del fenómeno de la sequía hidrológica, como la variabilidad interanual y la aleatoriedad. Las sequías hidrológicas evaluadas a través del índice SDI (k4) en las cuencas del río Carcarañá y del río San Antonio representado por las estaciones Pueblo Andino (1981-2013) y Barrio el Canal (1998-2013), respectivamente, se caracterizaron como suaves a moderadas en periodos similares y sin evidencia de la ocurrencia de sequías extremas en ninguna de las cuencas analizadas. Sin embargo ambos casos presentaron tendencias opuestas de los índices de sequías, siendo positiva en la estación de Pueblo Andino y negativa en la estación de Barrio el Canal, lo que indicaría un posible proceso de déficit hídrico en la cuenca serrana.

6.1.3. Relación entre variables e índices de sequías

En la cuenca del río Carcarañá se observó cierta heterogeneidad en cuanto a los fenómenos que dan origen a las precipitaciones y a las características con las que las mismas impactan en distintos sectores de la cuenca. Esta característica muestra la necesidad de contar con información distribuida de las precipitaciones para el análisis conjunto del comportamiento de las variables. Se identificó que, a nivel mensual, la correlación para explicar el caudal no presenta diferencias de consideración si se utilizan precipitaciones medias discriminadas por subcuencas o por conglomerados, pero sí mejora notoriamente si además de éstas, se tiene en cuenta el caudal en el periodo inmediato anterior al analizado. A nivel anual, la correlación entre los índices SPI y SDI calculados para el periodo 1999-2010 es aceptable. No se observó una mejora en la misma con funciones más complejas o con órdenes de magnitud mayores.

La cuenca del río San Antonio posee un comportamiento espacial relativamente homogéneo a nivel mensual, en cuanto a las precipitaciones. Esta característica indicaría que no es necesario utilizar información de precipitaciones en grupos para el análisis conjunto del comportamiento de las variables. Se pudo observar que a nivel mensual, la correlación para explicar el caudal no presenta diferencias de consideración si se utilizan las precipitaciones de manera discretizada en el espacio o el promedio aritmético de toda la cuenca; y que la influencia del caudal inmediato anterior no es apreciable. A nivel anual, la correlación entre los índices SPI y SDI calculados para el periodo 1999-2010 no es aceptable. Lo que muestra que no sería eficiente analizar la correlación de los índices con el fin de caracterizar la relación entre los tipos de sequías meteorológicas e hidrológicas.

6.1.4. Periodicidades plurianuales de las series de índices de sequías y su relación con indicadores macroclimáticos

Se identificaron las periodicidades plurianuales en series temporales de índices relacionados a las sequías meteorológicas (SPI) e hidrológicas (SDI) en estaciones de dos cuencas de la Región Centro de la República Argentina. El análisis espectral realizado permitió identificar las frecuencias relevantes de las fluctuaciones temporales de cada serie. En el caso de la cuenca del río Carcarañá, específicamente en la estación Río Cuarto, se pudieron observar frecuencias dominantes en el índice SPI de entre 1/3 y 1/7 años. Mientras que la serie del índice SDI calculado a partir de los registros de caudales de la estación Pueblo Andino, presentó frecuencias dominantes de 1/7,1, 1/9,1 y 1/10,6 años. Luego, en la cuenca alta del río Suquía,

específicamente en la estación San Roque se pudieron observar frecuencias dominantes en el índice SPI de 1/21, 1/12 y 1/4,7 años.

Se observó que las series de índices SPI de la estación San Roque y de la estación Río Cuarto presentan una alta correlación a nivel bidecadal con los indicadores macroclimáticos TSA y MS. Mientras que a nivel decadal cada caso muestra correlaciones elevadas con indicadores diferentes. La serie del índice SDI de la estación de Pueblo Andino posee una alta correlación con los índices TSA y AMM a nivel decadal y bidecadal y se observa una correlación elevada con el indicador MS, a nivel decadal. Es decir que en dos cuencas de la Región Centro de Argentina se observó una notable relación entre los índices de sequías SPI y SDI con los indicadores macroclimáticos del Océano Atlántico y de Manchas Solares.

6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con estudios en la temática de las sequías abordando el tema desde distintos enfoques, ya sea ampliando lo desarrollado en la presente tesis sobre el área de estudio, o aplicándolo en otras cuencas. Como así también se considera conveniente aplicar y evaluar nuevas metodologías ya sea de obtención de datos, como de evaluación de los procesos relacionados a este fenómeno extremo.

Se considera que la finalidad última de este trabajo y los que se desarrollen a priori relacionados a esta temática, debería ser la de desarrollar una herramienta para la gestión y planificación de medidas estructurales y no estructurales tendientes a mitigar los efectos adversos de los distintos tipos de sequías, sobre todo si un individuo o una comunidad es afectada por dicho fenómeno hidrológico.

Para esto, se cree necesario y se recomienda generar equipos multidisciplinarios que complementen el estudio de los distintos aspectos de las sequías con el conocimiento de las particularidades de cada región y a su vez, incorporar a los distintos agentes involucrados de una comunidad para identificar los intereses y las responsabilidades en el trabajo a llevar a cabo con el fin de minimizar los efectos adversos de las sequías.

CAPÍTULO 7

REFERENCIAS

Becker, A. 1992. Criteria of a hydrologically sound structuring of large scale land surface process models. In: O’Kane (ed.) *Advances in theoretical hydrology: a tribute to James Dooge*. Amsterdam: Elsevier. Cap.7, p.97-111.

Becker, A. and Nemeč, J. 1987. Macroscale hydrologic models in support of climate research. *The Influence of Climate Change and Climate Variability on the Hydrological Regime and Water Resources*, IAHS Publ. no. 168, 431-445.

Bendat, J. and Piersol, A. 2000. *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. Editorial, John Wiley & Sons, Inc. Nueva York, Estados Unidos, 594 pp.

Bianchi, A. R. and Cravero, S. A. C. 2010. *Atlas climático digital de la República Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 57 pp.

Blain, G. C. 2012. Revisiting the probabilistic definition of drought: strengths, limitations and an agrometeorological adaptation. *Bragantia*, Campinas, 71(1), 132-141.

Campos, A. N, Figueroa Schibber, E. y García, A. G. 2014. Evaluación de la información satelital para el estudio de la dinámica hidrológica de la Llanura Pampeana. 2° Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Instituto Nacional del Agua. Buenos Aires, Argentina.

Carbone, M. E. y Piccolo, M. C. 2004. Análisis de los períodos secos y húmedos en la cuenca del Arroyo Claromecó, Argentina. *Papeles de Geografía*, 40, 25-36.

Carrão, H., Sepulcre, G., Horion, S. y Barbosa, P. 2013. A multitemporal and non-parametric approach for assessing the impacts of drought on vegetation greenness: a case study for Latin America. *Earsel Proceedings* 12, 1/2013.

Chiew, F. H. S. and Mc Mahon, T. A. 2002. Global ENSO-streamflow teleconnection, streamflow forecasting and interannual variability. *Hydrological Sciences Journal*. 47, 505–522.

Cicero, A. R. 2005. Evaluación agrometeorológica de indicadores de sequía en la provincia de Mendoza. Tesis de Magíster en Ciencias Agropecuarias, Mención Agrometeorología, 2005. Escuela para Graduados, Fac. de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. 115 pp.

Colladón, L. y Pazos, I. 2014. *Anuario pluviométrico 1992/93-2011/12, cuenca del Río San Antonio -1a ed.-* ISBN 978-987-45194-3-6 Ezeiza: Instituto Nacional del Agua, 86 pp.

Cooley, J. and Tukey, J. 1965. An algorithm for the machine computation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, 19:297–301.

Coronel A. y Sacchi O. 2006. Climatología de eventos secos y húmedos en el sur santafesino. *Revista de investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. Número IX.*

Díaz, E. B. 2016. Sequías hidrológicas y su relación con variables macroclimáticas en la República Argentina. Tesis doctoral. FCEFyN. Universidad Nacional de Córdoba. 170 pp.

D’Ambrosio, G., Bohn, V. y Piccolo, M. 2013. Evaluación de la sequía 2008-2009 en el oeste de la Región Pampeana (Argentina). *Cuadernos Geográficos, Norteamérica*, 52.

Díaz Lozada, J. M., García, C. M., Herrero, H.; Barchiesi, G. M., Romagnoli, M., Portapila, M., Lopez, F., Castelló, E., Cossavella, A. y Brarda, J.P. 2015. Cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Vol. 2, Núm. 1.*

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. y Robledo C.W. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Dracup, J. A, Lee, K. S. and Paulson, E. G. Jr. 1980. On the definitions of drought. *Water Resources Research*, 16 (2), 297-302.

Earth system research laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Sitio web: <http://www.esrl.noaa.gov/> (Consulta hasta diciembre 2015)

Edwards, D. C. and McKee T. B. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report 97-2*, Departamento de Ciencia Atmosférica, Universidad del Estado de Colorado, Fort Collins, Colorado.

Gabriel, K. R. 1971. Biplot display of multivariate matrices with application to principal components analysis. *Biometrika*, 58: 453-467.

García, C. L. 2013. Utilización de información satelital y terrestre para el manejo integrado del recurso hídrico de una cuenca serrana en la provincia de Córdoba, Argentina. Tesis Doctoral de la Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Córdoba, 167 pp.

Gil Montero, V. G. 2009. Abatimiento Espacial Temporalmente Distribuido de Lámina Precipitada en Cuencas de Montaña. Tesis de Grado. Universidad Católica de Córdoba. 2009.

Gobierno de la provincia de Córdoba. Sitio web: <http://www.cba.gov.ar/> (Consulta diciembre de 2016)

Gobierno de la provincia de Entre Ríos. Sitio web: <http://www.entrerios.gov.ar/> (Consulta diciembre de 2016)

Gobierno de la provincia de Santa Fe. Sitio web: <http://www.santafe.gov.ar/> (Consulta diciembre de 2016)

Gonzáles, J. and Valdes, J.B. 2004. The mean frequency of recurrence of in-time-multidimensional events for drought analyses. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 17-28.

Hao, Z., and AghaKouchak, A. 2013. Multivariate standardized drought index: A parametric multi-index model. *Elsevier. Advances in Water Resources*, 57, 12–18.

Hartmann, T., Di Bella, C. and Oricchio, P. 2003. Assessment of the possible drought impact on farm production in the SE of the province of Buenos Aires, Argentina. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57 (4), 281–288.

Havrylenko, S. B., Bodoque, J. M., Zucarelli, G. V. and Mercuri, P. A. 2013. Agricultural drought analysis in the Arrecifes basin [Pampa region, Argentina] using the SWAT model. In *International SWAT Conference & Workshops*. Toulouse, Francia.

I.N.A-C.I.R.S.A. (2003-2004): Boletines mensuales de datos hidrológicos. Cuenca del Río San Antonio. Sistema telemétrico CIRSA. Villa Carlos Paz. Argentina.

Instituto Geográfico Nacional. Sitio web: <http://www.ign.gob.ar/> (Consulta diciembre de 2016)

Instituto Nacional del Agua. Sitio web: <http://www.ina.gov.ar/> (Consulta diciembre de 2016)

Keyantash, J. and Dracup, J.A. 2002. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of American Meteorological Society*, 83 (8), 1167–1180.

Kim, T. and Valdes, J. B. 2003. Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks. *J. Journal of Hydrologic Engineering*, 8 (6), 319–328.

Kim, T., Valdés J. B. and Aparicio J. 2002. Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico. *IWRA, Water International*. 27(3), 420-430.

Krause, P. 2000. Das hydrologische Modellsystem J2000 - Beschreibung und Anwendung in großen Flußgebieten. Forschungszentrum Jülich, Jülich, Alemania, 244 pp.

Krause, P. 2002. Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, 663-673.

Kummerow, C., Barnes, W., Kozu, T., Shiue, J. and Simpson, J. 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15, 809–817.

Kushnir, Y., Seager, R., Ting, M., Naik, N. and Nakamura, J. 2010. Mechanisms of tropical Atlantic SST influence on North American hydroclimate variability. *Journal of Climate*. 23, 5610–5628.

Lin, L. 1989. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics*, 45, 255-268.

Lucero, O.A., 1998. Effects of the southern oscillation on the probability for climatic categories of monthly rainfall, in a semi-arid region in the southern mid-latitudes. *Atmospheric Research* 49_1998.337–348

McKee, T.B., Doesken N. J. and Kliest, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology*, Anaheim, CA. American Meteorological Society. Boston, MA. 179-184.

Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda de la Nación. Sitio web: <http://www.mininterior.gov.ar/provincias/regiones.php>. (Consulta diciembre de 2016)

Mishra, A. K. and Singh, V. P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391, 202–216.

Moya, G. G., 2004. Análisis para la gestión integrada de los Recursos Hídricos de los Ríos Suquía y Xanaes. Provincia de Córdoba. Tesis de Maestría. F.C.E.F.y N. Universidad Nacional de Córdoba, 279 pp.

Moreno Cadavid, J. y Salazar, J. E. 2008. Generación de series sintéticas de caudales usando un Modelo Matalas con medias condicionadas. Avances en Recursos Hidráulicos, Núm. 17, Medellín, Colombia. ISSN 0121-5701.

Nalbantis, I. 2008. Evaluation of a hydrological drought index. *European Water* 23/24: 67-77.

NASA Homepage 2015. Sitio web: <http://trmm.gsfc.nasa.gov/> (consulta: marzo 2016)

National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. Sitio web: <http://www.aoml.noaa.gov> (consulta Diciembre de 2015).

ONU- Habitat. Programa de las Naciones Unidas para los asentamientos Humanos. 2012. Estado de las ciudades de América Latina y el Caribe. ISBN Serie 978-92-1-133397-8 ISBN 978-92-1-132469-3.

Organización Meteorológica Mundial. 2012. Índice normalizado de precipitación Guía del usuario © OMM-Nº 1090. ISBN 978-92-63-31090-3.

Ortiz Gómez, R., Barragán Barrios, M.C. y Alvarado Medellin, P. 2010. Evaluación de la sequía meteorológica a escala regional en la cuenca Lerma Chapala. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay, 8 pp.

Özger, M., Mishra, A.K. and Singh, V.P. 2009. Low frequency drought variability associated with climate indices. *Journal of Hydrology* 364, 152-162.

Palmer, W.C., 1965. Meteorological drought. Weather Bureau Research. Paper Nº 45, 58 pp.

Pearson, K. 1896. Contributions to the mathematical theory of evolution. III. Regresion. heredity and panmixia. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, A 187, 253-318.

Pierrehumbert, C. L. 1977. Rainfall intensity-frequency-duration estimation. Capítulo 2 en: *Australian Rainfall and Runoff*. The Institution of Engineers. Canberra, Australia.

Rao, A.R., Padmanabhan, G. 1984. Analysis and modeling of Palmer's drought index series. *Journal of Hydrology*. 68, 211–229.

Rasmussen, K. L., Choi, S. L., Zuluaga, M. D. and Houze R. A. Jr. 2013. TRMM precipitation bias in extreme storms in South America. *Geophysical Research Letters*, 40, 3457–3461, doi:10.1002/grl.50651.

Ravelo, A. C. 2000. Caracterización agroclimática de las sequías extremas en la Región Pampeana Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 20, (2), 187-192.

Ravelo, A. C. y Herrero, M. A. 1999. Programa de análisis de las sequías, PDIWIN v. 1.0. Registro de la Propiedad Intelectual Exp. No. 30666.

Ravelo, A. C., Zanvettor, R. E. y Boletta, P. E. C. 2014. Atlas de Sequías de la República Argentina. CREAN: Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, UNC –CONICET. ISBN 978-950-33-1195-0, 21 p. Sitio web: http://www.crean.unc.edu.ar/atlas/atlas_sequia.html (Consulta hasta julio 2015)

Rivera, J. A. 2014. Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires, 352 pp.

Santos, J. F.; Portela, M. M. y Pulido-Calvo, I. 2015. Previsão de secas na primavera em Portugal Continental com base em indicadores climáticos de larga escala. *Ingeniería del Agua*. 19.4. EISSN: 1886-4996. ISSN: 1134-2196. IWA Publishing, Editorial UPV, FFIA, 211-227.

Santos, M. 2011. Caracterização espaço-temporal de secas utilizando ondaletas e o standardized precipitation index: uma aplicação para a parcela mineira da bacia do rio São Francisco. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 163 pp.

Scarpati, O. E. y Capriolo, A. D. 2013. Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. Vol 2013 (82), 38–51.

Scian, B. and Donnari, M. 1997. Retrospective analysis of the Palmer Drought Severity index in the semi-arid pampas region, Argentina. *International Journal of Climatology*, 17(3), 313–322.

Servicio Meteorológico Nacional. Sitio web: <http://www.hidricosargentina.gov.ar>. (Consulta hasta diciembre de 2016)

Sunspot Index and Long-term Solar Observations: SILSO. Sitio web: <http://www.sidc.be/silso> (consulta Diciembre de 2015)

Sokal, R. R. and Michener, C. D. 1958. A Statistical Methods for Evaluating Systematic Relationships. University of Kansas Science Bulletin, 38, 1409-1438

Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Sitio web: <http://www.hidricosargentina.gov.ar>. (Consulta hasta agosto de 2016)

Thomas, H. Y. and Fiering, M. 1962. Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulations. In: Maass A, Humfshmidt MM, Dorfman R, Thomas Jr. HA, Marglin SA, Fair GM (eds.). Design of water resource systems. Harvard University Press, Cambridge, 459-493.

Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38, 55-94.

Tsakiris, G. and Pangalou, D. 2009. Drought characterisation in the Mediterranean. Coping with drought risk in agriculture and water supply systems. Iglesias, A., Garrote, L., Cancelliere, A., Cubillo, F., Wilhite, D. (eds.), Springer, 69-80.

Tucci, C. E. M. 2002. Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos. Agencia Nacional de Aguas, ANA. Forum Brasileiro de Mudanças Climáticas. Brasil, 150 pp.

UNESCO. 2010. Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC). PHI-VII / Documento Técnico N° 25. Proyecto elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de América Latina y el Caribe, 55 pp.

Valiente O. 2001. Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. Investigaciones Geográficas, 26, 59-80.

Velasco I. y Aparicio, J. 2004. Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande. Ingeniería Hidráulica en México, XIX (3), 37-53.

Vicario, L. 2008. Evaluación de las sequías hidro-meteorológicas en la cuenca del dique San Roque, Córdoba. Tesis de Maestría. FCEfYN. Universidad Nacional de Córdoba, 190 pp.

Vicario L., García C. M., Colladón, L., Ravelo, A. y Rodríguez A. 2007. Incertidumbre en la estimación de caudales de períodos de estiaje. Tercer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Córdoba, Argentina, 7 pp.

Vicario, L., García, C. M.; Teich, I.; Bertoni, J. C.; Ravelo, A. y Rodríguez, A. 2015. Caracterización de las sequías meteorológicas en la región central de la Argentina. Revista Tecnología y Ciencias del Agua. ISSN 2007-2422. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua., 6 (1), 155-167.

Vicario, L., Ravelo, A., Zanvettor, R. y Rodríguez, A. 2007. Monitoreo de las sequías en la cuenca del dique San Roque, Córdoba. Memorias del XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán, Argentina, 7 pp.

Vicente-Serrano, S. M. 2006. Differences in spatial patterns of drought on different time scales: an analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resour Manage.* 20, 37–60.

Vigiak, O. and Bende-Michl, U. 2013. Estimating bootstrap and Bayesian prediction intervals for constituent load rating curves. *Water Resources Research*, 49, 8565–8578, doi:10.1002/2013wr013559

Wagner Gómez A. I., Ortiz Gómez, R. y Barragán Barrios, M. C. 2012. Evaluación de la sequía hidrológica en la cuenca Lerma Chapala. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México, 5 pp.

Wilhite, D. A. 1997. State actions to mitigate drought: Lessons learned. *Journal of the American Water Resources Association* 33(5), 961-68.

Wilhite, D. A. and Glantz, M. H. 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10, 111-120.

Wong, G., Van Lanen, H. A. and Torfs, P. J. 2013. Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought. *Hydrological Sciences Journal*, 58 (2), 253–270.

Wu, Z., Mao, Y., Li, X., Lu, G., Lin, Q. and Xu, H. 2015. Exploring spatiotemporal relationships among meteorological, agricultural, and hydrological droughts in Southwest China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-12.

Gracias Virgen del Valle