

**Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental**

**Proyecto de grado Ingeniería Civil
Análisis detallado de conceptualización de sequías y metodologías para definición de
índices de escasez: Caso Cuenca Río Sumapaz**

**Por: Laura Patricia Torres Rojas
Asesor: Mario Díaz-Granados Ortiz, M. Sc.**

Bogotá D.C, Julio de 2015

Tabla de Contenido

1. Alcance y justificación	10
2. Introducción	11
3. Objetivos	13
3.1. General	13
3.2. Específicos	13
4. Marco teórico	14
4.1. Sequía.....	14
4.1.1. Definiciones	14
4.1.2. Clasificación.....	15
4.1.3. Índices empleados en definición	17
4.1.4. Comportamiento de la sequía en Colombia	25
4.2. Escasez	26
4.2.1. Requerimientos humanos de agua.....	27
4.2.2. Vulnerabilidad de recursos hídricos.....	29
4.2.3. Requerimientos ambientales de agua	34
4.2.4. Índice para Colombia: IDEAM	36
5. Caso de estudio: Cuenca Río Sumpaz.....	40
6. Metodología	46
6.1. Recolección de información hidro-meteorológica	46
6.2. Estimación de valores faltantes en series	49
6.3. Selección y cálculo de índices de sequía.....	50
6.3.1. Índice de porcentaje de normalidad.....	51
6.3.2. Índices de Palmer	51
6.3.3. Índice estandarizado de precipitación	58
6.3.4. Deciles.....	61
6.4. Comparación	61
6.4.1. Variaciones en longitud de series consideradas	61
6.4.2. Comparación entre sí.....	62
6.4.3. Índices de eventos macro climáticos	62
6.4.4. Series de caudales.....	62
6.5. Recolección de información.....	63
6.6. Evaluación de índices bajo escenarios actuales	64
6.7. Evaluación de índices bajo escenarios de crecimiento poblacional y variabilidad climática.....	64
7. Resultados y discusión	66
7.1. Régimen hidrológico estaciones de estudio	66
7.2. Cálculo de índices	71
7.3. Comparación	87
7.3.1. Variaciones en longitud de series consideradas	87
7.3.2. Comparación entre sí.....	92
7.3.3. Índices de eventos macro climáticos	104
7.3.4. Series de caudales.....	111

7.6. Recolección de información.....	118
7.5. Evaluación de índices de escasez bajo escenarios actuales.....	121
7.6. Evaluación de índices de escasez bajo escenarios de crecimiento poblacional y variabilidad climática	124
8. Conclusiones y recomendaciones.....	128
8.1. Conclusiones	128
8.2. Recomendaciones.....	131
9. Referencias Bibliográficas	132
10. Anexos.....	136

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Régimen hidrológico, estación pluviométrica La Playa	66
Gráfica 2. Régimen hidrológico, estación pluviométrica Cabrera	66
Gráfica 3. Régimen hidrológico, estación pluviométrica Ospina Pérez	67
Gráfica 4. Régimen hidrológico, estación pluviométrica Carmen de Apicalá	67
Gráfica 5. Régimen hidrológico, estación pluviométrica El Salero	67
Gráfica 6. Régimen hidrológico, estación pluviométrica Peñas Blancas	68
Gráfica 7. Régimen hidrológico, estación pluviométrica Hacienda La Granja	68
Gráfica 8. Régimen hidrológico, estación climatológica ordinaria Pandi	68
Gráfica 9. Régimen hidrológico, estación climatológica ordinaria Base aérea Melgar	69
Gráfica 10. Régimen hidrológico, estación climatológica ordinaria Peñas Blancas	69
Gráfica 11. Régimen hidrológico, estación limnigráfica El profundo automática	69
Gráfica 12. Régimen hidrológico, estación limnigráfica La Playa	70
Gráfica 13. Régimen hidrológico, estación limnimétrica Dos Mil	70
Gráfica 14. Régimen hidrológico, estación limnigráfica Melgar	70
Gráfica 15. Régimen hidrológico, estación limnigráfica El Limonar	71
Gráfica 16. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación La Playa	76
Gráfica 17. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Cabrera	77
Gráfica 18. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Ospina Pérez	78
Gráfica 19. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Carmen de Apicalá	79
Gráfica 20. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación El Salero	80
Gráfica 21. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Peñas Blancas (pluviométrica)	81
Gráfica 22. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Hacienda La Granja	82
Gráfica 23. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Pandi	83
Gráfica 24. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Base aérea Melgar	84
Gráfica 25. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Peñas Blancas (climatológica ordinaria)	85
Gráfica 26. Comparación SPI 1 mes, estación Cabrera (1960-1990)	87
Gráfica 27. Comparación SPI 12 meses, estación Cabrera (1960-1990)	88
Gráfica 28. Comparación SPI 1 mes, estación Carmen de Apicalá (1980-2010)	88
Gráfica 29. Comparación SPI 12 meses, estación Carmen de Apicalá (1980-2010)	88
Gráfica 30. Comparación SPI 1 mes, estación Pandi (1970-2000)	89
Gráfica 31. Comparación SPI 12 meses, estación Pandi (1970-2000)	89
Gráfica 32. Comparación SPI 1 mes, estación El Salero (1980-2010)	89
Gráfica 33. Comparación SPI 12 meses, estación El Salero (1980-2010)	90
Gráfica 34. Comparación índice Z, estación Pandi (1970-2000)	90
Gráfica 35. Comparación índice Z, estación Pandi (1980-2010)	90
Gráfica 36. Comparación índice PDSI, estación Pandi (1970-2000)	91

Gráfica 37. Comparación índice PDSI, estación Pandi (1980-2010)	91
Gráfica 38. Comparación índice PHDI, estación Pandi (1970-2000)	91
Gráfica 39. Comparación índice PHDI, estación Pandi (1980-2010)	92
Gráfica 40. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación La Playa	93
Gráfica 41. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación Cabrera	93
Gráfica 42. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación Ospina Pérez.....	93
Gráfica 43. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación Carmen de Apicalá	94
Gráfica 44. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación El Salero	94
Gráfica 45. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación Peñas Blancas PM	94
Gráfica 46. Relación índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación Hacienda La Granja	95
Gráfica 47. Relación índices de porcentaje de normalidad y estandarizado de precipitación estación La Playa	95
Gráfica 48. Relación índices de porcentaje de normalidad y estandarizado de precipitación estación Cabrera	96
Gráfica 49. Relación índices de porcentaje de normalidad y SPI estación Ospina Pérez	96
Gráfica 50. Relación índices de porcentaje de normalidad y SPI estación Carmen de Apicalá	96
Gráfica 51. Relación índices de porcentaje de normalidad y SPI estación El Salero	97
Gráfica 52. Relación índices de porcentaje de normalidad y SPI estación Peñas Blancas	97
Gráfica 53. Relación índices de porcentaje de normalidad y SPI estación Hacienda La Granja...	97
Gráfica 54. Relación índices de deciles y SPI estación La Playa	98
Gráfica 55. Relación índices de deciles y SPI estación Cabrera	98
Gráfica 56. Relación índices de deciles y SPI estación Ospina Pérez	99
Gráfica 57. Relación índices de deciles y SPI estación El Salero	99
Gráfica 58. Relación índices Z y SPI estación CO Peñas Blancas	100
Gráfica 59. Relación índices de deciles y Z estación CO Peñas Blancas	101
Gráfica 60. Relación índices de deciles y SPI estación CO Peñas Blancas	101
Gráfica 61. Relación índices Z y SPI estación CO Pandi	102
Gráfica 62. Relación índices SPI y porcentaje de normalidad estación CO Pandi	102
Gráfica 63. Relación índices de porcentaje de normalidad y Z estación CO Pandi	102
Gráfica 64. . Relación índices Z y SPI estación CO Base aérea Melgar	103
Gráfica 65. Relación índices SPI y porcentaje de normalidad estación CO Base aérea Melgar...	103
Gráfica 66. Relación índices de porcentaje de normalidad y Z estación CO Base aérea Melgar .	104
Gráfica 67. Coeficientes de correlación obtenidos para diferentes periodos, estación Cabrera ..	105
Gráfica 68. Coeficientes de correlación obtenidos para diferentes periodos, estación Base aérea Melgar	106
Gráfica 69. Coeficientes de correlación obtenidos para diferentes periodos, estación Carmen de Apicalá	106
Gráfica 70. Comparación valores MEI y PHDI promedio, estación Peñas Blancas	107
Gráfica 71. Comparación valores MEI y PDSI promedio, estación Peñas Blancas	107

Gráfica 72. Comparación valores MEI y Z promedio, estación Peñas Blancas.....	108
Gráfica 73. Comparación valores MEI y PHDI promedio, estación Pandi	108
Gráfica 74. Comparación valores MEI y PDSI promedio, estación Pandi	109
Gráfica 75. Comparación valores MEI y Z promedio, estación Pandi.....	109
Gráfica 76. Comparación valores MEI y PHDI promedio, estación Base aérea Melgar	110
Gráfica 77. Comparación valores MEI y PDSI promedio, estación Base aérea Melgar	110
Gráfica 78. Comparación valores MEI y Z promedio, estación Base aérea Melgar.....	110
Gráfica 79. Series de índices, ventana temporal 1 mes, estación Melgar	113
Gráfica 80. Series de índices, ventana temporal 3 meses, estación Melgar	113
Gráfica 81. Series de índices, ventana temporal 6 meses, estación Melgar	113
Gráfica 82. Series de índices, ventana temporal 9 meses, estación Melgar	114
Gráfica 83. Series de índices, ventana temporal 12 meses, estación Melgar	114
Gráfica 84. Series de índices, ventana temporal 1 mes, estación La Playa.....	114
Gráfica 85. Series de índices, ventana temporal 3 meses, estación La Playa	115
Gráfica 86. Series de índices, ventana temporal 6 meses, estación La Playa	115
Gráfica 87. Series de índices, ventana temporal 9 meses, estación La Playa	115
Gráfica 88. Series de índices, ventana temporal 12 meses, estación La Playa	116
Gráfica 89. Relación SPI 9 meses, estación Melgar	116
Gráfica 90. Relación SPI 12 meses, estación Melgar	117
Gráfica 91. Relación SPI 9 meses, estación La Playa	117
Gráfica 92. Relación SPI 12 meses, estación La Playa	117
Gráfica 93. Relación SPI 9 meses, estación El Profundo	118
Gráfica 94. Relación SPI 12 meses, estación El Profundo	118
Gráfica 95. Curva de duración de caudales Estación El Profundo.....	119
Gráfica 96. Curva de duración de caudales Estación El Profundo.....	119
Gráfica 97. Curva de duración de caudales Estación Dos Mil	119
Gráfica 98. Curva de duración de caudales Estación Melgar.....	120
Gráfica 99. Curva de duración de caudales Estación El Limonar	120

Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1. Mapa con delimitación de cuenca del Río Sumapaz</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 2. Fisiografía del Área de Desarrollo Rural (ADR) del Sumapaz.....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 3. Pisos altimétricos del ADR del Sumapaz.....</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 4. Pisos térmicos y provincias de humedad ADR Sumapaz.....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 5. Rangos de pendiente del ADR del Sumapaz</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 6. Mapa de Profundidad radicular en el ADR del Sumapaz</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 7. Ubicación estaciones hidro-meteorológicas dentro de cuenca</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 8. Formato de información entregada por IDEAM.....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 9. Formato archivo de entrada series para cálculo de índices de Palmer</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 10. Formato archivo de entrada AWC para cálculo de índices de Palmer.....</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 11. Cobertura de la tierra municipio de Cabrera, estación CO Peñas Blancas</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 12. Cobertura de la tierra municipio de Melgar, estación CO Base aérea Melgar</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 13. Cobertura de la tierra municipio de Pandi, estación CO Pandi</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 14. Leyenda mapas de cobertura de tierra</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 15. Interfaz herramienta de cálculo índices de Palmer.....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 16. Ventana de carga de datos AWC.....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 17. Ventana de carga de datos temperatura y precipitación.....</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 18. Formato de datos generados por programa de cálculo Palmer.....</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 19. Formato archivo de entrada programa SPI</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 20. Interfaz programa SPI</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 21. Escalas temporales elegidas para índice estandarizado de precipitación</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 22. Introducción de archivo de entrada a programa SPI.....</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 23. Formato archivo de salida programa SPI.....</i>	<i>60</i>

Índice de Tablas

Tabla 1. Elementos clave para la definición de sequía y escasez de agua	12
Tabla 2. Clasificación del índice SPI según lo define el IDEAM	19
Tabla 3. Clasificación a partir del índice de severidad de sequía de Palmer	20
Tabla 4. Clasificación a partir del índice de sequía hidrológica de Palmer	22
Tabla 5. Clasificación de Índice de deciles de precipitación.....	24
Tabla 6. Clasificación de escasez Índice de Falkenmark	27
Tabla 7. Indicadores y parámetros del WSI.....	30
Tabla 8. Descripción de los parámetros de presión del WSI sus niveles y valores	31
Tabla 9. Descripción de los parámetros de estado del WSI sus niveles y valores.....	31
Tabla 10. Descripción de los parámetros de respuesta del WSI sus niveles y valores	32
Tabla 11. Clasificación de estrés hídrico de acuerdo al índice de escasez de agua.....	33
Tabla 12. Indicadores considerados dentro del cálculo del ESI.....	34
Tabla 13. Indicadores empleados en cálculo del índice de pobreza de agua	35
Tabla 14. Clasificación de cuencas de acuerdo con WSI	36
Tabla 15. Clasificación de IRH y descripción de categorías.....	37
Tabla 16. Rangos y categorías del índice de uso de agua (IUA).....	37
Tabla 17. Categorías para índice de vulnerabilidad del desabastecimiento (IVH).....	37
Tabla 18. Categorías de clasificación ICAL	39
Tabla 19. Estaciones hidro-meteorológicas IDEAM cuenca río Sumapaz.....	46
Tabla 20. Longitud del registro de valores totales mensuales de precipitación estaciones pluviométricas	48
Tabla 21. Longitud del registro de valores totales mensuales de precipitación estaciones climatológicas ordinarias	48
Tabla 22. Longitud del registro de valores medios mensuales de temperatura estaciones climatológicas ordinarias	48
Tabla 23. Longitud del registro de valores medios mensuales de caudal estaciones limnimétricas y limnigráficas	48
Tabla 24. Profundidades radicales máximas para estaciones consideradas	55
Tabla 25. Clasificación suelo, capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente de estaciones de estudio.....	55
Tabla 26. Valores de agua disponible total para estaciones de estudio	55
Tabla 27. Periodos de análisis, por estación, de índices de Palmer.....	58
Tabla 28. Estaciones analizadas en periodos estándar para SPI.....	61
Tabla 29. Estaciones comparadas con series de caudales y periodo de comparación.....	63
Tabla 30. Oferta y demanda año medio y seco, cuenca Sumapaz	63
Tabla 31. Oferta y demanda año medio y seco, Cabrera y Melgar	63
Tabla 32. Periodos de sequía por índice en estaciones La Playa, Cabrera, Ospina Pérez y Carmen de Apicalá.....	72
Tabla 33. Periodos de sequía por índice en estaciones El salero, Peñas Blancas (PM) y Hacienda La Granja,.....	73
Tabla 34. Periodos de sequía por índices en estación CO Pandi	73

Tabla 35. Periodos de sequía por índice en estaciones Base aérea Melgar y Peñas Blancas (CO)	74
Tabla 36. Periodos de sequía por índice en estaciones Pandi, Base aérea Melgar y Peñas Blancas (CO)	74
Tabla 37. Coeficientes de correlación y determinación lineales, estación CO Peñas Blancas	100
Tabla 38. Coeficientes de correlación y determinación lineales, estación CO Pandi	101
Tabla 39. Coeficientes de correlación y determinación lineales, estación CO Base aérea Melgar	103
Tabla 40. Coeficientes de correlación obtenidos entre series de SPI 3 y ONI con rezago y sin él, Cabrera	105
Tabla 41. Coeficientes de correlación obtenidos entre series de SPI 3 y ONI con rezago y sin él, Base aérea Melgar	105
Tabla 42. Coeficientes de correlación obtenidos entre series de SPI 3 y ONI con rezago y sin él, Carmen de Apicalá	106
Tabla 43. Coeficientes de correlación y determinación obtenidos para índices realizando promedio y sin realizarlo, estación Peñas Blancas	107
Tabla 44. Coeficientes de correlación y determinación obtenidos para índices realizando promedio y sin realizarlo, estación Pandi	108
Tabla 45. Coeficientes de correlación y determinación obtenidos para índices realizando promedio y sin realizarlo, estación Base aérea Melgar	109
Tabla 46. Resultados comparación series caudales y precipitación, estación Melgar	111
Tabla 47. Resultados comparación series caudales y precipitación, estación La Playa	112
Tabla 48. Resultados comparación series caudales y precipitación, estación El Limonar	112
Tabla 49. Resultados comparación series caudales y precipitación, estación El Profundo	112
Tabla 50. Resultados comparación series caudales y precipitación, estación Dos Mil	112
Tabla 51. Caudales mensuales promedio multianuales hallados	120
Tabla 52. Parámetros requeridos para cálculo de índices de sostenibilidad de la cuenca y Falkenmark	121
Tabla 53. Valor Índice Uso Agua para totalidad de cuenca y clasificación, condiciones actuales	121
Tabla 54. Valores Índice Uso Agua por municipio y clasificación, año medio, condiciones actuales	121
Tabla 55. Valores Índice Uso Agua por municipio y clasificación, año seco, condiciones actuales	121
Tabla 56. Valores índice Falkenmark por municipio y clasificación, año medio condiciones actuales	122
Tabla 57. Valores índice Falkenmark por municipio y clasificación, año seco condiciones actuales	122
Tabla 58. Valores asignados a parámetros de presión WSI	122
Tabla 59. Valores asignados a parámetros de estado WSI	123
Tabla 60. Valores asignados a parámetros de respuesta WSI	123
Tabla 61. Valores de indicadores e índice de sostenibilidad de la cuenca, condiciones actuales, año seco y medio	124
Tabla 62. Valor Índice Uso Agua para totalidad de cuenca y clasificación, escenario planteado	124
Tabla 63. Valores Índice Uso Agua por municipio y clasificación, año medio, escenario planteado	124

<i>Tabla 64. Valores Índice Uso Agua por municipio y clasificación, año seco, escenario planteado</i>	125
<i>Tabla 65. Valores índice Falkenmark por municipio y clasificación, año medio escenario planteado</i>	125
<i>Tabla 66. Valores índice Falkenmark por municipio y clasificación, año seco escenario planteado</i>	125
<i>Tabla 67. Valores asignados a parámetros de presión WSI escenario planteado</i>	125
<i>Tabla 68. Valores asignados a parámetros de estado WSI escenario planteado</i>	126
<i>Tabla 69. Valores asignados a parámetros de estado WSI escenario planteado</i>	126
<i>Tabla 70. Valores de indicadores e índice de sostenibilidad de la cuenca, escenario planteado, año seco y medio</i>	127

1. Alcance y justificación

La dificultad para reconocer el comienzo o final de una sequía radica en la falta de una definición unificada de la misma. Una sequía puede ser definida por cantidades de lluvia, condiciones de la vegetación, productividad agrícola, humedad del suelo, niveles en reservorios y caudales o impactos económicos. En términos generales, una sequía implica un déficit significativo en la disponibilidad de agua debido a lluvias por debajo de los patrones normales. Sin embargo, aún esta definición puede verse afectada cuando se intenta comparar sequías en diferentes regiones (Meulenert Peña, 2006). De acuerdo con lo anterior, el análisis de estos fenómenos resulta complicado por el gran número de factores que influyen en su origen y comportamiento.

En Colombia, en épocas de baja precipitación, se presentan reducciones significativas en la disponibilidad de agua superficial que el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales del país (IDEAM) ha identificado y cuantificado en gran parte del territorio nacional. Con base a esta información, desde 1998, se ha establecido un índice de escasez que en épocas recientes ha adquirido relevancia en la planificación municipal y regional. Sin embargo, a pesar de ser concebido como una herramienta útil en la planificación, el índice de escasez del IDEAM también se ha convertido en un elemento limitante en la misma.

En términos generales, el índice de escasez, definido por el IDEAM, considera la relación existente entre la demanda ejercida sobre las fuentes (superficiales y subterráneas) y la oferta hídrica de las mismas descontando los volúmenes requeridos para mantener condiciones adecuadas aguas abajo (caudal de estiaje con el 97.5% de probabilidad de excedencia) y considerando los efectos adversos que tiene en la oferta la variabilidad temporal (Costa, Domínguez, Rivera, & Vanegas, 2005). En casos en los que la demanda es un 20% mayor que la oferta neta, para una determinada región, se cuenta con sistemas de gestión de protección de la fuente, reducción de la demanda y, en último término, búsqueda de fuentes adicionales para reducir riesgos futuros de desabastecimiento (Costa, Domínguez, Rivera, & Vanegas, 2005).

2. Introducción

La sequía y la escasez de agua son dos conceptos relacionados pero diferentes. A pesar de que se reconoce que existen diferencias entre los dos, no ha sido posible establecer un consenso científico en las definiciones de los dos términos. Se tiene, además, que las definiciones que se han acuñado resultan demasiado largas, contienen contradicciones y superposiciones entre sí y no explican correctamente las relaciones entre los dos eventos. De acuerdo con lo anterior, y debido a los efectos similares de las dos situaciones, la política, el público y los medios tienden a emplear los términos de forma indistinta; así, se dificulta el planteamiento e implementación de políticas que traten, de forma adecuada, las causas y consecuencias de los dos fenómenos (Schmidt & Benítez-Sanz, 2013).

La Estrategia de Implementación Común (CIS, por sus siglas en inglés) para la Directiva del Marco del Agua (WFD) de la Unión Europea, ha desarrollado un conjunto de definiciones operativas de los términos, basándose en la revisión de definiciones y descripciones previas. De esta forma se tiene (Schmidt & Benítez-Sanz, 2013):

Sequía: Fenómeno natural. Es una desviación temporal, negativa y severa, a lo largo de un período de tiempo y sobre una región extensa, de los valores promedio de precipitación (déficit de lluvia). Este evento puede conducir a sequías meteorológicas, agrícolas, hidrológicas o socioeconómicas, dependiendo de su severidad y/o duración.

Escasez de agua: Fenómeno causado por el hombre. Se puede definir como un desequilibrio permanente que ocurre por el uso excesivo de los recursos hídricos. Lo anterior implica que el consumo de agua resulta siendo superior que la disponibilidad natural renovable. Este tipo de eventos pueden verse agravados por la contaminación hídrica y la ocurrencia de sequías.

A pesar de que los dos conceptos son diferentes, puede observarse que se encuentran estrechamente relacionados entre sí y que cuando, cualquiera de los dos, sobrepasa un umbral definido puede afectar significativamente el medio ambiente, la agricultura y la sociedad (Schmidt & Benítez-Sanz, 2013).

A continuación se presenta un cuadro, desarrollado por la WFD, en el cual se indican las diferencias, semejanzas y elementos clave para la definición y comparación de eventos de sequía y escasez de agua (Schmidt & Benítez-Sanz, 2013):

Tabla 1. Elementos clave para la definición de sequía y escasez de agua

Aspecto	Sequía	Escasez de agua
<i>Causas</i>	Natural, por reducción de precipitación durante cierto periodo de tiempo. Altas temperaturas, vientos fuertes, baja humedad relativa, duración y características de la lluvia pueden aumentar su severidad	Causada por el hombre. Sobre-explotación de los recursos hídricos. La demanda de agua pasa a ser superior que la disponibilidad natural renovable o la contaminación
<i>Ocurrencia</i>	Característica normal y recurrente de todos los climas. Su ocurrencia puede relacionarse, sin embargo, con cambios de gran escala en los patrones de circulación atmosférica.	Por el incremento en el consumo de agua a lo largo del tiempo, la escasez de agua ha aumentado su prevalencia en todo el mundo
<i>Duración</i>	Alta variabilidad en duración (de pocas semanas a varios años)	Degradación permanente y continua de ecosistemas acuáticos y reducción de disponibilidad hídrica para otras funciones (p.e. económicas)
<i>Impactos</i>	Los impactos de las dos son altamente variables dependiendo de su ocurrencia, severidad y duración, así como la sensibilidad del ecosistema, economía o sociedad afectada. Están también influenciadas por la humedad del suelo, la capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas y el caudal de las corrientes superficiales. Cuando una sequía ocurre en un área con escasez hídrica, tiene los efectos más graves.	
<i>Extensión espacial</i>	Tanto las sequías como la escasez pueden ocurrir localmente o cubrir cuencas enteras	
<i>Capacidad de predicción</i>	La predicción de sequías está basada, actualmente, en análisis estadísticos de series históricas de ocurrencias y predicciones numéricas del clima. La escala temporal puede variar de algunos días a varios meses (con aumentos en la incertidumbre).	Hay posibilidad de predicciones en el mediano y largo plazo. Lo anterior, se acuerdo a la disponibilidad de información por cuenca y tendencias de demanda. Se considera además la incertidumbre que puede presentarse (p.e. cambio climático)
<i>Interacción</i>	Cuando las sequías ocurren en áreas caracterizadas por escasez de agua, su impacto es más severo por la mayor vulnerabilidad. Las olas de calor pueden agravar situaciones de sequía y escasez de agua. Además, la escasez de agua puede ser un efecto de sobreexplotación por sequías concurrentes; pero esto no aplica en el sentido inverso (la sequía no es un efecto de la escasez de agua)	
<i>Costos</i>	En general se posee poca información sobre los costos precisos de eventos de escasez de agua o sequía (para sectores de mercado como agricultura y energía). Donde hay información disponible, se deben evaluar los efectos combinados de la sequía y un área, geográficamente superpuesta, donde se presenta escasez.	

En este documento, se pretende analizar más a fondo las diferencias entre los eventos de sequía y la escasez de agua, haciendo énfasis en las metodologías para la identificación de los mismos. Igualmente, se compararán diversos índices de sequía y escasez, empleados en el mundo, con los definidos por el IDEAM para Colombia. Además, se analizará la influencia que, en la planificación municipal, tiene el índice de escasez para, eventualmente proponer, aproximaciones que puedan resultar más apropiadas para el país.

3. Objetivos

3.1. General

- Analizar la conceptualización de sequías, las metodologías existentes a nivel mundial para definición de índices de sequía y escasez y el índice establecido por el IDEAM.

3.2. Específicos

- Establecer concepto de sequía y los índices utilizados para su definición.
- Realizar una comparación entre los índices de sequía basados en lluvia (Índice de deciles, índice estandarizado, etc.) y los basados en el concepto de balance hídrico en el suelo (índice de Palmer, índice de anomalía de humedad, índice de disponibilidad hídrica, etc.)
- Analizar el método que utiliza el IDEAM para la definición del índice de escasez en Colombia y establecer ventajas, deficiencias y desventajas del mismo.
- Comparar la metodología de cálculo de índice de escasez en Colombia con otras empleadas en el mundo.

4. Marco teórico

4.1. Sequía

Las sequías son fenómenos climáticos complejos que afectan, tanto a la sociedad, como al medio ambiente (Vicente-Serrano *et al.*, 2012); esta complejidad se debe, en gran medida, a la dificultad que se presenta para identificar el momento en el que inicia así como su duración y severidad. En términos generales, es posible identificar una sequía por sus efectos en diversos aspectos aunque no se ha identificado una variable física que permita determinar efectivamente la severidad de la misma (Vicente-Serrano *et al.*, 2012). Generalmente, una sequía implica un déficit significativo en la disponibilidad de agua debido a lluvias por debajo de los patrones normales; sin embargo, aún esta definición puede verse afectada cuando se intenta comparar sequías en diferentes regiones (Meulenert, 2006). A continuación, se presentan algunas de las principales definiciones que se han acuñado para el término “sequía”, así como clasificaciones que se han propuesto para la misma y los índices que se han empleado para determinar grados de severidad.

4.1.1. Definiciones

La dificultad que se presenta a la hora de definir de forma precisa una sequía, se relaciona con las diferencias espaciales que se presentan en las variables hidrometeorológicas y los factores socioeconómicos, además de la naturaleza estocástica de la demanda de agua (Mishra & Singh, 2010). Cuando se está definiendo una sequía, resulta importante realizar la distinción entre definiciones operacionales y conceptuales (Mishra & Singh, 2010). De acuerdo con el Centro Nacional de Mitigación de la Sequía, de la Universidad de Nebraska Lincoln (s.f.), las definiciones conceptuales se formulan en términos generales y sus principales propósitos son dar a entender el término y servir para la determinación de políticas (definición jurídica en la reglamentación respectiva de cada país). Por otro lado, las definiciones operativas buscan determinar el inicio, severidad y final de periodos de sequía y en general, se emplean para analizar la frecuencia, severidad y duración, para un determinado periodo de retorno, de los eventos (Mishra & Singh, 2010).

Algunas de las definiciones comúnmente empleadas para explicar este concepto se presentan a continuación (Mishra & Singh, 2010):

1. La Organización Meteorológica Mundial (1986) define sequía como una deficiencia sostenida y extendida de precipitación.
2. La Convención de la Naciones Unidas para el Combate de la Sequía y la Desertificación (1994), define sequía como un fenómeno natural que ocurre cuando la precipitación ha estado por debajo de los niveles normalmente registrados,

causando serios desbalances hidrológicos que afectan negativamente los sistemas de producción de recursos.

3. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (UN Food and Agriculture Organization, 1983), propone que el peligro de sequía es el porcentaje de años en el cual los cultivos fallan por falta de humedad.
4. La Enciclopedia de clima y tiempo (Schneider, 1996), define una sequía como un período extendido de tiempo (temporada, año o varios años) de precipitación relativa deficiente respecto a la media estadística multianual para la región.
5. Gumbel (1963) propuso que una sequía era el mínimo valor anual de caudal diario para una determinada corriente. (Gumbel, 1963).
6. Palmer (1965), explica sequía como una desviación significativa de las condiciones hidrológicas normales en un área determinada.
7. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), en el *Atlas Climatológico de Colombia* (IDEAM, 2005), define sequía como la ausencia de abastecimiento hídrico en una región durante un periodo prolongado de tiempo.

A pesar de lo anterior, la definición de sequía debe ser adoptada de acuerdo al tipo de sequía que se esté estudiando; es decir, a partir de la variable, climatológica o temporal, que se empleó para describirla.

4.1.2. Clasificación

En este caso, se presenta la clasificación usual para sequías (Mishra & Singh, 2010). Así, en general se tienen cuatro categorías de sequía que incluyen:

1. *Sequía meteorológica*: Se define como la falta de precipitación sobre una región determinada en un período de tiempo dado. En general, la precipitación ha sido empleada en análisis meteorológicos de sequías incluyendo análisis de déficits de precipitación respecto a valores medios y estudios de duración e intensidad relacionados con escasez acumulada de precipitación (Mishra & Singh, 2010).
2. *Sequía hidrológica*: Está relacionada con periodos con recurso hídrico, superficial y sub superficial, insuficiente para usos determinados en un sistema específico. En general, para su análisis se utilizan series históricas de caudales. A partir de regresiones, que relacionaban sequías en las corrientes con propiedades de las cuencas, se ha encontrado que la geología es uno de los principales factores que influyen en las sequías hidrológicas (Mishra & Singh, 2010).
3. *Sequía agrícola*: En general, se refiere a un periodo con bajas en la humedad del suelo y la subsecuente falla de cultivos sin ninguna relación con los recursos hídricos superficiales. La disminución en la humedad del suelo puede depender de varios factores, que también pueden influir en las sequías meteorológicas e

hidrológicas, junto con diferencias entre la evapotranspiración real y potencial. Así mismo, la demanda de agua de las plantas depende de sus características biológicas y etapa dentro de su crecimiento, de las condiciones prevalecientes del clima y de las propiedades físicas y biológicas del suelo. Para el estudio de las sequías agrícolas, se han desarrollado varios índices basados en combinaciones de parámetros como precipitación, temperatura y humedad del suelo (Mishra & Singh, 2010).

4. *Sequía socioeconómica*: En general, se asocia con la incapacidad de los sistemas de suministro de agua para cumplir con las demandas que se presentan. En este caso, se considera que el agua es un bien económico y que la sequía se presenta cuando la demanda del mismo excede al suministro. Lo anterior, ocurre como consecuencia de déficits del recurso causados por condiciones climáticas (Mishra & Singh, 2010).

En general, en Colombia, el IDEAM considera las sequías de tipo meteorológico (falta de abastecimiento de lluvia en una región durante un periodo de tiempo dado) y agrícola (relacionadas con insuficiencia de abastecimiento hídrico para cultivos). Así, se tiene que pueden presentarse cuatro tipos de sequías, de acuerdo con el *Estudio Nacional del Agua 2010* (IDEAM, 2010) que son:

- *Sequía permanente*: Se presenta en zonas áridas donde no existe una época de lluvias bien definida en la cual se satisfagan las necesidades de agua de ciertos cultivos. En las zonas donde se presenta, se puede llevar a cabo el cultivo con ayuda de riego (IDEAM, 2010).
- *Sequía estacional*: En general, se presenta en regiones tropicales. Consiste en la ocurrencia de temporadas secas bien definidas que siguen a periodos de lluvias. Puede decirse que, son sequías esperables dado que se presentan todos los años por los patrones de circulación atmosférica. La agricultura puede desarrollarse en la época de lluvia (IDEAM, 2010).
- *Sequía contingente*: Es la ausencia de abastecimiento hídrico en una época en la que, normalmente, este es abundante siendo la más seria de todos los tipos de sequía. Es causada por la variabilidad en el comportamiento climático de las lluvias en una región y puede ocurrir durante periodos prolongados durante los cuales se considera que la lluvia es menor a lo normal (IDEAM, 2010).
- *Sequía invisible*: Se presenta cada vez que el abastecimiento diario por parte del suelo o lluvia es menor al requerimiento hídrico de un determinado cultivo; por lo anterior, es la más difícil de prever. En general, causa resecaamiento del suelo y disminución en ritmo de crecimiento de las plantas llevando, en último término, a bajas en los rendimientos del cultivo en cuestión (IDEAM, 2010).

A partir de lo explicado anteriormente, es posible decir que una sequía corresponde a una deficiencia de precipitación por un periodo prolongado de tiempo. Esta escasez en el abastecimiento, genera déficits hidrológicos en ciertas zonas que, en último término, llevan a alteraciones en el normal desarrollo de actividades humanas; así, se puede considerar que la sequía es un fenómeno natural potencialmente peligroso. Respecto al punto de vista climático, las sequías pueden considerarse como periodos anormalmente secos y prolongados respecto al ciclo natural (diferente a la aridez que es restrictiva a regiones con, naturalmente, baja pluviosidad) (Hurtado Moreno & Cadena, 2002).

4.1.3. Índices empleados en definición

4.1.3.1. Escala temporal de índices empleados

En general, es posible decir que los índices de sequía se calculan para evaluar el efecto de una sequía y determinar sus parámetros, como intensidad, duración, severidad, extensión espacial y periodo de retorno, entre otros (IDEAM, 2005). Es necesario mencionar, el hecho de que las variables deben ser capaces de cuantificar las sequías para diferentes escalas temporales; así, series de registros históricos largas son requeridas (Mishra & Singh, 2010).

Es común emplear una escala temporal de años o meses para análisis de sequías. A pesar de que se puede considerar que la escala anual es larga, puede ser empleada para estudiar el comportamiento regional de las sequías (Mishra & Singh, 2010). Respecto a la escala mensual, por otro lado, resulta más apropiada para monitoreo de los efectos de las sequías en aspectos relacionados con la agricultura, suministro de agua y evaluación de aguas subterráneas (Panu & Sharma, 2002). Puede decirse que una serie de registros históricos de índices de sequía provee una buena base para la evaluación de los parámetros de interés en estudios más complejos (Mishra & Singh, 2010).

4.1.3.2. Índices existentes

En general, todos los índices de sequía planteados emplean la precipitación, de forma independiente o combinada con otros parámetros meteorológicos, para su cálculo. Así, índices como el de Palmer (1965), Marcovitch (1930) o índice de humedad del cultivo (Crop moisture index, en inglés) (1968) utilizan una combinación entre precipitación y temperatura. Otros índices (Keetch-Bryam, 1968 y Moisture adequacy index, 1957), emplean una combinación entre precipitación y humedad del suelo; mientras que otros, como el índice estandarizado de precipitación (SPI, 1993), sólo tienen en cuenta la precipitación (Mishra & Singh, 2010). A continuación se presentan los índices más comúnmente empleados junto con su utilidad y limitaciones.

Índice de porcentaje de normalidad (Percent of Normal)

Es una de las medidas más simples de precipitación para un sitio determinado. Este tipo de análisis resulta eficaz cuando se emplea en una única región o temporada. Su cálculo se realiza dividiendo la precipitación real, en un determinado periodo de tiempo, por la precipitación normal (que en general se entiende como la media de un registro de 30 años) y multiplicando por 100. Este índice puede hallarse para una gran variedad de escalas de tiempo que, por lo general, se encuentran en un rango de uno a varios meses que representan una determinada temporada. Se considera que la precipitación normal para una ubicación específica es el 100% (National Drought Mitigation Center, s.f.).

La principal ventaja que presenta este método de cálculo es el hecho de que es bastante efectiva para comparar valores para una sola región o temporada. Por otro lado, una de las principales desventajas, es el hecho de que la media, o promedio, de la precipitación, en general no coincide con la mediana de la misma (que es el valor correspondiente a la precipitación que es excedida por el 50% de las ocurrencias en un registro climático largo). Lo anterior, se debe a que la precipitación, en escalas mensuales o estacionales, no presenta una distribución normal (en la cual la mediana y la media coinciden) cuando, el uso del porcentaje de normalidad considera esta condición (National Drought Mitigation Center, s.f.).

Otra de las desventajas que presenta la aplicación de este método es que, debido a la variedad, en el tiempo y espacio, de los registros de precipitación no hay forma de determinar la frecuencia de variaciones del valor normal o comparar diferentes lugares. Lo anterior, hace difícil asociar un valor de partida con un impacto específico que puede llegar a producir. Este hecho, dificulta intentos de mitigación de riesgos de sequía, basados en desviaciones de los valores normales, y la formación de planes de respuesta a los mismos (National Drought Mitigation Center, s.f.).

Índice estandarizado de precipitación (SPI)

Este índice es empleado para monitorear la sequía por el Centro de Mitigación de la Sequía de los Estados Unidos (National Drought Mitigation Center) y por el Centro Climático de Colorado. Puede ser calculado para diversas escalas temporales y espaciales empleando, únicamente, series históricas de precipitación. La forma de cálculo de este índice se basa en el análisis a series de precipitación en tiempos relativamente largos. Estas series se ajustan a una distribución de probabilidad que, posteriormente, se transforma en una distribución normal (con valor medio para el periodo de cero). Así, valores positivos indican lluvias mayores a la mediana y valores negativos lluvias menores a la misma (Hurtado Moreno & Cadena, 2002).

El SPI tiene la ventaja de que puede ser calculado para cualquier período de tiempo, por ejemplo 1, 3, 6, 12 ó 72 meses. De esta forma, el déficit acumulado de precipitación puede ser examinado sobre cualquier escala temporal; esto permite un mejor seguimiento de la influencia de los volúmenes de precipitación en la fisiología y crecimiento de las plantas o del peligro potencial de incendios forestales, por ejemplo. Además, el cálculo del índice, también permite la identificación y cuantificación de periodos húmedos (IDEAM, 2005). A continuación se presenta la clasificación que da el índice a diferentes intensidades de eventos en cualquier escala temporal (IDEAM, 2005). Por definición, los eventos de sequía se presentan cuando el índice toma un valor negativo y finalizan cuando pasa a ser positivo (Hurtado Moreno & Cadena, 2002):

Tabla 2. *Clasificación del índice SPI según lo define el IDEAM*

Valor	Clasificación
<-2.0	Extremadamente seco
-1.5 a -1.99	Muy seco
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal
1 a 1.49	Moderadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
>2.0	Extremadamente húmedo

Las principales limitaciones que pueden ser identificadas para este índice se relacionan con la longitud de los registros de precipitación empleados y la naturaleza de la distribución de probabilidad a la cual se ajusten (Mishra & Singh, 2010). Respecto al primer punto, se ha encontrado que resultados similares y consistentes se obtienen cuando los valores del índice, calculados a partir de diferentes longitudes de registros, presentan distribuciones gamma similares durante diferentes periodos de tiempo; sin embargo, los valores del SPI son significativamente discrepantes cuando las distribuciones son diferentes. Así, resulta importante que se esté consciente de las diferencias numéricas en los valores del índice si se emplean varias longitudes de registros en la interpretación y toma de decisiones (Mishra & Singh, 2010).

En cuanto a la naturaleza de las distribuciones de probabilidad, es posible identificar dos problemas principales. El primero, tiene que ver con el sesgo en el ajuste de la distribución elegida por limitaciones en la longitud de las series empleadas, cuando se calcula el SPI para escalas de tiempo largas (mayores a 24 meses). A este respecto, puede afirmarse que cuando se requieren resoluciones espaciales finas para análisis, en general, no se tienen disponibles series históricas largas en la mayor parte de las cuencas del mundo (Mishra & Singh, 2010). El segundo problema se presenta en el cálculo del SPI para climas secos, donde las precipitaciones son estacionales y se presentan ceros en los valores de precipitación en forma habitual y por periodos prolongados. En general, para estas zonas,

los valores del SPI calculados, para escalas temporales cortas, pueden no distribuirse normalmente. Lo anterior, debido, principalmente, a la desigualdad en las distribuciones de precipitación y a las limitaciones propias de la distribución gamma ajustada (Mishra & Singh, 2010).

Índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI)

Este índice se basa en un estudio original para las regiones de Iowa y Kansas en Estados Unidos (Palmer, 1965), está fundamentado en un balance hídrico seriado y se desarrolló como una medida del suministro de humedad que ofrece el suelo. En general, el balance se encuentra calibrado para regiones con suelos relativamente homogéneos por lo que puede no ser el más adecuado para áreas montañosas, microclimas o climas extremos (Hurtado Moreno & Cadena, 2002).

El modelo de balance hídrico, que se empleó para el desarrollo del índice, considera dos capas de suelo. La capa más superficial, o zona radicular (Ss), es la que recibe los aportes de precipitación y desde la cual ocurre el proceso de evaporación. Así, para el cálculo de humedad, se asume que la evapotranspiración tiene lugar a una tasa potencial (Ls) hasta que toda el agua es removida de la capa superficial; posteriormente, puede empezar a removerse agua de la segunda capa o capa sub superficial (Su). La capa Ss contiene una pulgada de agua útil a capacidad de campo, en función de la profundidad considerada y las características del suelo, que está disponible para las plantas. Se asume que no hay recarga de la zona inferior de la zona radicular hasta que la capa Ss sea llenada a capacidad de campo. La demás agua del perfil es almacenada por la capa Su y la pérdida de humedad en la misma está definida por el contenido de humedad inicial, la evapotranspiración potencial (PE) y la capacidad disponible del sistema de suelo (AWC) (Hurtado Moreno & Cadena, 2002).

El cálculo del índice, se lleva a cabo a partir de una expresión empírica derivada por Palmer. Es posible llegar al valor después de pasar por varios pasos intermedios. En términos generales, se clasifica la intensidad de una sequía de acuerdo con los siguientes valores del índice obtenidos:

Tabla 3. Clasificación a partir del índice de severidad de sequía de Palmer

Valor	Clasificación
> 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
-0.49 a -0.9	Sequía incipiente

Valor	Clasificación
-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

Además de las ya mencionadas, las limitaciones que presenta el índice de Palmer han sido estudiadas por varios autores incluyendo a Alley (1984), Karl & Knight (1985) y Guttman (1997). Dentro de las principales desventajas que se han encontrado a este índice se tienen (Mishra & Singh, 2010):

- Escala de tiempo definida por el índice, lo que lo hace adecuado para cuantificación de impactos en agricultura pero dificulta su utilización en sequías hidrológicas (comportamiento de las corrientes, niveles de reservorios y otros impactos hidrológicos a largo plazo).
- Se asume que únicamente se presenta escorrentía cuando las dos capas de suelo, empeladas en el balance, se saturan; así, se estaría subestimando este valor.
- El índice puede ser lento (presentar rezagos) en evidenciar el desarrollo y remisión de las sequías.
- Su cálculo resulta más complejo que el del índice estandarizado de precipitación, dificultando su uso en aplicaciones operativas.

Respecto a las ventajas del índice se tiene (Mishra & Singh, 2010):

- Ha sido empleado durante un largo tiempo por lo que ha sido utilizado y comprobado en gran cantidad de casos específicos.
- Depende de las características de temperatura y suelo de un sitio determinado, que han sido estandarizadas; así, es posible comparar diferentes zonas climáticas.

Índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI)

Desarrollado a partir del índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) con el fin de cuantificar los impactos, a largo plazo, de las sequías hidrológicas (Indiana State Department of Agriculture, s.f.). De acuerdo con lo anterior, este índice es otro tipo de índice de sequía a largo plazo que tiene en cuenta los impactos hidrológicos (por ejemplo niveles de embalses o niveles de aguas subterráneas) dado que estos tardan mayor cantidad de tiempo en desarrollarse, así como en el proceso de recuperación subsecuente. El PHDI responde más lentamente que el PDSI a condiciones cambiantes y, al igual que este último, no tiene en cuenta en su cálculo, cambios realizados por el hombre como aumentos de irrigación, nuevos embalses o incrementos en uso del agua por actividades industriales (North Carolina State University, s.f.). La escala para la clasificación de este índice es igual a presentada para el índice de severidad de sequía de Palmer:

Tabla 4. Clasificación a partir del índice de sequía hidrológica de Palmer

Valor	Clasificación
> 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
-0.49 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

La principal ventaja de este índice es el hecho de que ha sido ampliamente empleado en casos particulares durante un periodo prolongado de tiempo. Por otro lado, la principal desventaja del mismo es la respuesta lenta que presenta a eventos de sequía lo que lo hace su interpretación más compleja que la del PDSI (Indiana State Department of Agriculture, s.f.).

Índice de anomalía de humedad de Palmer (Z)

Representa la anomalía de humedad en un determinado mes. Es posible utilizar este índice para identificar sequías agrícolas dado que responde rápidamente a valores en humedad del suelo (Iglesias, Cancelliere, Cubillo, & Wilhite, 2009). Este índice muestra cómo las condiciones de humedad se desvían del valor normal y puede llegar a indicar condiciones de precipitación superiores a lo normal, incluso durante periodos de sequía. Los valores de este índice suelen variar entre -2.75 y 3.5 donde los valores negativos indican sequía y los positivos periodos húmedos (North Carolina State University, s.f.). El Índice de anomalía de humedad, Z es un producto intermedio en el cálculo del Índice de Palmer definitivo. Aunque su comportamiento es más o menos paralelo al del índice de Palmer, su reacción a los cambios de tiempo es casi inmediato y por tanto presenta oscilaciones bruscas en su comportamiento (Hurtado Moreno & Cadena, 2002).

Índice de humedad del cultivo

El índice de humedad del cultivo (CMI) utiliza un enfoque meteorológico para evaluar las condiciones de los cultivos semanalmente. Fue desarrollado por Palmer (1968) a partir de los procedimientos de cálculo del Índice de severidad de sequía. El CMI fue desarrollado para evaluar las condiciones de humedad del suelo a corto plazo en las principales regiones cultivadas de Estados Unidos (a diferencia del índice de severidad de sequía que analiza periodos húmedos y secos en escalas temporales amplias). El cálculo del

índice se basa en la temperatura media y precipitación total semanales además del valor del CMI de la semana anterior a la analizada (National Drought Mitigation Center, s.f.).

Dado que se desarrolló para el monitoreo de condiciones de humedad que afectan cultivos en desarrollo, el CMI no es una herramienta de análisis adecuada para sequías en el largo plazo (National Drought Mitigation Center, s.f.). La rápida respuesta del CMI a las cambiantes condiciones de corto plazo puede proporcionar información engañosa sobre las condiciones a largo plazo. Igualmente, se ha encontrado que aumentos en la evapotranspiración potencial pueden derivar en aumentos del CMI; este hecho, carece de sentido dado que aumentos en los valores del CMI indican condiciones de humedad más pronunciadas y esto no se corresponde con aumentos en la evapotranspiración. Sin embargo, el CMI es eficaz para la medición de las sequías agrícolas durante las estaciones cálidas (temporada de crecimiento) (Mishra & Singh, 2010).

Índice de suministro de agua superficial (SWSI)

Desarrollado por Shafer & Dezman (1982), como un índice para cuantificación de sequías hidrológicas, se calcula con base a la probabilidad mensual de no excedencia de acuerdo a series históricas de registros de almacenamiento en reservorios, caudales en corrientes, capas de nieve y precipitación. El principal propósito del índice es monitorear anomalías en fuentes abastecedoras de aguas superficiales; además, es una buena medida para cuantificar el impacto de las sequías hidrológicas en el abastecimiento de agua urbana e industrial y para el riego y generación hidroeléctrica. Para el cálculo del índice son requeridos cuatro parámetros principales: almacenamiento en reservorios, caudales en corrientes, capas de nieve y precipitación. Igualmente, el SWSI es dependiente de la estación por lo cual, su cálculo se lleva a cabo con precipitación, nivel en reservorios y capa de nieve para épocas de invierno y con precipitación, caudales y nivel de reservorios para verano (Mishra & Singh, 2010).

El procedimiento para determinar la SWSI para una cuenca en particular se presenta a continuación: los datos mensuales se recogen y se suman para todas las estaciones de precipitación, niveles y capas de nieve (o caudales, dependiendo de la temporada considerada). Cada componente sumada se normaliza mediante un análisis de frecuencia obtenido mediante registros históricos largos. La probabilidad de no excedencia se determina para cada componente basándose en el análisis de frecuencia, permitiendo la comparación de las probabilidades entre los componentes. A cada componente se le asigna un peso en función de su contribución típica a la oferta superficial de agua dentro de la cuenca. Finalmente, estos componentes ponderados se suman para determinar un valor de SWSI que representa toda la cuenca. Al igual que el Índice de Palmer, el SWSI está centrado en cero y tiene un rango entre -4.2 y 4.2 (National Drought Mitigation Center, s.f.).

La principal ventaja que presenta este índice es el hecho de que representa las condiciones de suministro de agua superficial únicas para cada cuenca. En cuanto a las limitaciones que presenta se tienen (National Drought Mitigation Center, s.f.):

- Dado que el cálculo del índice es único para cada cuenca o región, resulta difícil comparar los valores obtenidos.
- En caso de que se cualquiera de las estaciones de medición establecidas, en una cuenca o región, deje de funcionar se deben agregar nuevas y modificar las distribuciones de frecuencia del respectivo componente.
- Cambios en la gestión del agua superficial en una cuenca o región (como desvíos de flujo o construcción de nuevos embalses) implica la necesidad de reconstruir el algoritmo para el cálculo del índice para incluir los cambios en los pesos de los componentes.
- Eventos extremos pueden ser problemáticos si se encuentran por fuera de los registrados en la serie histórica; así, el índice requeriría ser reevaluado para incluir esos eventos en el análisis de frecuencia del respectivo componente.

Índice de deciles de precipitación

Otra metodología de monitoreo de eventos de sequía consiste en la organización de datos de precipitación mensual en deciles; este método fue desarrollado por Gibbs & Maher en 1967. Esta técnica divide la distribución de ocurrencia de eventos, extraída de registros de precipitación largos, en diez categorías llamadas deciles. El primer decil corresponde a la profundidad de precipitación que no se excede por el 10% de los eventos de precipitación más bajos. El segundo decil es la profundidad de precipitación que no se excede por el 20% de los eventos de precipitación más bajos. Por definición, el quinto decil corresponde a la mediana de la distribución que corresponde a la precipitación que no es excedida por el 50% de los eventos durante el periodo de registro (National Drought Mitigation Center, s.f.). Para la clasificación de la sequía, estos deciles se agrupan en cinco categorías:

Tabla 5. Clasificación de Índice de deciles de precipitación

Deciles	Clasificación
Deciles 1 y 2: 20% más bajo	Muy por debajo de lo normal
Deciles 3 y 4	Bajo lo normal
Deciles 5 y 6	Cerca de lo normal
Deciles 7 y 8	Sobre lo normal
Deciles 9 y 10: 20% más alto	Muy por encima de lo normal

En general, las ventajas de este método son (National Drought Mitigation Center, s.f.):

- Relativamente fácil de calcular, útil en aplicaciones operativas.

- Requiere registro de menos datos que índice de severidad de sequía de Palmer.
- No se hacen un número importante de suposiciones al contrario del índice de severidad de sequía de Palmer.
- Puede ser aplicado a registros de precipitación que no necesariamente se distribuyan normalmente (Hurtado Moreno & Cadena, 2002).

Respecto a sus limitaciones, puede identificarse una principalmente: se requiere un registro climatológico largo para el establecimiento de deciles precisos. Por ejemplo, en Australia, los agricultores y ganaderos sólo pueden solicitar ayuda gubernamental si se demuestra que la sequía que se está presentando es un evento que ocurre sólo una vez en 20 a 25 años (deciles 1 y 2 en un registro de 100 años) y ha durado más de doce meses (National Drought Mitigation Center, s.f.).

4.1.4. Comportamiento de la sequía en Colombia

El índice estandarizado de precipitación ha sido comúnmente empleado por el IDEAM para la definición de periodos de sequía en el país. Según se registra en el *Atlas Climatológico de Colombia* (2005) las principales sequias registradas en Colombia, discriminadas por regiones geográficas, han sido:

Región Andina: Los períodos con sequías más extendidas se han registrado en los años 1964-1965, 1972-1973, 1976-1977 y 1991-1992. En los anteriores periodos las sequías tuvieron duraciones de más de un semestre. Por otro lado, eventos importantes, que se presentaron en semestres aislados y afectaron más del 50% de la región, fueron: 1967 (segundo semestre), 1983 (segundo semestre), 1985 (primer semestre), 1987 (primer semestre) y 1997 (segundo semestre).

Región Caribe: De acuerdo con la serie de datos analizada, se puede concluir que esta región ha sido más afectada por sequías que la región Andina. Lo anterior, dado que en cerca de 28 casos se presentaron semestres secos en más del 30% del territorio. Se destacan los siguientes eventos: 1965, 1972-1973, 1976, 1982-1983, 1986, 1991 y 1997.

Región Pacífica: La sequía ha afectado menos a esta región que a la región Caribe, aunque su comportamiento sí ha sido similar al de la región Andina. Entre los años de mayor dominio de la sequía figuran 1965-1966, 1968, 1969, 1972-1973, así como varios años de la década de los 80, como 1982-1983, 1985-1986, además de 1991-1992 y 1997-1998, en la década de los 90. Vale la pena aclarar que estos eventos, especialmente en la parte correspondiente al Chocó, no corresponden a sequías agrícolas sino atmosféricas, dado que los almacenamientos de agua en el

suelo permanecen adecuados para los cultivos aun con la mitad de la precipitación normal.

Región Orinoquia-Amazonia: Podría considerarse que esta es la región que ha sido menos afectada por la sequía. De acuerdo con los series históricas analizadas, la década del 1960 fue la más seca, destacándose sequías recurrentes durante los años 1963, 1964 y 1966, 1967 y 1969; posteriormente, se detectaron períodos secos de distinta intensidad y duración en los períodos 1974-1975, 1985-1986, 1991-1992 y 1997-1998.

4.2. Escasez

La escasez de agua puede definirse, de forma general, como la falta de acceso a cantidades adecuadas de agua en usos humanos y ambientales (White, 2012). En los últimos años, varios países han reconocido la escasez como una preocupación seria y creciente; este hecho, ha llevado a que el término “Escasez de agua” sea regularmente empleado por los medios, el gobierno, las Organizaciones no Gubernamentales (ONG) y la academia para resaltar áreas en las cuales el recurso hídrico se encuentra bajo presión (White, 2012).

A pesar del uso generalizado que se ha dado al término, no ha sido posible establecer un consenso, tanto científica como legislativamente, de la manera en la que se debe definir o medir una situación de escasez (White, 2012). De acuerdo con lo anterior, en los últimos 20 años, se han desarrollado un número importante de índices que buscan evaluar cuantitativamente la vulnerabilidad (como escasez o tensión sobre el recurso hídrico) de los recursos hídricos en una región determinada. La principal dificultad que se presenta al caracterizar el estrés hídrico es el gran número de aspectos, igualmente importantes, relacionados con uso, suministro y escasez del agua; de esta forma, seleccionar el criterio de evaluación puede ser tanto una decisión política como científica (Brown & Matlock, 2011).

En términos generales, la clasificación de la escasez, puede realizarse de acuerdo con aspecto que considera. De esta forma, los índices empleados en la cuantificación pueden enfocarse en (Brown & Matlock, 2011):

- Requerimientos de agua de seres humanos.
- Vulnerabilidad de recursos hídricos.
- Requerimientos ambientales de agua.

A continuación, se presentan los principales índices que han sido planteados para cada uno de los aspectos mencionados. Igualmente, se presenta la metodología de cálculo del índice de escasez para Colombia, según ha sido definido por el IDEAM.

4.2.1. Requerimientos humanos de agua

En los índices que se presentaran a continuación, la escasez de agua, en general, se describe como una función de los recursos hídricos disponibles y la población humana. Los valores que se obtienen son, comúnmente, expresados en términos de agua al año per cápita y son hallados para escalas espaciales nacionales (Brown & Matlock, 2011).

Índice de Falkenmark

El índice de Falkenmark es, quizás, el más empleado en la medición de la tensión sobre el recurso hídrico en escalas nacionales. Puede ser definido como la fracción del recurso hídrico renovable disponible para uso humano y, en general, se expresa en unidades de metro cúbico per cápita. Basado en ese valor, es posible categorizar un área determinada como no estresada, estresada, con escasez y con escasez absoluta (Brown & Matlock, 2011). Los límites establecidos por el método se presentan a continuación:

Tabla 6. Clasificación de escasez Índice de Falkenmark

Valor (m ³ per cápita)	Categoría
>1700	No estresada
1000-1700	Estresada
500-1000	Con escasez
<500	Con escasez absoluta

Respecto a esta metodología, pueden identificarse tres ventajas principales: La información que se requiere para su cálculo está, generalmente disponible, sus unidades hacen que sea un valor fácil de entender e interpretar (Rijsberman, 2004) y brinda distinción entre la escasez generada por el clima y la causada por el hombre (Vorosmarty, Douglas, Green, & Revenga, 2005). Sin embargo, el método también presenta deficiencias que se indican a continuación:

- Dado que, en general, es calculado en escalas nacionales, tiende a ocultar información importante en escalas más pequeñas (Brown & Matlock, 2011).
- Los límites establecidos para la categorización pueden omitir las variaciones en la demanda que se presentan entre países por aspectos culturales, de estilo de vida, clima, entre otros (Rijsberman, 2004).

- No se considera la relación, específica para cada caso, que puede existir entre el tamaño de la población y la demanda de agua de la misma (Brown & Matlock, 2011).
- No se tiene en cuenta la existencia de infraestructura que modifica la disponibilidad de agua para una determinada población (embalses, procesos de desalinización, etc.) (Rijsberman, 2004).
- No considera la calidad del recurso hídrico, ni las limitaciones al uso que se relacionan con esta (Assimacopoulos, 2004).
- Sólo considera recursos hídricos superficiales y subterráneos renovables (Assimacopoulos, 2004).
- Dado que la demanda per cápita se estima como un promedio nacional, no se tienen en cuenta las variaciones que pueden existir tanto espacial como temporalmente por lo que se dejan de lado variaciones en el consumo por regiones o cambios en el clima (Assimacopoulos, 2004).

Requerimientos humanos básicos de agua

Desarrollado por Gleik, en 1996, este índice busca medir la cantidad de agua demandada por los seres humanos para satisfacer sus necesidades básicas. Estas necesidades incluyen consumo para supervivencia, higiene básica, servicios sanitarios y agua requerida para preparación de alimentos (Brown & Matlock, 2011). Así, para cada una de estas necesidades, se determinó una cantidad que se presenta a continuación:

- Requerimiento mínimo de agua para bebida: Se empleó información del Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos para estimar este valor bajo condiciones climáticas de temperaturas medias y niveles normales de actividad. Se estimó un valor de *5 litros por persona al día*.
- Requerimientos básicos para saneamiento: Se tuvieron en cuenta varias tecnologías para saneamiento a nivel mundial y, en general, se encontró que la eliminación eficaz de residuos humanos puede llevarse a cabo con pocas cantidades de agua. Sin embargo, para dar cuenta de los máximos beneficios de la eliminación de los residuos y la higiene relacionada, así como de las diferencias culturales y sociales se recomendó un mínimo de *20 litros por persona al día*.
- Requerimientos básicos para baño: De acuerdo con estudios de Kalbermatten (1982) y Gleick (1993), se estimó que la mínima necesidad para baño puede aproximarse a *15 litros por persona al día*.
- Requerimientos básicos para preparación de comida: De acuerdo a las características de países desarrollados y subdesarrollados, el uso de agua para preparación de comida se estimó como *10 litros por persona al día*.

De acuerdo con lo anterior, la demanda total de agua para suplir las necesidades básicas antes mencionadas es de *50 litros por persona al día*. Igualmente, se estimó un volumen mínimo de 1000m^3 per cápita anual como un estándar que ha sido adoptado por el Banco Mundial.

4.2.2. Vulnerabilidad de recursos hídricos

Hasta ahora, los índices que se han presentado han medido los recursos hídricos basados en los requerimientos humanos de agua y la disponibilidad de agua, en general, para escalas nacionales. Sin embargo, ninguno de los índices ha incorporado el suministro de agua renovable y la demanda anual nacional de la misma (Rijsberman, 2004). Los índices que se presentan a continuación tienen en cuenta la demanda de agua nacional y el recurso disponible (Brown & Matlock, 2011):

Índice relativo local de uso y re-uso de agua

La relación WTA fue utilizada en la evaluación de la disponibilidad hídrica que incorporó herramientas geo espaciales junto con entradas climáticas (Vorosmarty, Douglas, Green, & Revenga, 2005). Un área definida se dividió en celdas de 8 kilómetros (n celdas para la notación que se presenta más adelante) y, para cada una de ellas, se calculó un índice de uso relativo de agua así como uno de re-uso. El uso de agua se estimó con base al consumo doméstico (D), industrial (I) y agrícola (A). La descarga generada se calculó como el producto entre la esorrentía generada localmente y el área de la celda. De esta forma, el caudal que corre por el río resulta siendo la suma de todas las descargas locales (Qc). Para el cálculo del índice relativo del uso del agua, el uso del agua en la celda se dividió en el caudal transportado por el río:

$$\text{Índice de Uso}_n = \frac{DIA_n}{Q_{cn}}$$

El índice de re-uso se estimó como el uso total de agua de todas las celdas en el caudal transportado por el río:

$$\text{Índice de reuso} = \frac{\sum DIA_n}{Q_{cn}}$$

Cuando se tienen índices de uso, para celdas dadas, mayores que 40% se considera que se tiene un alto grado de estrés hídrico.

Índice de sostenibilidad de la cuenca

En 2007, Chaves & Alipaz propusieron este índice (WSI) que incorpora aspectos hidrológicos, ambientales, de vida y políticos. Cada uno de los anteriores, involucra parámetros de presión, estado y repuesta. El índice es específico para cada cuenca y está

diseñado para áreas máximas de 2500km²; áreas más grandes deben ser divididas en secciones más pequeñas (Brown & Matlock, 2011).

El rango de valores del WSI está entre 0 y 1 y se halla como el promedio de cuatro indicadores: El indicador hidrológico (H), el indicador ambiental (E), el indicador de vida o humano (H) y el indicador político (P). A cada uno de los parámetros se le da un puntaje de 0, 0.25, 0.5, 0.75 o 1.0. Todos los indicadores son iguales en peso a pesar de que los parámetros pueden variar entre cuencas y deben ser elegidos por consenso entre los encargados del manejo. Los parámetros de presión del índice así como los de estado, niveles y puntajes están claramente definidos y tabulados permitiendo, a quien realice el cálculo, elegir el mejor posible puntaje para cada parámetro. Las siguientes tablas presentan los indicadores y parámetros del índice, así como los niveles y valores de los mismos. Finalmente, se presenta la ecuación para el cálculo del índice:

Tabla 7. Indicadores y parámetros del WSI

Indicadores	Presión	Estado	Respuesta
	Parámetros		
H	- Variación en la disponibilidad de agua per cápita de la cuenca en los últimos 5 años. - Variación en DBO5 de la cuenca en los últimos 5 años	- Disponibilidad per cápita de agua de la cuenca. - DBO5 de la cuenca (promedio anual)	- Mejora en la eficiencia del uso del agua (últimos 5 años). - Mejora en tratamiento de alcantarillado/ disposición (últimos 5 años)
E	Índice de presión ambiental (EPI) de la cuenca	Porcentaje del área de la cuenca con vegetación natural	Evolución en conservación de la cuenca (áreas protegidas)
L	Variación en PIB per cápita de la cuenca en los últimos 5 años	Índice de desarrollo humano (HDI) para la cuenca (dando peso de acuerdo a la población del país)	Evolución del HDI de la cuenca e los últimos 5 años
P	Variación en el HDI relacionado con educación en los últimos 5 años	Capacidad institucional de la cuenca en manejo de recursos hídricos (WRM)	Evolución de los gastos en WRM de la cuenca en los últimos 5 años

Tabla 8. Descripción de los parámetros de presión del WSI sus niveles y valores

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor
Hidrología	$\Delta 1$ = Variación en la disponibilidad per cápita de la cuenca en los últimos 5 años (m3/persona/año)	$\Delta 1 < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta 1 < 0\%$	0,5
		$0\% < \Delta 1 < 10\%$	0,75
		$10\% < \Delta 1$	1
	$\Delta 2$ = Variación en la DBO5 de la cuenca en los últimos 5 años	$\Delta 2 > 10\%$	0,25
		$0 < \Delta 2 < 10\%$	0,5
		$-10\% < \Delta 2 < 0\%$	0,75
		$\Delta 2 < -10\%$	1
Ambiental	EPI de la cuenca (Rural y urbana)	$EPI > 10\%$	0,25
		$10\% < EPI < 5\%$	0,5
		$5\% < EPI < 0\%$	0,75
		$EPI < 0\%$	1
Vida/Humano	Variación en el HDI en los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75
		$10\% < \Delta$	1
Política	Variación en el HDI en educación en los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75
		$10\% < \Delta$	1

Tabla 9. Descripción de los parámetros de estado del WSI sus niveles y valores

Indicador	Parámetros de estado	Nivel	Valor
Hidrología	Disponibilidad per cápita (WA) de la cuenca (m3/persona/año)	$WA < 1700$	0,25
		$1700 < WA < 3400$	0,5
		$3400 < WA < 5100$	0,75
		$5100 < WA$	1
	DBO5 promedio de la cuenca (mg/L)	$DBO5 > 10$	0,25
		$10 < DBO5 < 5$	0,5
		$5 < DBO5 < 3$	0,75
		$DBO5 < 3$	1
Ambiental	% del área de la cuenca con vegetación natural (AV)	$0 < AV < 10$	0,25
		$10 < AV < 25$	0,5
		$25 < AV < 40$	0,75
		$40 < AV$	1
Vida/Humano	HDI para la cuenca (dando peso de acuerdo a la población del país)	$HDI < 0.6$	0,25
		$0.6 < HDI < 0.75$	0,5
		$0.75 < HDI < 0.9$	0,75
		$0.9 < HDI$	1
Política	Capacidad institucional de la cuenca en manejo de recursos hídricos (WRM)	Pobre	0,25
		Media	0,5
		Buena	0,75
		Excelente	1

Tabla 10. Descripción de los parámetros de respuesta del WSI sus niveles y valores

Indicador	Parámetros de respuesta	Nivel	Valor
Hidrología	Mejora en la eficiencia del uso del agua (últimos 5 años)	Pobre	0,25
		Media	0,5
		Buena	0,75
		Excelente	1
	Mejora en tratamiento de alcantarillado/disposición (últimos 5 años)	Pobre	0,25
		Media	0,5
		Buena	0,75
		Excelente	1
Ambiental	Evolución en conservación de la cuenca (áreas protegidas) en últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75
		$10\% < \Delta$	1
Vida/Humano	Evolución del HDI de la cuenca e los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75
		$10\% < \Delta$	1
Política	Evolución de los gastos en WRM de la cuenca en los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75
		$10\% < \Delta$	1

Finalmente, la forma de estimar el índice es:

$$WSI = \frac{H + E + L + P}{4}$$

Donde cada una de las letras del lado derecho de la ecuación corresponden a cada uno de los indicadores antes definidos de acuerdo con los valores asignados.

Índice de disponibilidad de agua

Meigh et al (1999) definieron este índice teniendo en cuenta la variabilidad temporal de la disponibilidad del recurso hídrico. Este índice incluye aguas superficiales así como aguas subterráneas y las compara con las demandas ejercidas por todos los sectores (doméstico, industrial y agricultura). El mes con el máximo déficit o el mínimo exceso es decisivo en el cálculo del índice. El valor que se obtiene para la relación, se normalizada para que se encuentre entre -1 y 1. En caso de obtenerse un índice de cero, la disponibilidad y la demanda pueden considerarse iguales (Assimacopoulos, 2004). El cálculo del índice se lleva a cabo de la siguiente forma:

$$WAI = \frac{R + G - D}{R + G + D}$$

Donde R representa la escorrentía superficial, G la oferta subterránea y D la suma de las demandas de todos los sectores. La disponibilidad superficial se estima como el 90% de la escorrentía segura y la disponibilidad de agua subterránea puede estimarse bien como

un potencial de recarga calculado por un balance mensual de agua superficial o como el rendimiento potencial del acuífero (Assimacopoulos, 2004).

Índice de escasez de agua

Se define como un indicador que combina información sobre las extracciones de agua y la disponibilidad de recurso en una determinada zona. Heap et al (1998) añadieron la variable de recursos hídricos obtenidos a partir de desalinización a este indicador. A pesar de que el porcentaje de uso de agua desalinizada es mínimo a nivel mundial, es parte importante en algunas regiones, en especial, en Medio Oriente (en Emiratos Árabes Unidos el porcentaje de agua desalinizada que se extrae anualmente es el 18% de la oferta hídrica total) (Assimacopoulos, 2004). El cálculo de este índice se lleva a cabo de la siguiente manera:

$$IEA = \frac{W - S}{Q}$$

Donde W son las extracciones anuales de agua, S son las aguas desalinizadas y Q es el agua disponible anualmente que se estima como:

$$Q = R + \alpha \Sigma D_{up}$$

Donde R son los recursos anuales internos, D_{up} es la cantidad de agua externa y α es el porcentaje de agua externa que puede ser utilizada. Este último factor está influenciado por la calidad del agua transvasada, el consumo real de los recursos hídricos en la región aguas arriba y la accesibilidad del agua.

De acuerdo con lo anterior, la severidad de la tensión sobre el agua puede clasificarse como:

Tabla 11. Clasificación de estrés hídrico de acuerdo al índice de escasez de agua

Rango	Clasificación
$IEA < 0.1$	Sin estrés hídrico
$0.1 < IEA < 0.2$	Bajo estrés hídrico
$0.2 < IEA < 0.4$	Estrés hídrico moderado
$0.4 < IEA$	Alto estrés hídrico

Al igual que la mayoría de los índices, anteriormente presentados, este ignora las variaciones espaciales en la oferta así como la información sobre la calidad del agua en la fuente (Assimacopoulos, 2004).

4.2.3. Requerimientos ambientales de agua

La conferencia de Dublín, sobre el agua y el desarrollo sostenible, en 1992 concluyó: “dado que el agua sostiene la vida, un manejo efectivo de los recursos hídricos requiere una aproximación holística que conecte el desarrollo social y económico con la protección a los ecosistemas naturales (World Meteorological Organization, 1992). Los siguientes índices consideran entonces los componentes ambientales como formas de determinar eventos de escasez hídrica.

Índice de sostenibilidad ambiental (ESI)

Desarrollado por el Centro de Política y Ley Ambiental de la Universidad de Yale en conjunto con la Red de Información del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Columbia entre 1999 y 2005, el objeto del índice es evaluar la sostenibilidad relativa entre países. Los aspectos que se consideran dentro del cálculo del índice son (Assimacopoulos, 2004):

Tabla 12. Indicadores considerados dentro del cálculo del ESI

Categoría	Indicador
Agotamiento de recursos	Consumo de agua
	Entradas de fosfato a la tierra agrícola
Dispersión de sustancias tóxicas	Índice de emisión e metales pesados al agua
	Emisión de contaminantes orgánicos persistentes (COP)
	Consumo de químicos tóxicos
Contaminación del agua	Emisión de nutrientes por hogares
	Emisión de nutrientes por la industria
	Pesticidas empleados por hectárea utilizada en agricultura
	Emisión de materia orgánica por hogares
	Emisión de materia orgánica por la industria
	Agua residual urbana no tratada
Problemas ambientales urbanos	Agua residual urbana no tratada
Ambiente marino y Zonas costeras	Intensidad del turismo

Índice de pobreza de agua

Este índice, desarrollado por el Centro de Ecología e Hidrología (CEH) en Wallingford en 2002, trata de mostrar la conexión entre los aspectos relacionados con la escasez de agua y aspectos socioeconómicos. Este índice clasifica a las regiones de acuerdo con la provisión de agua combinando cinco componentes que son:

1. Recursos
2. Acceso
3. Uso
4. Capacidad
5. Ambiente

Cada uno de estos componentes se deriva de dos a cinco indicadores que están normalizados en una escala de 0 a 1. En el caso de pesos iguales los subíndices y valores de los componentes son calculados como un promedio simple de todos los indicadores y el

valor obtenido es multiplicado por 20. El índice total se genera a partir de la suma de todos los valores de los componentes; de esta forma, el valor del índice se encuentra entre 0 y 100. Vale la pena mencionar que un valor de 100 sólo puede ser obtenido si la región obtuvo el máximo puntaje para los cinco componentes. Estos componentes se presentan a continuación:

Tabla 13. Indicadores empleados en cálculo del índice de pobreza de agua

Componente	Subíndice	Indicador
Recursos		Recursos hídricos internos
		Recursos hídricos externos
Acceso		Acceso a agua segura
		Acceso a saneamiento
		Acceso a irrigación
Capacidad		PIB per cápita
		Tasa de mortalidad de menores de 5 años
		Índice de educación UNDP
		Índice de Gini
Uso		Uso doméstico de agua
		Uso industrial del agua (como proporción de PIB derivado de la industria/proporción del agua empleada por industria)
		Uso agrícola del agua (definido de igual forma que industrial)
Ambiente	Calidad del agua	Concentración de oxígeno disuelto
		Concentración de fósforo
		Sólidos suspendidos
		Conductividad
	Estrés hídrico	Consumo de fertilizantes
		Uso de pesticidas
		Contaminantes orgánicos industriales
		% región bajo estrés hídrico severo
	Regulación y capacidad de manejo	Severidad de regulaciones ambientales
		Innovación en regulación ambiental
		Territorio bajo estado protegido
		Número de guías ambientales sectoriales
	Capacidad informativa	Disponibilidad de información de desarrollo sostenible a nivel nacional, estrategias ambientales y planes de acción
		% de variables del ESI no incluidas en bases de datos globales
	Biodiversidad	% de mamíferos amenazados
		% de aves amenazadas

Indicador de Estrés Hídrico (WSI)

Desarrollado por Smakhtin et al en 2005, reconoce la importancia de requerimientos ambientales de agua como parámetros importantes en la determinación del agua disponible total de una región. La esorrentía media promedio (MAR) es utilizada como una aproximación de la disponibilidad total de agua y los requerimientos ambientales de agua (EWR), son expresados como un porcentaje de la esorrentía anual promedio, a largo plazo, del río que debe ser reservada con propósitos ecológicos (Brown & Matlock, 2011). La

forma de cálculo del índice se presenta a continuación así como la clasificación establecida por Smakhtin para el mismo:

$$WSI = \frac{Extracciones}{MAR - EWR}$$

Tabla 14. Clasificación de cuencas de acuerdo con WSI

WSI (proporción)	Grado de escasez de agua de cuenca
WSI >1	Sobreexplotación- Cuencas ambientalmente escasas
0.6 < WSI < 1	Altamente explotado - Cuencas ambientalmente estresadas
0.3 < WSI < 0.6	Moderadamente explotado
WSI < 0.3	Ligeramente explotado

4.2.4. Índice para Colombia: IDEAM

Los principales índices que se calculan para las cuencas del país, de acuerdo con el *Estudio Nacional de Agua 2010* (IDEAM, 2010) son:

Índice de retención y regulación hídrica

Mide capacidad de retención de humedad de las cuencas con base en la distribución de series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1 y los valores más bajos se interpretan como menor regulación.

Con este índice se generan iso-líneas cuya densidad depende de densidad de estaciones hidrológicas de referencia. Para su estimación, se requiere de información de caudales medios diarios de series históricas mayores a 15 años.

El índice se obtiene a partir de las curvas de duración de caudales medios diarios para las estaciones seleccionadas. Su estimación resulta de la relación entre el volumen (área bajo la curva de caudal medio) y la correspondiente área total bajo la curva de duración de caudales diarios. Respecto a la expresión matemática empleada para su cálculo se tiene:

$$IRH = \frac{VP}{V_t}$$

Donde IRH es el índice de regulación y retención hídrica, VP el volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio y Vt el volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios.

Los valores obtenidos con la estimación del IRH se agrupan en rangos para facilitar las comparaciones entre áreas y sub zonas hidrográficas. A cada rango se le asigna una clasificación cualitativa que se presenta a continuación:

Tabla 15. Clasificación de IRH y descripción de categorías

Rango	Clasificación	Descripción
IRH >0.85	Muy alta	Muy alta retención y regulación de humedad
0.75-0.85	Alta	Alta retención y regulación de humedad
0.65-0.75	Moderada	Media retención y regulación de humedad
0.5-0.65	Baja	Muy baja retención y regulación de humedad
IRH < 0.5	Muy alta	Baja retención y regulación de humedad

Índice del uso del agua (IUA)

Cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un periodo determinado y unidad espacial de análisis en relación con la oferta hídrica disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales. Actualmente, sólo se considera la oferta superficial.

Se calcula para condiciones medias y secas a partir de las series históricas de caudales. El año seco se construye a partir de los valores mínimos. El indicador se actualiza cada 4 años y la clasificación que se estableció para el mismo se basa en el concepto de las Naciones Unidas en el que si la demanda sobre la oferta, en condiciones hidrológicas de año medio, sobrepasa el 20%, deben iniciarse programas de ordenamiento y conservación de cuencas. Los rangos y categorías empleados por el IDEAM en el ENA 2010 se presentan a continuación:

Tabla 16. Rangos y categorías del índice de uso de agua (IUA)

Rango	Clasificación	Descripción
IUA >0.5	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
0.2001-0.5	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
0.1001-0.2	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
0.01-0.1	Bajo	La presión de la demanda es baja respecto a la oferta disponible
IUA < 0.01	Muy bajo	La presión de la demanda es muy baja respecto a la oferta disponible

Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento

Grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua, que ante amenazas podría generar riesgos de desabastecimiento. Se actualiza cada 4 años. Se determina a través de una matriz de relación de rangos del índice de regulación hídrica y el índice de uso del agua que se presenta a continuación:

Tabla 17. Categorías para índice de vulnerabilidad del desabastecimiento (IVH)

IUA	IRH	Categoría de vulnerabilidad
Muy bajo	Alto	Muy bajo
Muy bajo	Moderado	Bajo
Muy bajo	Bajo	Medio
Muy bajo	Muy bajo	Medio
Bajo	Alto	Bajo
Bajo	Moderado	Bajo
Bajo	Bajo	Medio
Bajo	Muy bajo	Medio

IUA	IRH	Categoría de vulnerabilidad
Medio	Alto	Medio
Medio	Moderado	Medio
Medio	Bajo	Alto
Medio	Muy bajo	Alto
Alto	Alto	Medio
Alto	Moderado	Alto
Alto	Bajo	Alto
Alto	Muy bajo	Muy alto
Muy alto	Alto	Medio
Muy alto	Moderado	Alto
Muy alto	Bajo	Alto
Muy alto	Muy bajo	Muy alto

Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL)

Este indicador tiene como propósito determinar las amenazas potenciales por alteración de la calidad en las unidades de análisis. Es aplicado en escala municipal en centros urbanos y agregación para las 309 sub zonas hidrográficas del país.

Para su cálculo, se requiere información de cargas estimadas a partir de factores de vertimiento de la Organización Mundial de la Salud (1993), es decir:

- Población en cabeceras municipales
- Cuarenta actividades industriales incluido el sacrificio de ganado (bovino y porcino).

Las variables empleadas para su cálculo son:

- Materia orgánica: DBO, DQO
- Sólidos en suspensión: SST
- Nutrientes: N total y P total
- Oferta hídrica

Excluye parámetros como: patógenos, plaguicidas, micro contaminantes tóxicos o persistentes, cancerígenos o disruptores del sistema endocrino y metales pesados.

Finalmente, puede decirse que los inventarios de contaminantes pueden ser actualizados de forma anual pero la oferta hídrica sólo se actualiza cada cuatro años. La metodología de cálculo y su clasificación se presentan a continuación:

$$IACAL = \frac{NT + PT + SST + DBO + (DQO - DBO)}{5}$$

Tabla 18. *Categorías de clasificación ICAL*

Categoría	Valor
Baja	1
Moderada	2
Media Alta	3
Alta	4
Muy Alta	5

5. Caso de estudio: Cuenca Río Sumpaz

El Río Sumapaz es un afluente del Río Magdalena que nace en la cuchilla de Los Charcos, en el departamento de Cundinamarca, dentro de la jurisdicción del Parque Natural Nacional Sumapaz a una altitud de 4,050 msnm. La desembocadura del mismo, se da en el municipio de Suárez, Tolima; específicamente, en la vereda Cañaverales a una altitud de 200 msnm (Corporación Autónoma Regional del Tolima , 2010)

Respecto a la cuenca del río, se tiene que esta se encuentra compartida entre los departamentos de Cundinamarca y Tolima (el cauce del río sirve como frontera natural entre los dos departamentos en la parte suroccidental del departamento de Cundinamarca). El área total de la cuenca es de 308,466.52 hectáreas de las cuales 55,316.52Ha corresponden al departamento del Tolima y las restantes 253,150Ha a Cundinamarca. Los municipios que se encuentran dentro de los límites de la cuenca son (Corporación Autónoma Regional del Tolima , 2010) (Puerto Rodríguez & Pimentel Suárez, 2006):

- Departamento del Tolima: Icononzo, Melgar, Carmen de Apicalá y Suárez
- Departamento de Cundinamarca: Fusagasugá, Pasca, Silvania, Granada, Tibacuy, Arbeláez, San Bernardo, Pandi, Venecia, Cabrera, Nilo, Ricaurte y Bogotá.

A continuación se presenta un mapa, de elaboración propia, en el cual puede observarse la delimitación de la cuenca, los drenajes que esta incluye y los municipios que comprende:

Cuenca Río Sumapaz

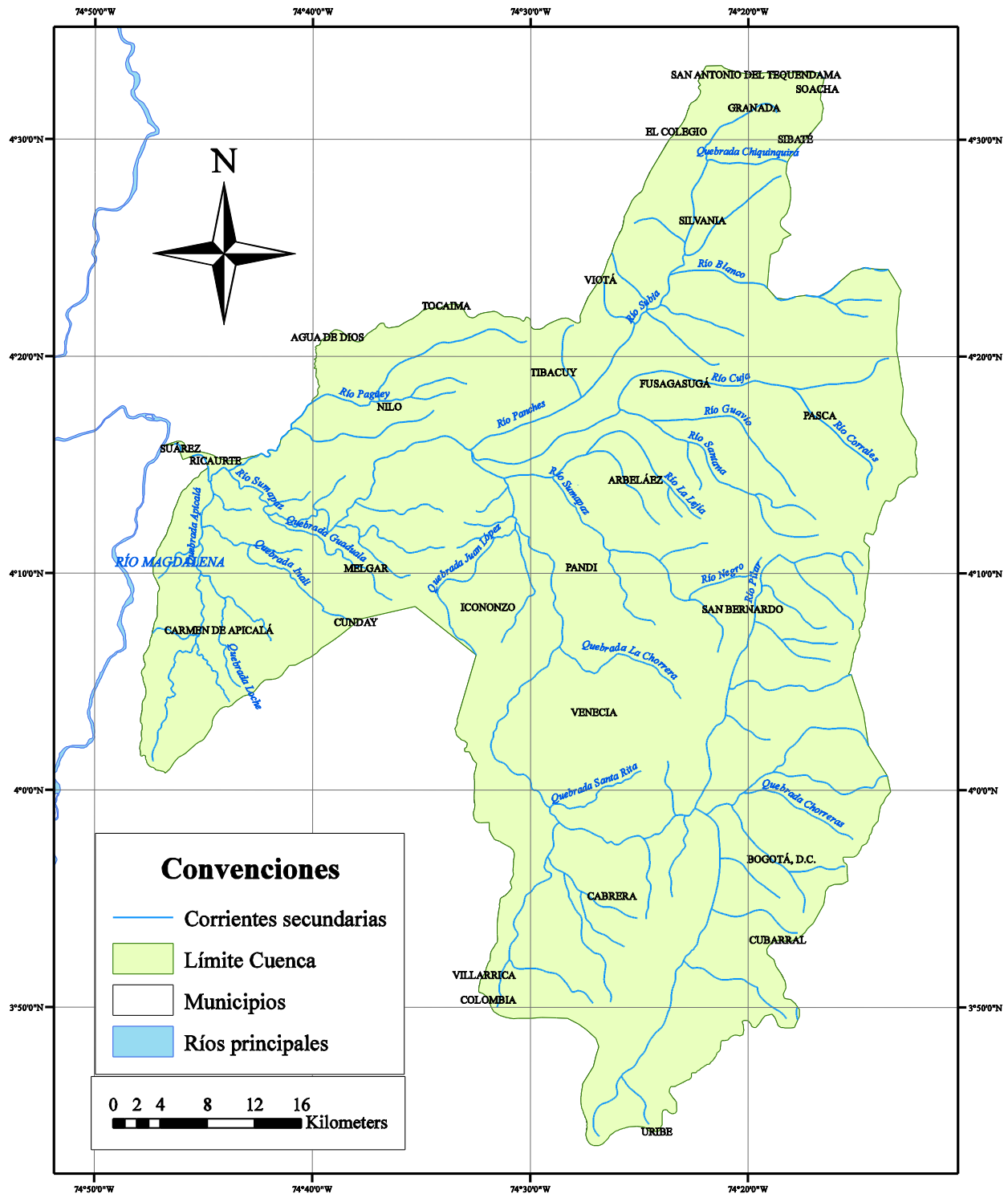


Ilustración 1. Mapa con delimitación de cuenca del Río Sumapaz

La cuenca del Sumapaz se encuentra dentro de la zona hidrológica del Alto Magdalena que está conformada por 19 sub zonas hidrológicas y contiene 17 corrientes principales (IDEAM, 2010). Junto con la cuenca del Río Bogotá, la cuenca del Sumapaz contiene el 42% de las cabeceras municipales de la zona hidrológica, haciéndola una de las más vulnerables a afectaciones en la calidad del agua (IDEAM, 2010).

Respecto a las características físicas de la cuenca, se cuenta con información del área correspondiente al departamento de Cundinamarca, específicamente, del Área de Desarrollo Rural (ADR) del Sumapaz (Romero Carrascal & Uribe Calad, 2012). Esta área, además de incluir la parte de la cuenca que se encuentra dentro del departamento de Cundinamarca, incluye, en su totalidad, la localidad de Sumapaz de la ciudad de Bogotá. Así, respecto al tipo de relieve que puede encontrarse en la zona se tiene:

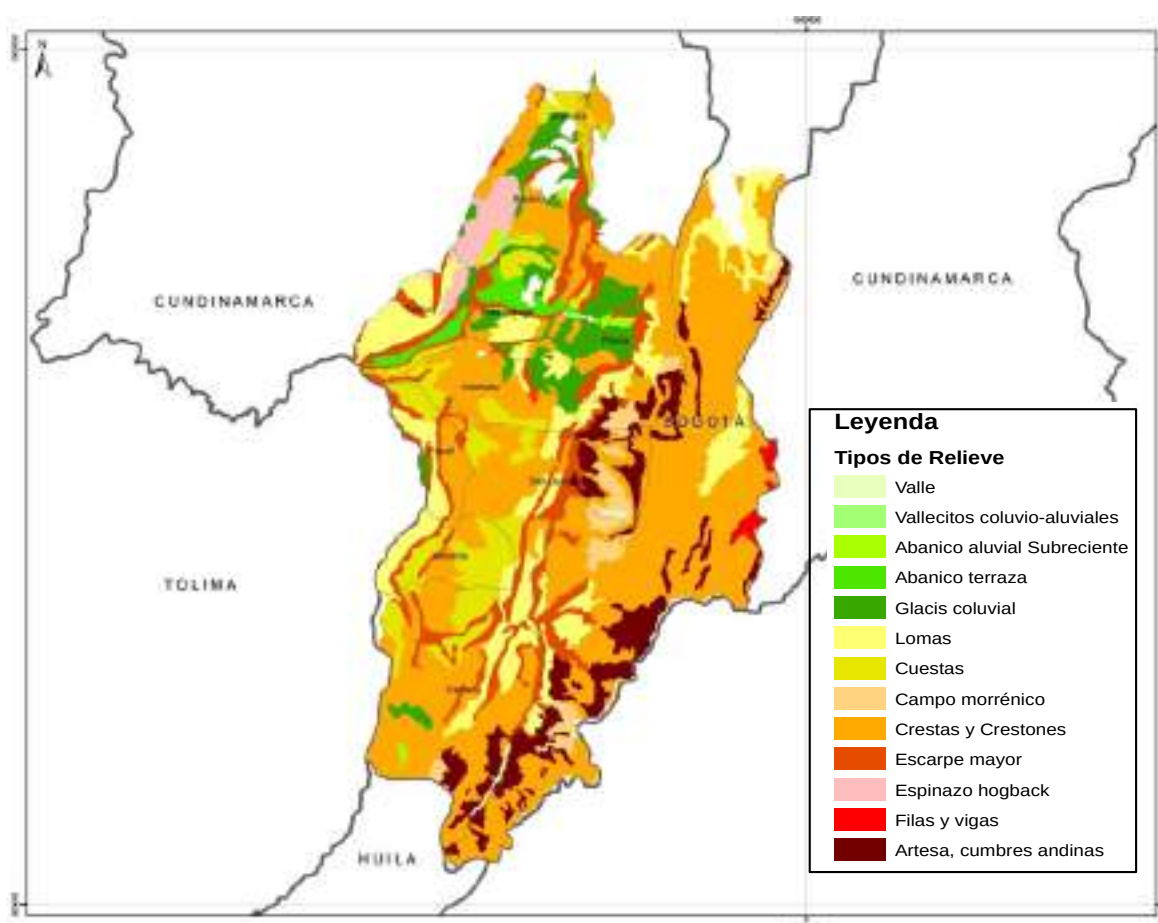


Ilustración 2. Fisiografía del Área de Desarrollo Rural (ADR) del Sumapaz (Romero Carrascal & Uribe Calad, 2012)

En la anterior imagen es posible observar la presencia predominante de crestas y crestones en el área. Igualmente, son importantes los relieves de loma y escarpes mayores.

En relación a los pisos altimétricos de la región, se tiene que estos son muy diversos variando desde cálido (Tibacuy, Fusagasugá, Arbeláez y Pandi) hasta muy frío (Cabrera, San Bernardo, Arbeláez, Pasca y Bogotá). De esta forma se tiene:

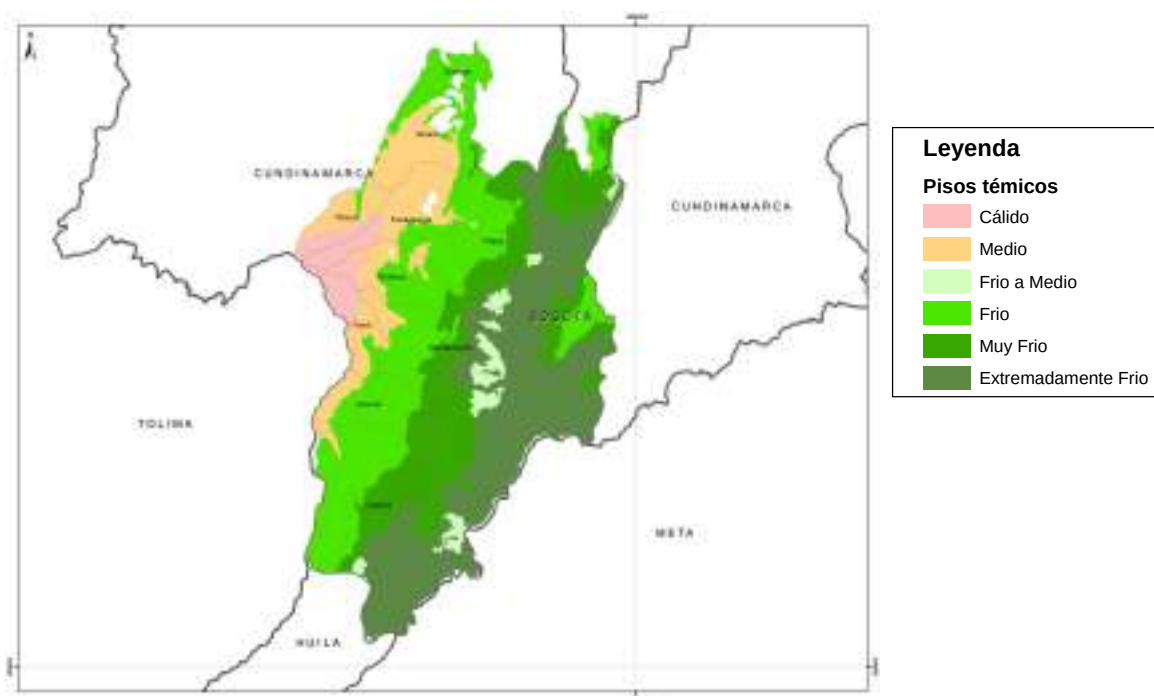


Ilustración 3. Pisos altimétricos del ADR del Sumapaz (Romero Carrascal & Uribe Calad, 2012)

De igual forma, se cuenta con información de las provincias de humedad del área de estudio. La provincia de humedad es una característica climática que relaciona la precipitación y la evapotranspiración; de esta forma, las provincias muy húmedas y pluviales presentan excesos de humedad y, por el contrario, las provincias secas presentan un déficit de humedad en ciertas épocas del año, haciendo necesaria la aplicación de riego suplementario (Romero Carrascal & Uribe Calad, 2012). De acuerdo con lo anterior, para el ADR Sumapaz se tiene:

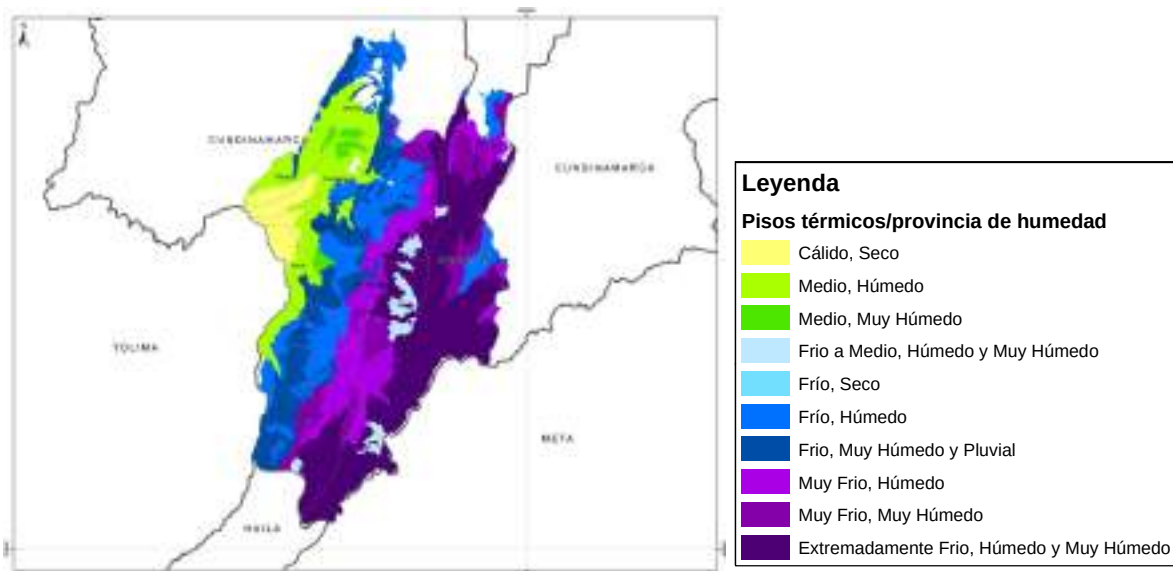


Ilustración 4. Pisos térmicos y provincias de humedad ADR Sumapaz
(Romero Carrascal & Uribe Calad, 2012)

En cuanto a las características de pendiente del ADR, puede notarse que, en general, se cuenta con terrenos escarpados con pendientes superiores al 25% (Romero Carrascal & Uribe Calad, 2012). Así:

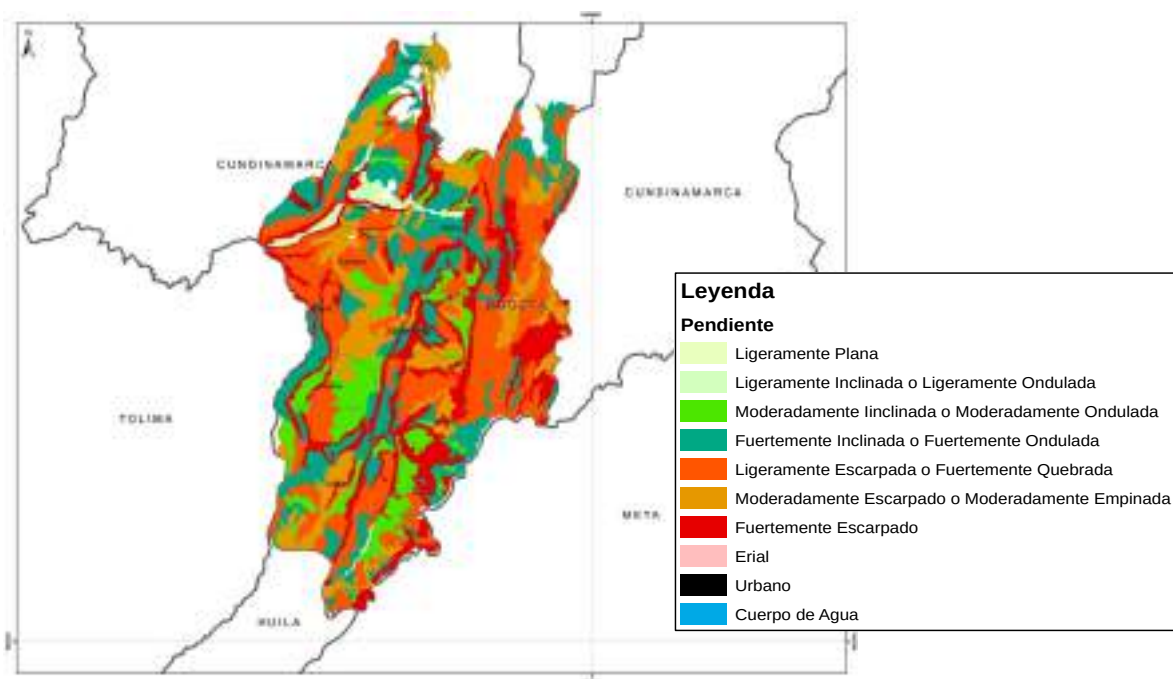


Ilustración 5. Rangos de pendiente del ADR del Sumapaz
(Romero Carrascal & Uribe Calad, 2012)

Finalmente, respecto a la profundidad radicular (profundidad hasta la cual las raíces de las plantas penetran libremente sin ningún tipo de limitación que les impida tomar agua y nutrientes del suelo) puede decirse que esta es, en general, profunda para la región de

estudio. Igualmente, es posible notar que en las zonas con relieve escarpado se tiende a tener con profundidades radicales más bajas; por ejemplo, la zona del páramo de Sumapaz ubicada en la parte oriental del área (Romero Carrascal & Uribe Calad, 2012). La distribución de profundidades radicales dentro del ADR se presenta a continuación:

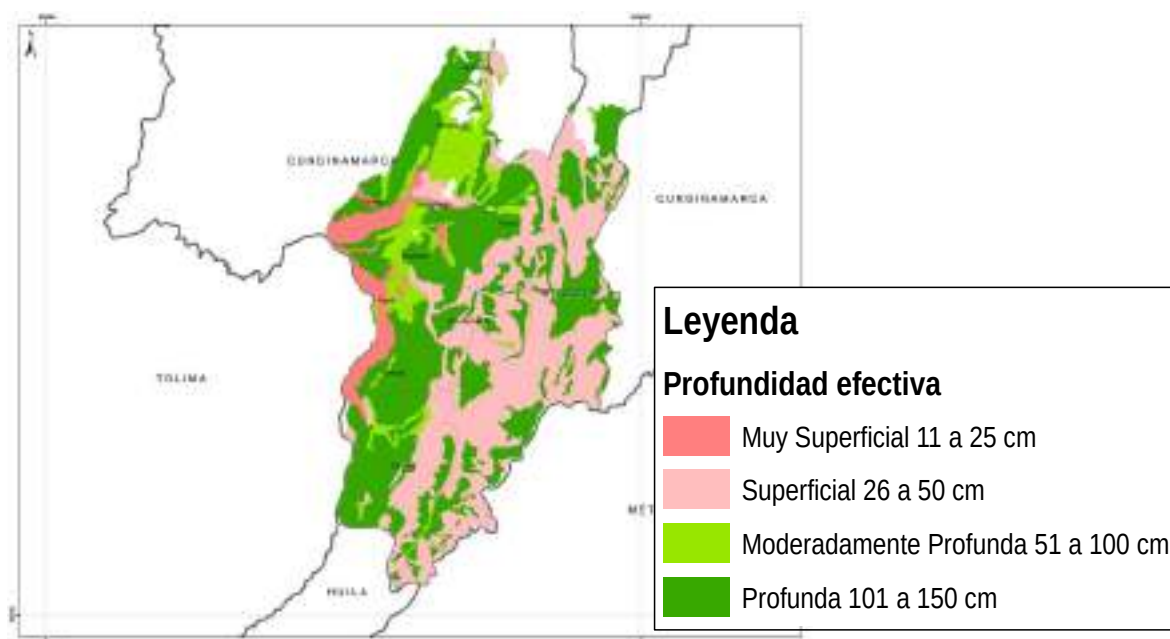


Ilustración 6. Mapa de Profundidad radicular en el ADR del Sumapaz (Romero Carrascal & Uribe Calad, 2012)

6. Metodología

La metodología empleada en el desarrollo del presente proyecto puede ser dividida en seis partes principales:

1. Recolección de información hidro-meteorológica para cuenca de estudio.
2. Estimación de valores faltantes en series.
3. Selección y cálculo de índices de sequía.
4. Comparación de índices de sequía calculados por medio de cuatro métodos: respecto a variaciones en longitud de series consideradas, entre metodologías de estimación de índices, frente a índices de eventos macro-climáticos (Niño y Niña) y respecto a valores de índices hallados para series de caudales.
5. Recolección de información de oferta y demanda en la cuenca de estudio.
6. Evaluación de índices de escasez bajo escenario actual.
7. Evaluación de índices de escasez bajo escenarios de crecimiento poblacional y variabilidad climática.

A continuación se explica, de forma detallada, cada una de las fases enumeradas anteriormente.

6.1. Recolección de información hidro-meteorológica

Esta parte se llevó a cabo identificando, en primer lugar, las estaciones hidro-meteorológicas con las que se contaba en el área de estudio (cuenca del Sumapaz). De esta forma, de acuerdo con información del IDEAM, pudo establecerse la presencia de 7 estaciones pluviométricas, 3 estaciones climatológicas ordinarias, 4 estaciones limnigráficas y 1 estación limnimétrica. El nombre y ubicación de estas estaciones se presenta a continuación:

Tabla 19. Estaciones hidro-meteorológicas IDEAM cuenca río Sumapaz

Tipo de estación	Nombre	Latitud				Longitud				Municipio
		°	'	''	Dirección	°	'	''	Dirección	
Pluviométrica	La Playa	4	11	0	N	74	30	0	W	Pandi
	Cabrera	3	59	13.1	N	74	29	0.8	W	Cabrera
	Ospina Pérez	4	4	53.8	N	74	29	19.4	W	Venecia
	Carmen de Apicalá	4	9	39.5	N	74	42	46.9	W	Carmen de Apicalá
	El salero	4	14	4.3	N	74	36	23.9	W	Melgar
	Peñas Blancas	3	59	0	N	74	24	0	W	Cabrera
	Hacienda La Granja	4	9	39.4	N	74	35	0	W	Melgar
Climatológica ordinaria	Pandi	4	11	33.8	N	74	29	14.7	W	Pandi
	Peñas Blancas	3	57	53	N	74	26	37.5	W	Cabrera
	Base aérea Melgar	4	12	44	N	74	38	12.6	W	Melgar
Limnimétrica	Dos Mil	3	58	0	N	74	27	0	W	Cabrera
Limnigráfica	El profundo automática	4	1	42.1	N	74	30	15.4	W	Cabrera
	La Playa	4	11	32.1	N	74	30	2.6	W	Pandi
	Melgar	4	12	0	N	74	39	0	W	Melgar
	El limonar	4	13	57.2		74	37	14	W	Melgar

A continuación se presenta un mapa, de elaboración propia, en el cual es posible observar la ubicación de las estaciones dentro de los límites de la cuenca antes presentados. Las siglas PM, CO, LG y LM indican el tipo de estación siendo estas pluviométrica, climatológica ordinaria, limnigráfica y limnimétrica, respectivamente:

Estaciones cuenca

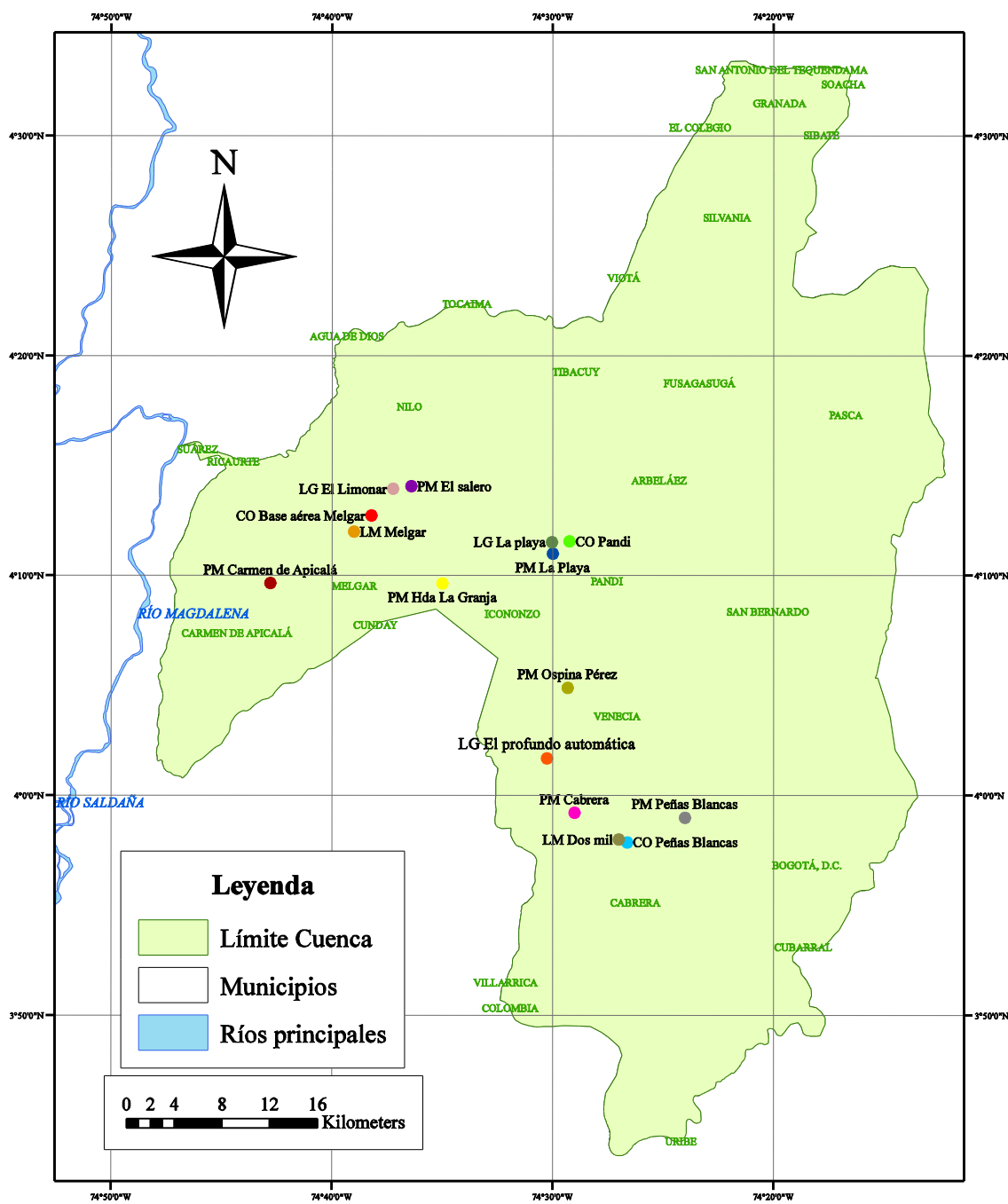


Ilustración 7. Ubicación estaciones hidro-meteorológicas dentro de cuenca

Contando con la información primaria de estas estaciones, se procedió a solicitar al IDEAM la información hidro-meteorológica, requerida para la realización de los análisis. Las series obtenidas, para todas las estaciones, presentan resolución temporal mensual y los parámetros que contienen dependen de su tipo. A continuación se presentan los parámetros medidos en las series para cada estación así como el intervalo de tiempo registrado para cada uno:

Tabla 20. Longitud del registro de valores totales mensuales de precipitación estaciones pluviométricas

Estaciones pluviométricas	Intervalo de registros para valores totales mensuales de precipitación
<i>La Playa</i>	Junio/55-Mayo/71
<i>Cabrera</i>	Octubre/58-Febrero/14
<i>Ospina Pérez</i>	Marzo/72-Noviembre/13
<i>Carmen de Apicalá</i>	Febrero/72-Mayo/13
<i>El Salero</i>	Noviembre/71-Abril/12
<i>Peñas Blancas</i>	Enero/81-Diciembre/86
<i>Hacienda La Granja</i>	Enero/83-Diciembre/04 & Enero/06-Agosto/2013

Tabla 21. Longitud del registro de valores totales mensuales de precipitación estaciones climatológicas ordinarias

Estaciones climatológicas ordinarias	Intervalo de registros para valores totales mensuales de precipitación
<i>Pandi</i>	Julio/69-Marzo/14
<i>Base aérea Melgar</i>	Marzo/73-Diciembre/79 & Enero/85-Diciembre/86 & Enero/90-Diciembre/93 & Enero/86-Diciembre/09 & Enero/11-Noviembre/11
<i>Peñas Blancas</i>	Diciembre/86-Julio/13

Tabla 22. Longitud del registro de valores medios mensuales de temperatura estaciones climatológicas ordinarias

Estaciones climatológicas ordinarias	Intervalo de registros para valores medios mensuales de temperatura
<i>Pandi</i>	Julio/69-Febrero/13
<i>Base aérea Melgar</i>	Enero/73-Diciembre/75 & Enero/78-Diciembre/78 & Enero/85-Diciembre/86 & Enero/90-Noviembre/11
<i>Peñas Blancas</i>	Diciembre/86-Mayo/13

Tabla 23. Longitud del registro de valores medios mensuales de caudal estaciones limnimétricas y limnigráficas

Estaciones limnimétricas/limnigráficas	Intervalo de registros para valores medios mensuales de caudal
<i>El profundo automática</i>	Enero/59-Diciembre/13
<i>La Playa</i>	Enero/59-Diciembre/13
<i>Dos Mil</i>	Enero/59-Diciembre/86 & Enero/92-Diciembre/01
<i>Melgar</i>	Enero/73-Diciembre/84
<i>El Limonar</i>	Enero/65-Diciembre/13

6.2. Estimación de valores faltantes en series

Una vez se obtuvieron las series históricas, requeridas para la realización del análisis, se procedió a organizar la información y completar los valores faltantes de precipitación. En primer lugar, la organización de la información consistió en dar formato a los valores de tal manera, que los datos registrados estuvieran en orden secuencial. Este procedimiento se debe realizar dado que el IDEAM entrega la información con el formato que se muestra en la siguiente Ilustración pero, con propósitos de análisis y cálculo de índices, se debe variar el mismo.

VALORES HISTÓRICOS DE PRECIPITACIÓN (mm)											
FECHA DE REGISTRO		ESTACIÓN		VALOR DE PRECIPITACIÓN (mm)		VALOR DE PRECIPITACIÓN (mm)		VALOR DE PRECIPITACIÓN (mm)		VALOR DE PRECIPITACIÓN (mm)	
FECHA	HORA	ESTACIÓN	VALOR	FECHA	HORA	ESTACIÓN	VALOR	FECHA	HORA	ESTACIÓN	VALOR
1970	1	1	10.0	1970	1	1	10.0	1970	1	1	10.0
1971	1	1	10.0	1971	1	1	10.0	1971	1	1	10.0
1972	1	1	10.0	1972	1	1	10.0	1972	1	1	10.0
1973	1	1	10.0	1973	1	1	10.0	1973	1	1	10.0
1974	1	1	10.0	1974	1	1	10.0	1974	1	1	10.0
1975	1	1	10.0	1975	1	1	10.0	1975	1	1	10.0
1976	1	1	10.0	1976	1	1	10.0	1976	1	1	10.0
1977	1	1	10.0	1977	1	1	10.0	1977	1	1	10.0
1978	1	1	10.0	1978	1	1	10.0	1978	1	1	10.0
1979	1	1	10.0	1979	1	1	10.0	1979	1	1	10.0
1980	1	1	10.0	1980	1	1	10.0	1980	1	1	10.0
1981	1	1	10.0	1981	1	1	10.0	1981	1	1	10.0
1982	1	1	10.0	1982	1	1	10.0	1982	1	1	10.0
1983	1	1	10.0	1983	1	1	10.0	1983	1	1	10.0
1984	1	1	10.0	1984	1	1	10.0	1984	1	1	10.0
1985	1	1	10.0	1985	1	1	10.0	1985	1	1	10.0
1986	1	1	10.0	1986	1	1	10.0	1986	1	1	10.0
1987	1	1	10.0	1987	1	1	10.0	1987	1	1	10.0
1988	1	1	10.0	1988	1	1	10.0	1988	1	1	10.0
1989	1	1	10.0	1989	1	1	10.0	1989	1	1	10.0
1990	1	1	10.0	1990	1	1	10.0	1990	1	1	10.0
1991	1	1	10.0	1991	1	1	10.0	1991	1	1	10.0
1992	1	1	10.0	1992	1	1	10.0	1992	1	1	10.0
1993	1	1	10.0	1993	1	1	10.0	1993	1	1	10.0
1994	1	1	10.0	1994	1	1	10.0	1994	1	1	10.0
1995	1	1	10.0	1995	1	1	10.0	1995	1	1	10.0
1996	1	1	10.0	1996	1	1	10.0	1996	1	1	10.0
1997	1	1	10.0	1997	1	1	10.0	1997	1	1	10.0
1998	1	1	10.0	1998	1	1	10.0	1998	1	1	10.0
1999	1	1	10.0	1999	1	1	10.0	1999	1	1	10.0
2000	1	1	10.0	2000	1	1	10.0	2000	1	1	10.0
2001	1	1	10.0	2001	1	1	10.0	2001	1	1	10.0
2002	1	1	10.0	2002	1	1	10.0	2002	1	1	10.0
2003	1	1	10.0	2003	1	1	10.0	2003	1	1	10.0
2004	1	1	10.0	2004	1	1	10.0	2004	1	1	10.0
2005	1	1	10.0	2005	1	1	10.0	2005	1	1	10.0
2006	1	1	10.0	2006	1	1	10.0	2006	1	1	10.0
2007	1	1	10.0	2007	1	1	10.0	2007	1	1	10.0
2008	1	1	10.0	2008	1	1	10.0	2008	1	1	10.0
2009	1	1	10.0	2009	1	1	10.0	2009	1	1	10.0
2010	1	1	10.0	2010	1	1	10.0	2010	1	1	10.0
2011	1	1	10.0	2011	1	1	10.0	2011	1	1	10.0
2012	1	1	10.0	2012	1	1	10.0	2012	1	1	10.0
2013	1	1	10.0	2013	1	1	10.0	2013	1	1	10.0
2014	1	1	10.0	2014	1	1	10.0	2014	1	1	10.0
2015	1	1	10.0	2015	1	1	10.0	2015	1	1	10.0
2016	1	1	10.0	2016	1	1	10.0	2016	1	1	10.0
2017	1	1	10.0	2017	1	1	10.0	2017	1	1	10.0
2018	1	1	10.0	2018	1	1	10.0	2018	1	1	10.0
2019	1	1	10.0	2019	1	1	10.0	2019	1	1	10.0
2020	1	1	10.0	2020	1	1	10.0	2020	1	1	10.0

Ilustración 8. Formato de información entregada por IDEAM

Ahora, tal como puede observarse en la Ilustración anterior, se presentan valores de precipitación que no se registran dentro de los valores suministrados por el IDEAM; por lo tanto, es necesario completarlos empleando alguno de los métodos de estimación de valores faltantes existentes.

En este caso, dado que la mayoría de las estaciones se encuentran relativamente cerca unas a otras y por simplicidad, se optó por emplear el método de la razón (Barger & Nyhan, 1960) (World Meteorological Organization, 1983). Este método se basa en el hecho de que para pares de estaciones, la razón entre sus valores mensuales, anuales o medios, tiende a ser constante. Según este método, si se tienen dos estaciones (A y B), se requiere determinar la relación q que existe entre las dos de la siguiente manera:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N a_i}$$

En donde N es el número total de datos de la serie, b_i representa los valores de la estación B y a_i los de la estación A. De esta forma, contando con el valor de la relación, si se requiere hallar el valor de b_j conociendo a_j se tiene:

$$b_j = q \cdot a_j$$

Los pares de estaciones que se compararon entre sí para la obtención de relaciones fueron:

- PM Melgar y CO Base aérea Melgar
- PM La Playa y CO Pandi
- PM El Salero y CO Base aérea Melgar
- PM La Playa y PM Hacienda La Granja
- PM Ospina Pérez y PM Cabrera
- PM Peñas Blancas y CO Peñas Blancas

Igualmente, se presentan valores faltantes en las series de temperatura registradas en las estaciones climatológicas ordinarias; sin embargo, en ese caso, dada la poca variabilidad de los valores entre sí, se empleó el criterio del valor medio (Barrera Escoda, 2004). Este método consiste en sustituir la carencia de un registro por el valor medio del mes analizado y, para series estacionarias, tiende a producir efectos mínimos sobre el comportamiento de la variable. De esta forma, no fue necesario hallar la relación entre series de temperatura para estaciones climatológicas ordinarias sino que, únicamente, se empleó el registro con el que se contaba.

6.3. Selección y cálculo de índices de sequía

Los índices de sequía seleccionados para el análisis a realizar fueron:

- Índice de porcentaje de normalidad
- Índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI)
- Índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI)
- Índice de anomalía de humedad de Palmer (Z)
- Índice estandarizado de precipitación (SPI)
- Deciles

El cálculo de estos índices se realizó para determinadas estaciones dependiendo de la longitud del registro (el cálculo de los índices de Palmer requiere registros de más de 10 años) y las series registradas (los índices de Palmer requieren registros de temperatura con los que sólo se cuenta en las estaciones climatológicas ordinarias). En cuanto a la escala temporal con la que se trabajó, se tiene que, en todos los casos, se emplearon ventanas de un mes. A continuación se presenta, de forma detallada, la metodología empleada para la estimación de cada uno de los índices evaluados. Es importante mencionar que sólo se presenta una explicación del procedimiento llevado a cabo para el cálculo de todos los índices de Palmer; dado que para estos, se utilizó una única herramienta.

6.3.1. Índice de porcentaje de normalidad

Para el cálculo de este índice, se consideraron valores normales mensuales como el promedio del registro total de precipitación para cada mes (12 valores normales de precipitación). De esta forma, para cada registro de precipitación se utilizó:

$$PN_i = \frac{p_{ni}}{N_n} \times 100$$

Donde PN_i representa el valor del índice de porcentaje de normalidad para el registro i en el mes n , p_{ni} la precipitación medida para el registro i en el mes n y N_n el valor normal correspondiente al mes n .

El cálculo del índice se llevó a cabo para todas las estaciones, incluso para aquellas con registros menores a 30 años.

6.3.2. Índices de Palmer

El cálculo de estos índice se llevó a cabo empleando la herramienta desarrollada por Jacobi *et al* (Jacobi, Perrone, Lyons Duncan, & Hornberger, 2013) que permite estimar el valor de todos los índices de Palmer (PDSI, PHDI, Z Index) a partir de registros de precipitación y temperatura junto con el valor de Agua Disponible Total (AWC) correspondiente a la ubicación de la estación considerada.

La herramienta utiliza el formato *.m* (Matlab) y permite el cálculo de los índices en cualquier escala temporal y espacial. Igualmente, permite al usuario definir qué método emplear para la estimación de valores de evapotranspiración (Thornthwaite o Hamon) y con qué periodo realizar la calibración. El periodo de calibración utilizado por default por el programa es el definido por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) que abarca desde 1931 hasta 1990. En caso de contar con registros más cortos que el periodo antes definido, el programa ofrece la opción de calibrar a partir del registro total. Finalmente, vale la pena mencionar que los registros deben ser continuos, mayores a 10 años y los valores de precipitación, temperatura y AWC deben introducirse en unidades de pulgadas, grados Fahrenheit y pulgadas, respectivamente.

Las series de precipitación y temperatura se organizan en un archivo de texto (.txt) junto con el año correspondiente al registro y la latitud de la estación que se esté considerando (la estimación de la evapotranspiración depende de la ubicación geográfica de la estación). El orden de las columnas dentro del archivo es:

- Primera columna: Latitud de la estación. Se replica el valor tantas veces como registros de precipitación y temperatura se analicen.
- Segunda columna: Año del registro. Se repite el mismo valor para los 12 meses de cada año en consideración.
- Tercera columna: Registro de temperatura en grados Fahrenheit

- Cuarta columna: Registro de precipitación en pulgadas

A continuación se presenta un esquema del formato que debe presentar el archivo de texto descrito anteriormente:

4.212	1996	82.4	2.047
4.212	1996	80.78	4.291
4.212	1996	81.88	8.220
4.212	1996	81.86	4.213
4.212	1996	81.14	5.276
4.212	1996	82.04	3.380
4.212	1996	81.86	2.047
4.212	1996	82.22	0.984
4.212	1996	81.86	3.110
4.212	1996	81.14	7.913
4.212	1996	80.78	6.260
4.212	1996	80.6	3.661
4.212	1997	82.04	2.283
4.212	1997	83.3	0.107
4.212	1997	83.66	4.134
4.212	1997	80.6	2.992
4.212	1997	81.68	1.654
4.212	1997	81.32	6.131
4.212	1997	82.22	0.079
4.212	1997	85.1	0.238
4.212	1997	84.56	2.717
4.212	1997	84.38	7.480
4.212	1997	82.78	1.171
4.212	1997	84.38	1.654
4.212	1998	84.74	0.276
4.212	1998	84.2	5.737
4.212	1998	82.04	4.094
4.212	1998	80.6	5.118
4.212	1998	80.98	8.298
4.212	1998	80.96	2.598
4.212	1998	82.4	1.102
4.212	1998	83.3	0.394
4.212	1998	82.04	5.000
4.212	1998	82.4	7.480

Ilustración 9. Formato archivo de entrada series para cálculo de índices de Palmer

Respecto al valor de agua disponible total (AWC), este debe ser ubicado en un archivo de texto independiente, en unidades de pulgadas tal como se muestra en la siguiente Ilustración:

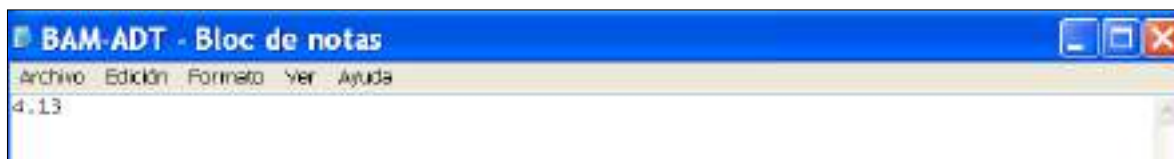


Ilustración 10. Formato archivo de entrada AWC para cálculo de índices de Palmer

En este punto, resulta importante mencionar que el cálculo de los índices de Palmer se realizó, únicamente, para las estaciones climatológicas ordinarias del área de estudio dado que, como se puede observar, es necesario contar con registros de temperatura.

Para la estimación del AWC de cada una de las estaciones evaluadas fue necesario, en primer lugar, establecer la cobertura de la tierra con la que se contaba en cada una de las ubicaciones. Este proceso, se llevó a cabo utilizando el Sistema de Información Geográfica

para la Planeación y el Ordenamiento Territorial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (SIG-OT). A continuación, se presentan los mapas de cobertura de la tierra obtenidos para las ubicaciones de las estaciones a analizar; en la última Ilustración puede observarse la leyenda respectiva:

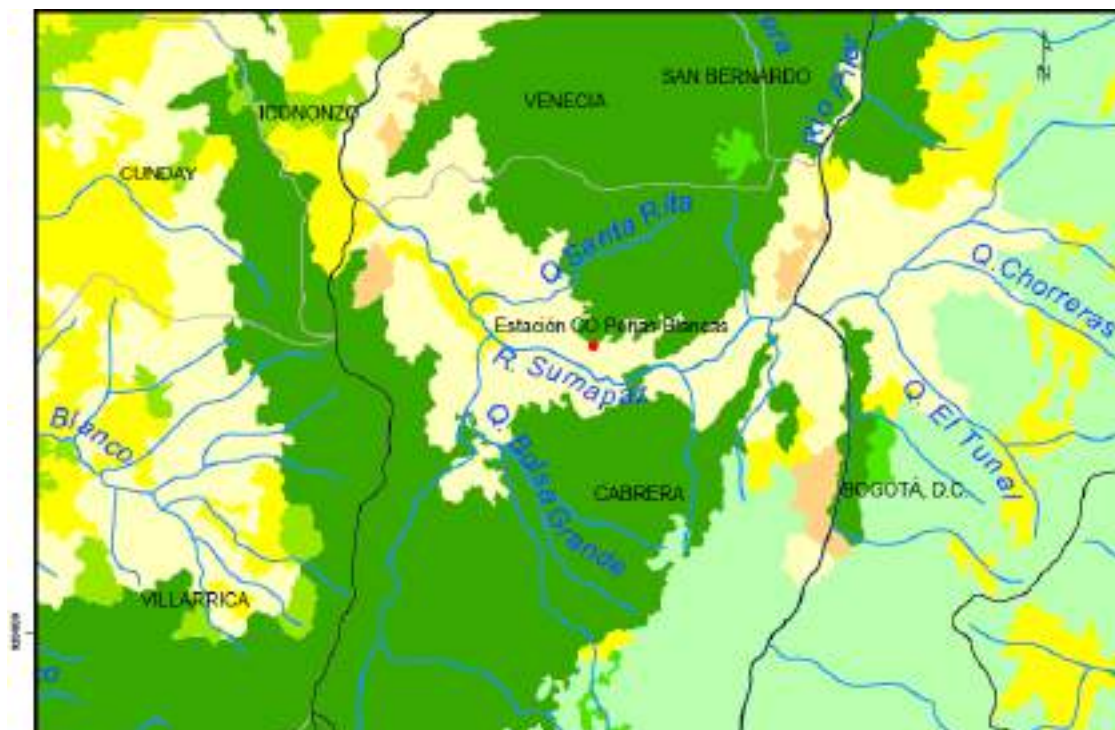


Ilustración 11. Cobertura de la tierra municipio de Cabrera, estación CO Peñas Blancas

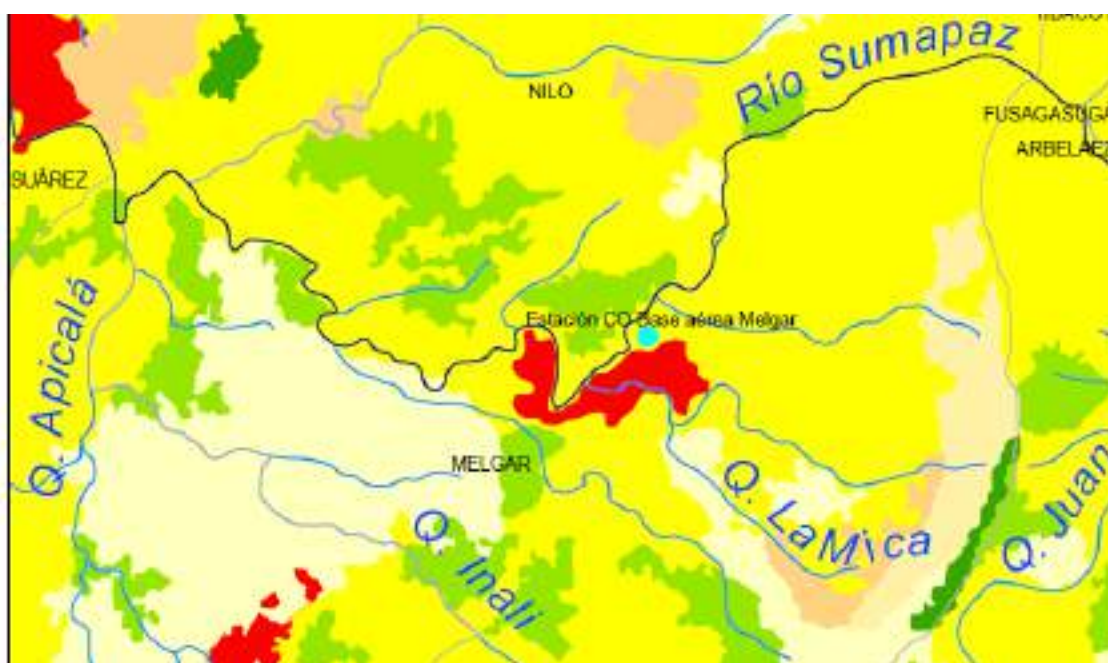


Ilustración 12. Cobertura de la tierra municipio de Melgar, estación CO Base aérea Melgar

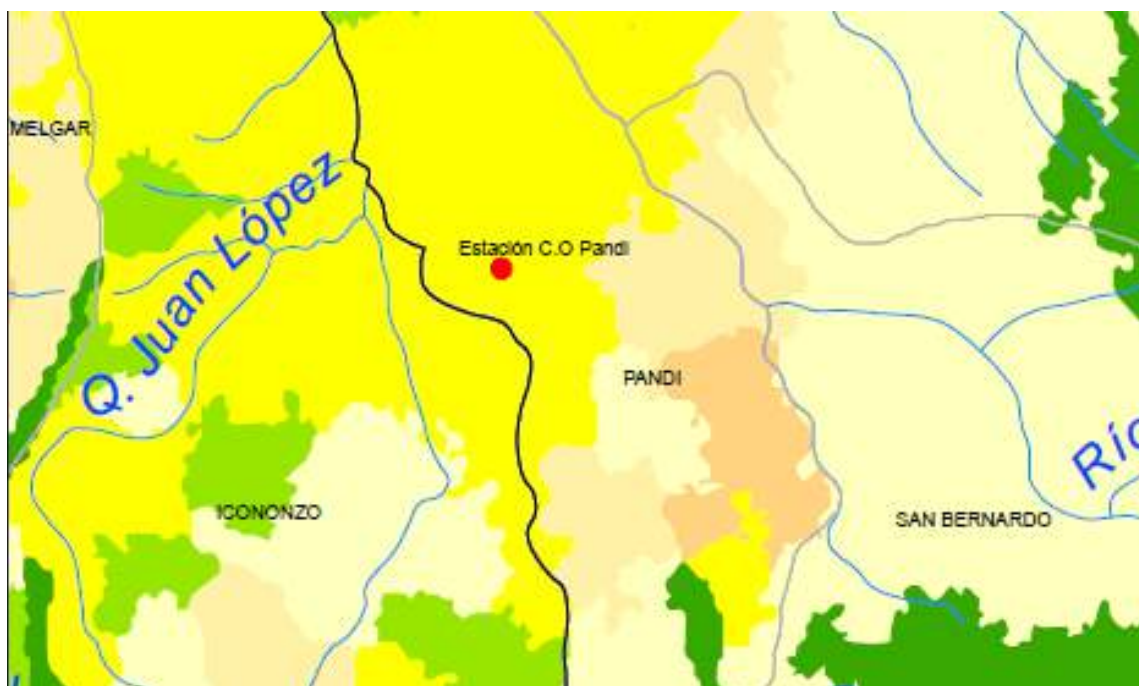


Ilustración 13. Cobertura de la tierra municipio de Pandi, estación CO Pandi



Ilustración 14. Leyenda mapas de cobertura de tierra

Una vez se cuenta con la cobertura de tierra en las estaciones de estudio, se procede a hallar la profundidad radicular máxima para el tipo de vegetación correspondiente de acuerdo con lo indicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, s.f.). Así, para las estaciones consideradas, se tiene:

Tabla 24. Profundidades radiculares máximas para estaciones consideradas

Estación	Profundidad radicular máxima (m)
<i>Pandi</i>	0.7
<i>Base aérea Melgar</i>	0.7
<i>Peñas Blancas</i>	1.3

Ahora, es necesario conocer el tipo de suelo de la zona de la estación para contar con un estimativo de la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. El tipo de suelo de las estaciones fue hallado a partir del Geo Portal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y los estudios de suelos de los departamentos de Cundinamarca y Tolima (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología, 2000) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2000). De esta forma se tiene, para las estaciones consideradas (FAO, s.f.):

Tabla 25. Clasificación suelo, capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente de estaciones de estudio

Estación	Clasificación suelo	Tipo de suelo	Capacidad de campo	Punto de marchitamiento permanente
<i>Pandi</i>	MWBe	Franco arenoso	0.14	0.06
<i>Base aérea Melgar</i>	VWA	Arenoso	0.31	0.15
<i>Peñas Blancas</i>	MLTd	Arenoso	0.31	0.15

El AWC se calculó entonces de acuerdo a la siguiente ecuación (FAO, s.f.):

$$AWC(mm) = 1000(CC - PMP)(Z)$$

En donde CC representa el valor de la capacidad de campo, PMP el punto de marchitamiento permanente del suelo y Z la profundidad radicular máxima de la cobertura del mismo, en metros. A continuación se presentan los valores de AWC obtenidos para cada una de las estaciones estudiadas:

Tabla 26. Valores de agua disponible total para estaciones de estudio

Estación	AWC (mm)
<i>Pandi</i>	56
<i>Base aérea Melgar</i>	105
<i>Peñas Blancas</i>	208

Contando con estos valores, fue posible construir los archivos requeridos para introducir al programa. La interfaz del mismo se presenta en la siguiente Ilustración:



Ilustración 15. Interfaz herramienta de cálculo índices de Palmer

En primer lugar, se realiza la carga de la información de AWC clicando el botón ‘Load AWC Data’, se selecciona el archivo a cargar, se verifica que los valores correspondan a los requeridos, se presiona ‘Next’ y ‘Finish’. La ventana de carga de datos se presenta a continuación:

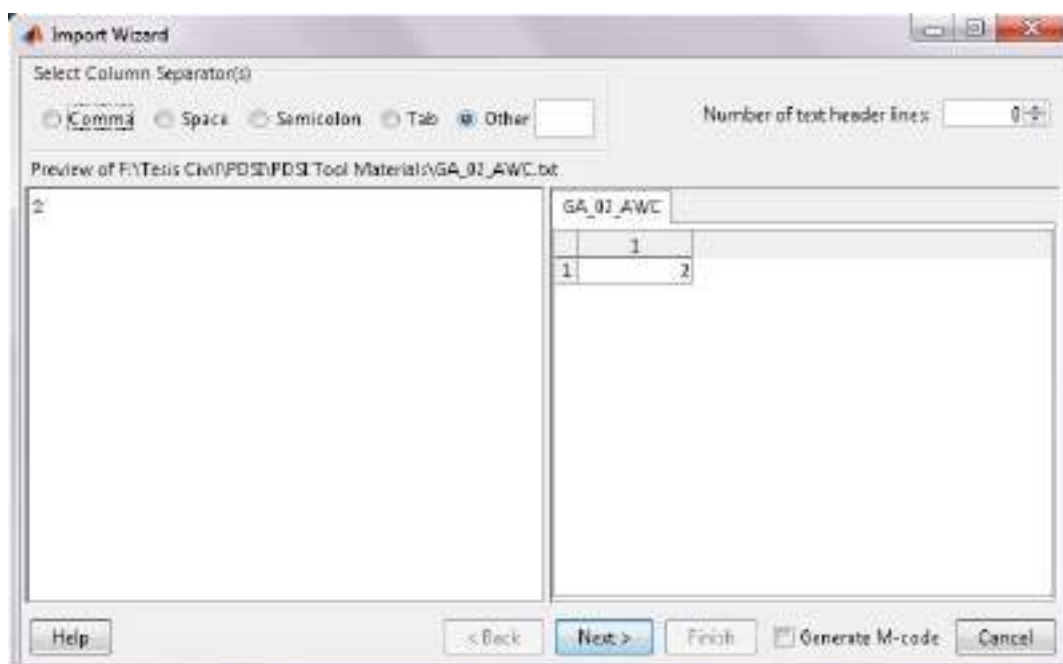


Ilustración 16. Ventana de carga de datos AWC

Posteriormente, se procede a la carga de los valores de precipitación y temperatura; esta vez clicando en ‘Load Temperature and Precipitation Data’ y siguiendo los mismos pasos indicados para la carga de los valores de AWC. Así:

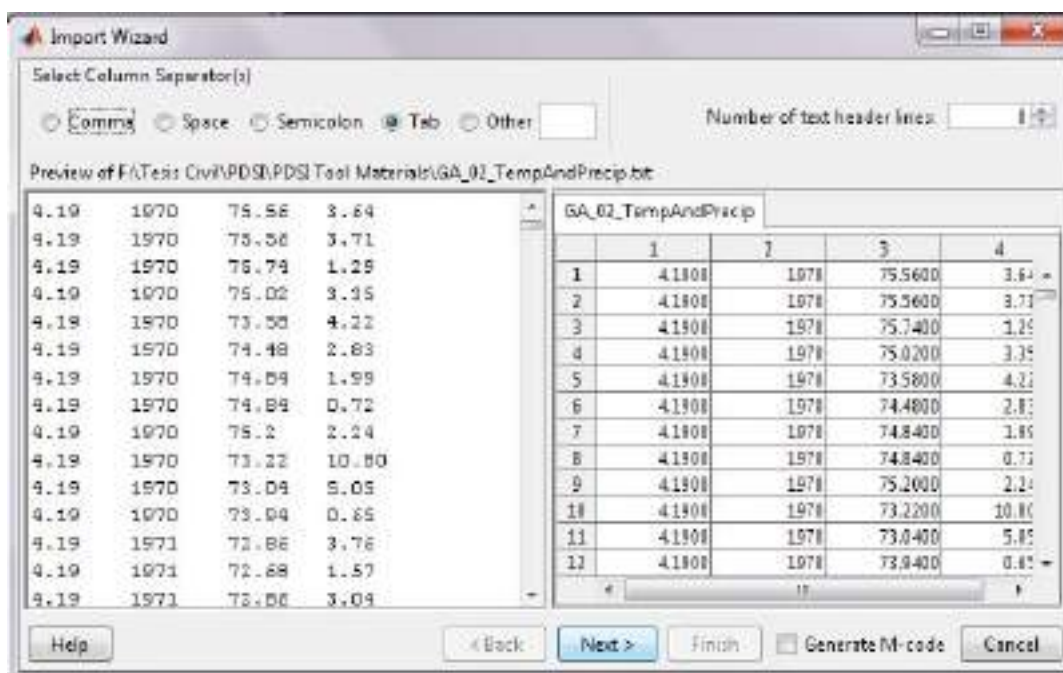


Ilustración 17. Ventana de carga de datos temperatura y precipitación

Finalmente, se selecciona el método de estimación de la evapotranspiración y el periodo de calibración (tal como se mencionó anteriormente) y se oprime ‘Run’. La herramienta genera un archivo con extensión .dat que contiene:

- Columna 1: Latitud de la estación
- Columna 2: Año
- Columna 3: Valor estimado de evapotranspiración, en pulgadas, de acuerdo con el método elegido.
- Columna 4: Índice de anomalía de humedad de Palmer para el mes
- Columnas 5 a 9: Valores generados en cálculos intermedios.
- Columna 10: Índice de severidad de sequía de Palmer para el mes.
- Columna 11: Índice de sequía hidrológica de Palmer para el mes.

En la siguiente ilustración puede observarse el formato de los valores generados por el programa:

Latitude	Year	PET	Z-Index	Pp	Px1	Px2	Px3	X	PDSI	PHDI
4.1900	1980	4.1982	-0.9705	0.0000	0.0000	-0.3235	0.0000	-0.3235	-0.3235	-0.3235
4.1900	1980	3.6323	4.5978	0.0000	0.0000	0.0000	1.5326	1.5326	1.5326	1.5326
4.1900	1980	4.5273	-4.1063	100.0000	0.0000	0.0000	-1.3688	-1.3688	-1.3688	-1.3688
4.1900	1980	4.0646	-0.9527	0.0000	0.0000	0.0000	-1.5454	-1.5454	-1.5454	-1.5454
4.1900	1980	4.3906	-2.8884	0.0000	0.0000	0.0000	-2.3490	-2.3490	-2.3490	-2.3490
4.1900	1980	3.9612	0.0354	3.8453	0.0118	0.0000	-2.0953	-2.0953	-2.0953	-2.0953
4.1900	1980	4.3471	-1.8802	0.0000	0.0000	0.0000	-2.5062	-2.5062	-2.5062	-2.5062
4.1900	1980	4.2158	2.0062	41.1165	0.6687	0.0000	-1.5793	-1.5793	-1.5793	-1.5793
4.1900	1980	4.2961	-1.3822	18.8331	0.1391	-0.4607	-1.8774	-1.8774	-1.8774	-1.8774
4.1900	1980	3.6019	0.7807	41.4354	0.3850	-0.1530	-1.4238	-1.4238	-1.4238	-1.4238

Ilustración 18. Formato de datos generados por programa de cálculo Palmer

El procedimiento descrito se realizó para las tres estaciones antes mencionadas en los siguientes intervalos de tiempo (considerando las condiciones que deben cumplir las series de temperatura y precipitación para ser empleadas en el programa):

Tabla 27. Periodos de análisis, por estación, de índices de Palmer

Estación	Período de análisis
Pandi	Enero/70-Diciembre/12
Base aérea Melgar	Enero/96 – Diciembre/09
Peñas Blancas	Enero/87 – Diciembre/12

6.3.3. Índice estandarizado de precipitación

Para la estimación de este índice se empleó el programa SPI desarrollado por el National Drought Mitigation Center de la Universidad de Nebraska-Lincoln (National Drought Mitigation Center, s.f.). El programa se encuentra compilado en C++ para su utilización y únicamente requiere un archivo (.txt) de entrada. En este archivo se deben incluir columnas independientes y en orden que contengan año, número de mes y precipitación correspondiente. Igualmente, se debe dejar la primera fila del archivo libre o puede colocarse el nombre de la estación analizada. Es importante mencionar que los valores de precipitación no deben contener decimales y pueden estar tanto en unidades de milímetros como de pulgadas. El formato del archivo de entrada se presenta en la siguiente Ilustración:

Cabreria		
1958	10	99
1958	11	84
1958	12	54
1959	1	9
1959	2	19
1959	3	129
1959	4	91
1959	5	148
1959	6	142
1959	7	91

Ilustración 19. Formato archivo de entrada programa SPI

La interfaz del programa se presenta a continuación:

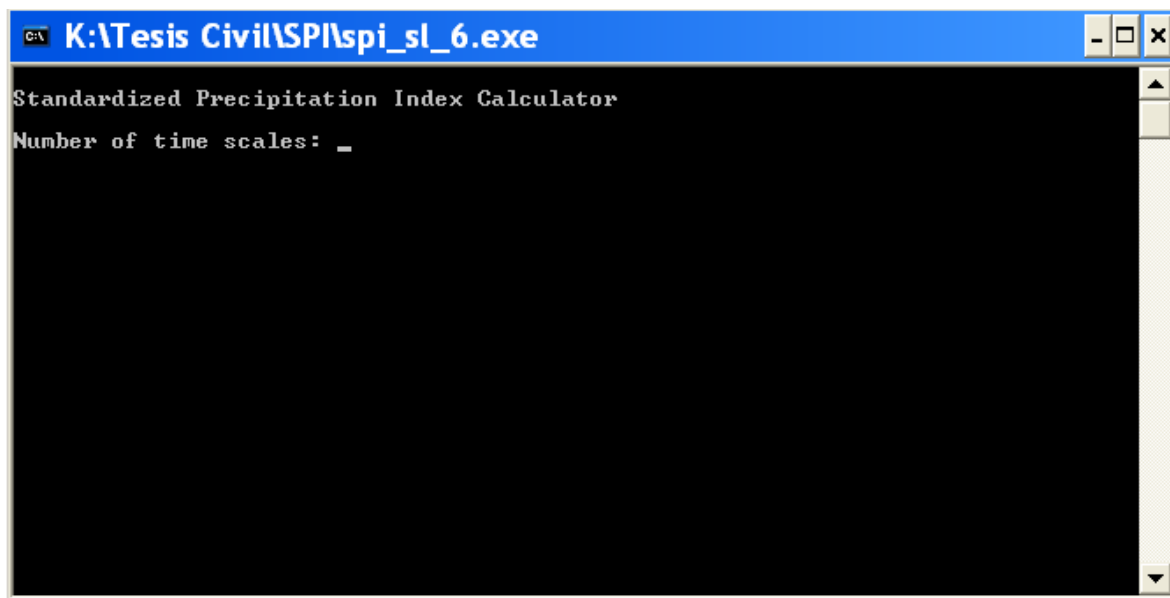


Ilustración 20. Interfaz programa SPI

En primer lugar, se debe indicar al programa el número de escalas temporales distintas que se quieren analizar. Las escalas temporales indican el número de meses consecutivos que se agruparan para hallar el índice. Para las estaciones estudiadas, se optó por considerar 5 escalas temporales; así, se indica '5' al programa y se presiona 'Enter'. Posteriormente, la herramienta solicita las 5 escalas elegidas que, para este caso, fueron 1, 3, 6, 9 y 12 meses tal como se puede observar a continuación:

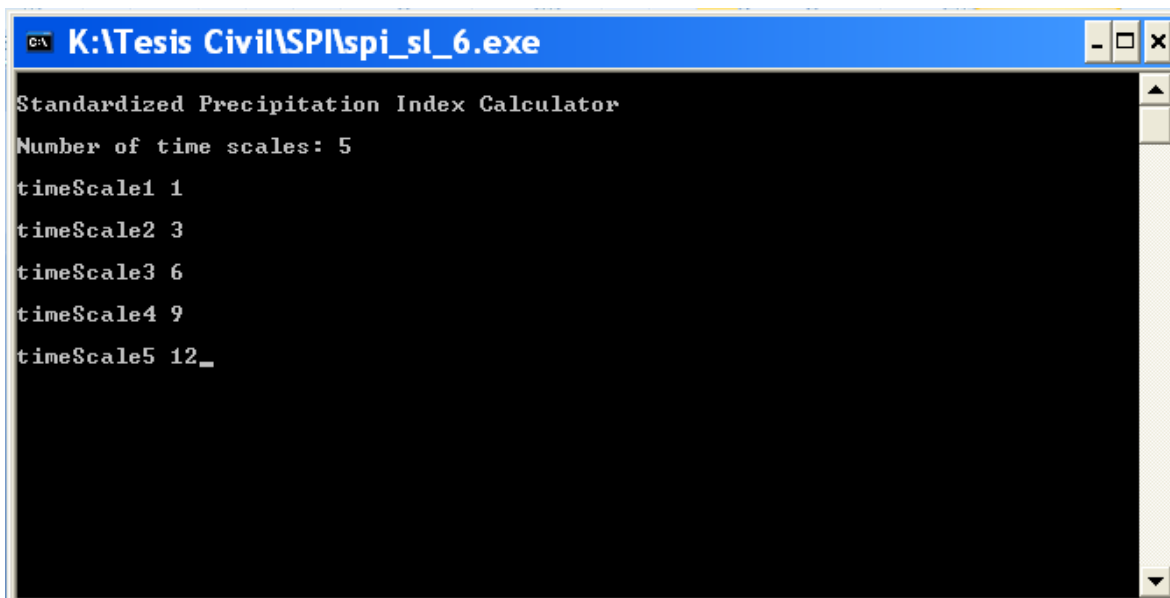


Ilustración 21. Escalas temporales elegidas para índice estandarizado de precipitación

A continuación, se introduce el nombre del archivo de texto que contiene los valores de precipitación y que debe encontrarse en el mismo directorio que el ejecutable del programa:

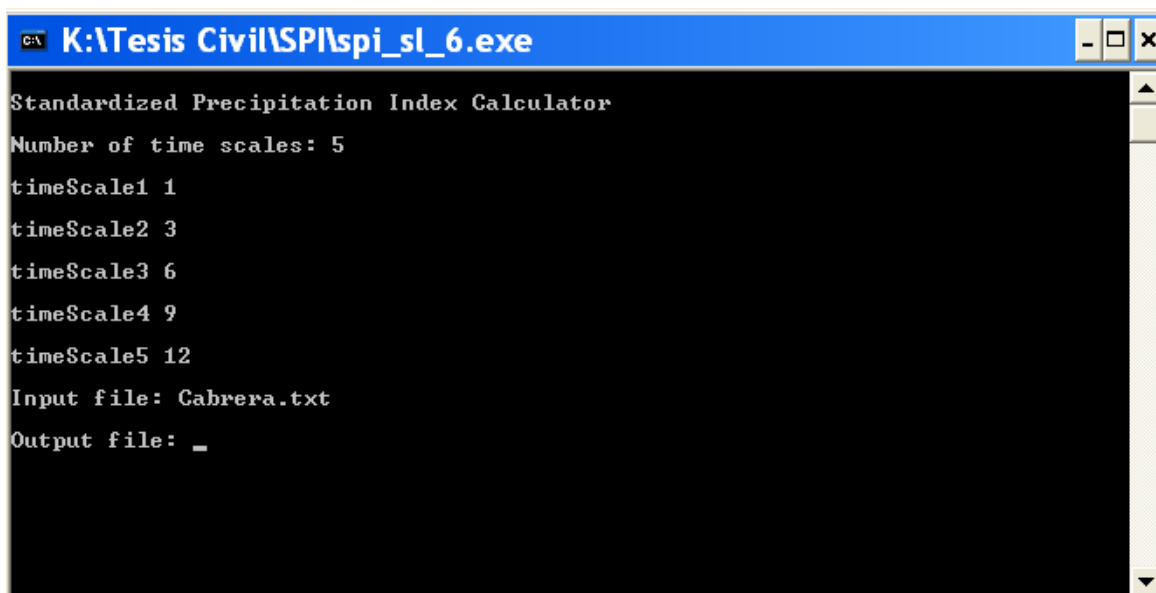


Ilustración 22. Introducción de archivo de entrada a programa SPI

Finalmente, se da un nombre al archivo de salida que contendrá los índices calculados para las escalas temporales definidas. El archivo de salida se encuentra en formato .dat y presenta el siguiente formato:

- Columna 1: Año
- Columna 2: Mes
- Columna 3: SPI calculado para primera escala temporal
- Columna 4: SPI calculado para segunda escala temporal
- Columna 5 a N: SPI calculado para escala temporal i de N+2 escalas definidas.

Cabrera					
1958 10	-0.48	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
1958 11	-0.54	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
1958 12	0.19	-0.65	-99.00	-99.00	-99.00
1959 1	-1.20	-0.88	-99.00	-99.00	-99.00
1959 2	-1.19	-1.07	-99.00	-99.00	-99.00
1959 3	0.97	-0.24	-0.70	-99.00	-99.00
1959 4	-0.32	-0.05	-0.61	-99.00	-99.00
1959 5	0.63	0.59	-0.03	-99.00	-99.00
1959 6	1.85	0.83	0.43	0.01	-99.00
1959 7	1.50	1.46	0.93	0.38	-99.00
1959 8	0.70	1.72	1.28	0.66	-99.00
1959 9	-1.16	0.42	0.76	0.47	0.10
1959 10	0.40	0.05	0.98	0.68	0.28
1959 11	-0.34	-0.39	0.65	0.71	0.32
1959 12	-0.05	-0.11	0.08	0.46	0.25
1960 1	0.77	-0.03	-0.04	0.70	0.52
1960 2	-0.27	0.11	-0.31	0.51	0.60
1960 3	0.10	0.16	-0.03	0.08	0.40
1960 4	0.15	-0.10	-0.13	-0.14	0.50

Ilustración 23. Formato archivo de salida programa SPI

Es posible notar que se presentan valores de -99.00 en los valores de salida del programa, este hecho se debe a que, dada la escala temporal, inicialmente no se cuenta con suficientes valores para calcular el índice.

En este caso, el índice fue calculado para todas las estaciones e intervalos de registros de precipitación con que se contaba y que fueron presentados en las Tabla 20 y Tabla 21.

6.3.4. Deciles

Para la estimación de este índice se utilizaron los registros completos de precipitación de todas las estaciones. El procedimiento utilizado para su cálculo consistió en la organización de los valores de precipitación de menor a mayor; posteriormente, se definieron los límites de los rangos de los deciles considerando que todos deberían contener, aproximadamente, el mismo número de registros. Finalmente, se asignó a cada valor de precipitación un decil de acuerdo a los rangos definidos y a la Tabla 5.

6.4. Comparación

Como se mencionó anteriormente, la comparación entre índices de sequía consistió en cuatro partes fundamentales que se explican detalladamente a continuación.

6.4.1. Variaciones en longitud de series consideradas

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial, el análisis de series climáticas debería estar dado para periodos de 30 años. Se recomienda este periodo dado que se considera que es suficientemente largo para filtrar cualquier variación inter-anual o anomalía pero, de igual forma suficientemente corto para permitir observar tendencias a largo plazo (World Meteorological Organization, s.f.).

Teniendo en cuenta lo anterior, resulta importante verificar si, en el área de estudio, se presentan variaciones importantes en los índices hallados empleando todo el registro respecto a los calculados para los periodos estándar solicitados por la WMO. Así, optó por comparar las diferencias que se presentan entre los valores de índices obtenidos para aquellas estaciones con registros superiores a 30 años.

Los índices comparados fueron el estandarizado de precipitación (SPI) y los índices de Palmer (PDSI, PHDI y Z) para los siguientes periodos en las siguientes estaciones:

Tabla 28. Estaciones analizadas en periodos estándar para SPI

Estación	Períodos de análisis
Cabrera	1960-1990; 1970-2000; 1980-2010
Carmen de Apicalá	1980-2010
Pandi	1970-2000; 1980-2010
El Salero	1980-2010
Ospina Pérez	1980-2010

En el caso de los índices de Palmer, estos fueron evaluados únicamente para la estación climatológica ordinaria de Pandi, dado que es la única en la que se contaba con un registro suficientemente extenso. El análisis se llevó a cabo para los periodos 1970-2000 y 1980-2010.

6.4.2. Comparación entre sí

Se emplearon regresiones lineales y potenciales así como coeficientes de correlación para evaluar la relación que presentan los valores de los diferentes índices en determinadas estaciones. Para este análisis, sólo fue posible evaluar la relación de otros índices con de Palmer en las tres estaciones climatológicas ordinarias. Para el caso de las estaciones pluviométricas, se realizaron análisis de correlación entre SPI, deciles y porcentaje de normalidad.

6.4.3. Índices de eventos macro climáticos

Se consideró importante, para el análisis de los índices hallados, realizar comparaciones entre los valores hallados e índices utilizados en la definición de eventos macro-climáticos.

En este caso, se comparó la relación existente entre el Índice Oceánico del Niño (ONI) y el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) en escala temporal de tres meses. El análisis se realizó tanto rezagando la serie del índice macro-climático 1, 2 y 3 meses como tomando los valores originales. Igualmente, se empleó la metodología descrita por Rivera & Penalba (Rivera & Penalba, 2015) y se analizó la correlación entre las dos series para cada intervalo de tres meses de forma independiente considerando los rezagos.

Respecto a los índices de Palmer, se optó por comparar las series con el Índice Multi-variado del ENSO (MEI). Se realizaron varios intentos y, finalmente, se concluyó que los valores de los índices de Palmer con lo que se compararía el MEI serían promedios de dos meses centrados a la izquierda. Para este análisis se evaluaron los coeficientes de correlación así como regresiones lineales y potenciales de segundo orden. Igualmente, se realizó la comparación de los índices y el MEI sin realizar promedio.

6.4.4. Series de caudales

Dado que el índice Estandarizado de Precipitación (SPI), consiste en el ajuste de una serie histórica a una distribución de probabilidad y su posterior conversión a una distribución normal; es posible hallarlo para series diferentes a series de precipitación. De esta forma, se halló el SPI para las series de caudales de las estaciones limnimétricas y limnigráficas disponibles y se realizó una comparación entre los valores obtenidos y los correspondientes a índices hallados a partir de precipitación en estaciones cercanas.

Con este procedimiento, se espera analizar los rezagos que pueden presentarse entre las series de precipitación y caudales; así, como la influencia de variaciones de

precipitación en caudales. Las estaciones comparadas en esta parte junto con los intervalos de tiempo que se consideraron se presentan a continuación:

Tabla 29. Estaciones comparadas con series de caudales y periodo de comparación

Estación Limnigráfica/limnimétrica	Estación Pluviométrica/Climatológica	Periodo de comparación
Melgar	Base aérea Melgar	Marzo/73-Diciembre/79
El Limonar	El Salero	Noviembre/71-Abril/12
La Playa	La Playa	Enero/59-Mayo/71
El profundo automática	Cabrera	Enero/59-Diciembre/13
Dos Mil	Peñas Blancas (CO)	Enero/92-Diciembre/01

6.5. Recolección de información

En primer lugar, se definió la dinámica de caudales a lo largo del río de acuerdo con los registros de caudal obtenidos del IDEAM. Con base a estas series se construyó la curva de duración de caudales correspondiente a cada una de las estaciones estudiadas. Igualmente, se realizó la integración, por regla del trapecio, de estas curvas, para obtener el volumen medio anual en cada estación y, finalmente, se halló el caudal promedio mensual multianual de cada una de ellas.

La información de oferta y demanda anuales, para la cuenca de estudio, se extrajo del Estudio Nacional del Agua (ENA 2010) (IDEAM, 2010). En este documento, se cuantificó la oferta disponible y demanda (al año 2010) que se presentaba en las 309 sub zonas hidrográficas del país. Igualmente, se presentan estos parámetros, para todos los municipios del país que surten sus sistemas acueducto a partir de fuentes superficiales. La cuantificación de la oferta disponible se hace para escenarios de año medio y año seco. Los valores de oferta y demanda para la totalidad de la cuenca y para los municipios que surten sus acueductos del río Sumapaz (Melgar y Cabrera) se presentan a continuación:

Tabla 30. Oferta y demanda año medio y seco, cuenca Sumapaz

Oferta Disponible (Mm^3)	Seco	568
	Medio	1284
Demanda total (Mm^3)		82.93

Tabla 31. Oferta y demanda año medio y seco, Cabrera y Melgar

	Melgar	Cabrera
Oferta Disponible medio(Km^3)	1095535.13	347223.03
Oferta Disponible seco(Km^3)	592408.9	236657.1
Demanda (Mm^3)	2.62	0.07

Igualmente, se requirió información de índice de desarrollo humano (HDI) (que se asumió como el registrado para el ADR Sumapaz para toda la cuenca) (Romero Carrascal & Uribe Calad, 2012), porcentaje de área de la cuenca con vegetación natural (Puerto Rodríguez & Pimentel Suárez, 2006), población en los municipios de Cabrera y Melgar

(Departamento Administrativo Nacional de Estadística, s.f.) y valores de DBO promedio a lo largo de la corriente (Puerto Rodríguez & Pimentel Suárez, 2006).

6.6. Evaluación de índices bajo escenarios actuales

En esta parte se utilizó la información hallada en el punto anterior para estimar tres índices de escasez bajo las condiciones actuales de la cuenca de estudio. Los índices calculados fueron:

- Índice de Falkenmark
- Índice de uso del agua (IDEAM, 2010)
- Índice de sostenibilidad de la cuenca

La metodología empleada para su cálculo se describe a continuación:

- Índice de Falkenmark: A partir de la población al año 2010, con la que se contaba en los municipios de Melgar y Cabrera y a la oferta hídrica que presentaba el río en esas zonas, de acuerdo con lo indicado por el IDEAM, se estimó el volumen de agua anual disponible por habitante para cada uno de los municipios. No se estimó un solo índice para toda la cuenca dado que, la población que se abastece a partir del río en zonas diferentes a los municipios antes mencionados, no está cuantificada.
- Índice de uso del agua: Este índice se calcula de forma sencilla empleando los valores de oferta y demanda, para años seco y medio, definidos anteriormente. De esta forma, se calculó este índice tanto para los dos municipios como para la cuenca en general.
- Índice de sostenibilidad de la cuenca (WSI): En el cálculo de este índice no sólo se incluyen parámetros de cantidad de agua sino, además, de calidad y gestión de la misma. Dado lo anterior, se empleó el valor de índice de desarrollo humano (HDI) registrado para el ADR del Sumapaz; así como los valores de DBO promedio de la corriente registrados por Puerto & Pimentel (2006). A cada uno de los parámetros empleados, en cada indicador, se le asignó igual peso (promedio simple) y el cálculo del índice se llevó a cabo según lo indicado en Marco Teórico.

6.7. Evaluación de índices bajo escenarios de crecimiento poblacional y variabilidad climática

Para esta parte se realizaron reducciones del 40% en la oferta disponible total y para los municipios de Melgar y Cabrera. El porcentaje de reducción se eligió considerando que, de acuerdo con lo indicado por el IDEAM en el ENA 2010, la oferta del río Sumapaz, en años Niño, se reduce en este porcentaje. Igualmente, se definió un aumento en la demanda a partir de las proyecciones de población definidas por el DANE, para Melgar y Cabrera y un incremento de la misma de un 5% para la cuenca en su totalidad. El cálculo de los índices de Falkenmark y uso del agua se realizó tal como se explicó anteriormente. Respecto al índice de sostenibilidad de la cuenca, se evaluó un escenario con incrementos de más del

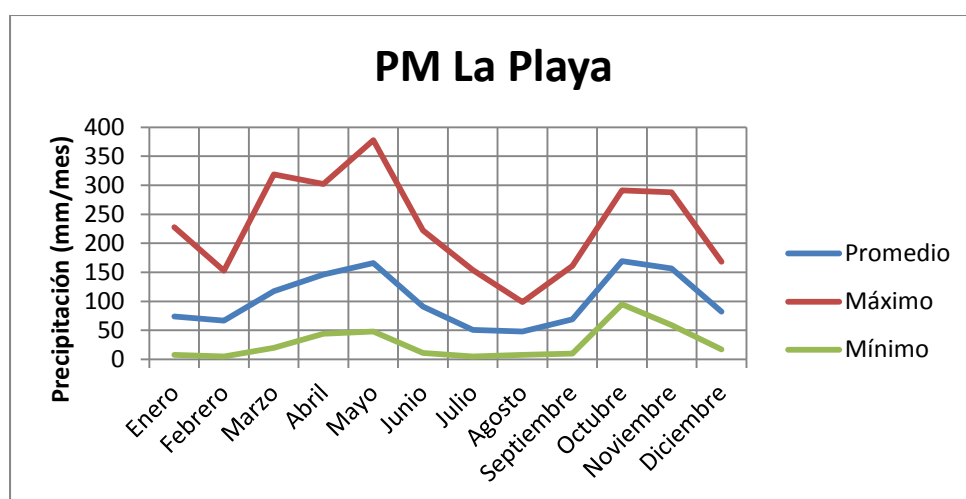
10% en la concentración de DBO en la corriente, capacidad institucional pobre e índice de presión ambiental sobre la cuenca alto.

7. Resultados y discusión

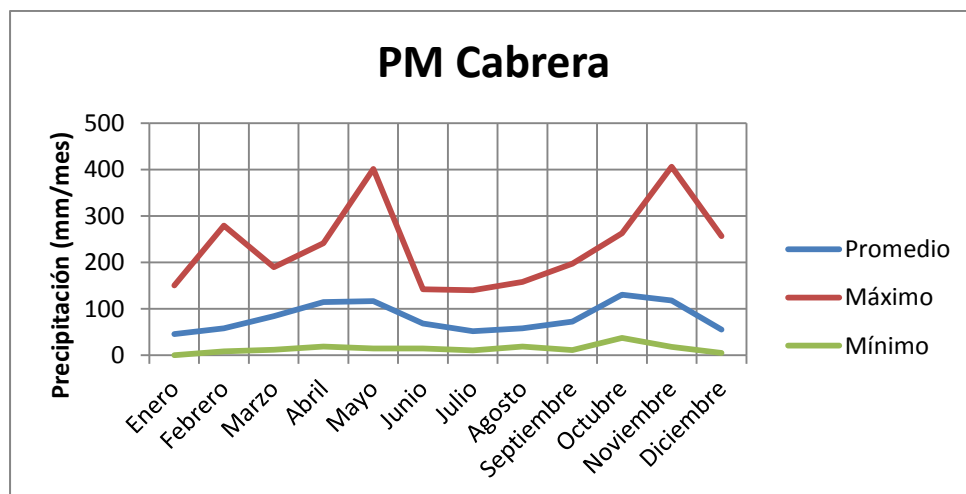
A continuación se presentan los resultados obtenidos después de llevar a cabo la metodología propuesta anteriormente; igualmente, se presenta una breve discusión de los mismos.

7.1. Régimen hidrológico estaciones de estudio

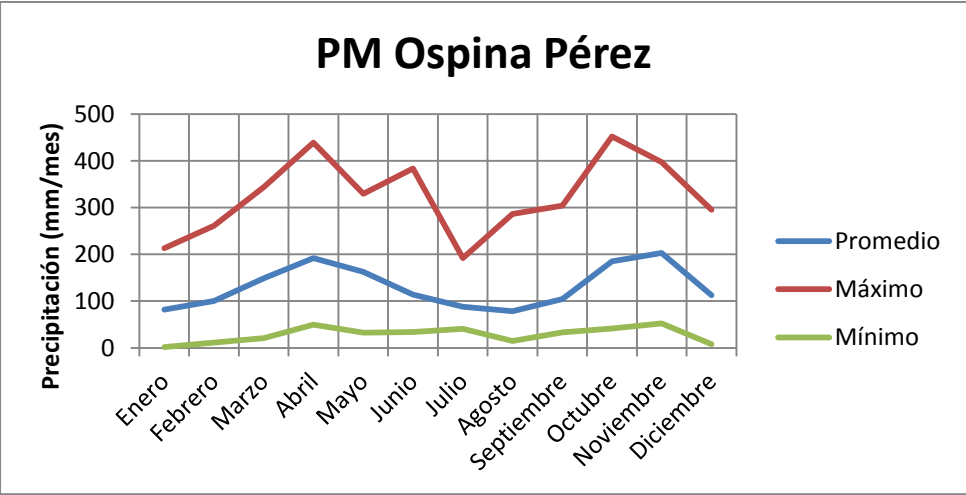
En primer lugar, se decidió analizar el régimen hidrológico de las estaciones hidrometeorológicas estudiadas. Este procedimiento se llevó a cabo empelando los valores promedio mensuales de precipitación y caudales para todo el registro de cada estación. De esta forma se obtuvo:



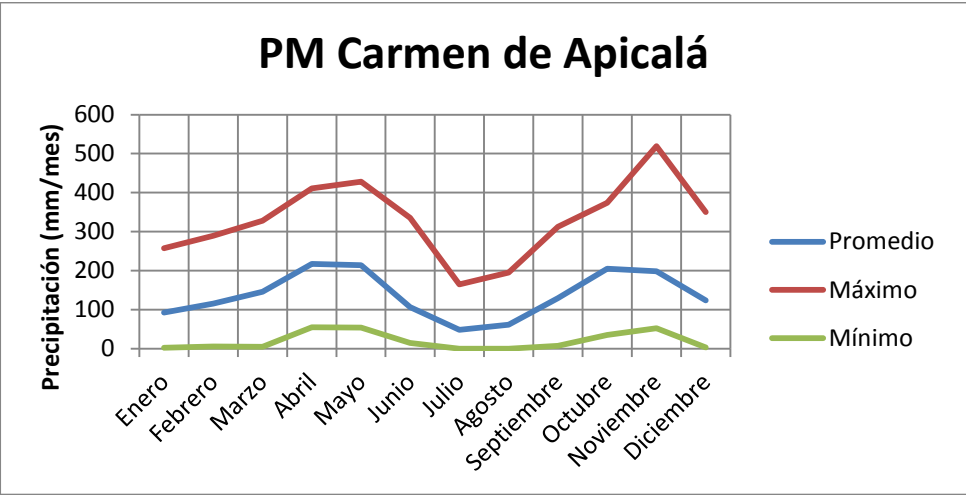
Gráfica 1. Régimen hidrológico, estación pluviométrica La Playa



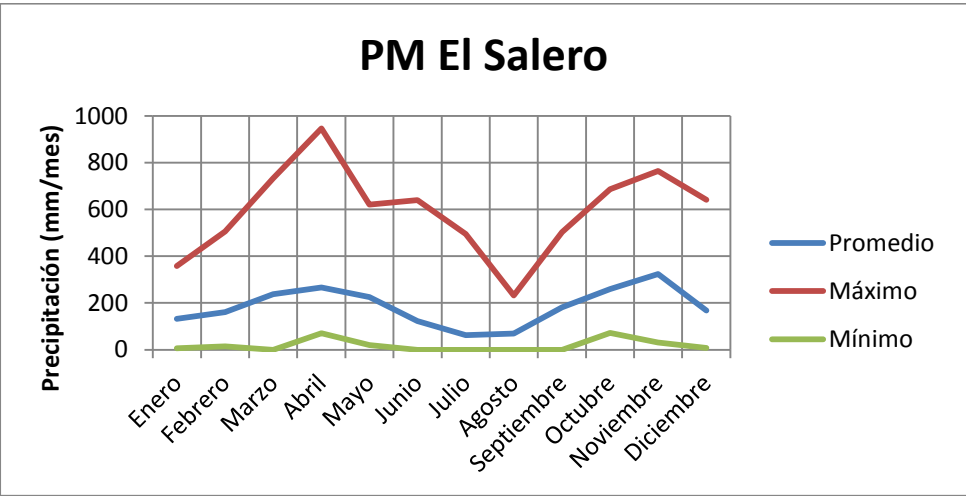
Gráfica 2. Régimen hidrológico, estación pluviométrica Cabrera



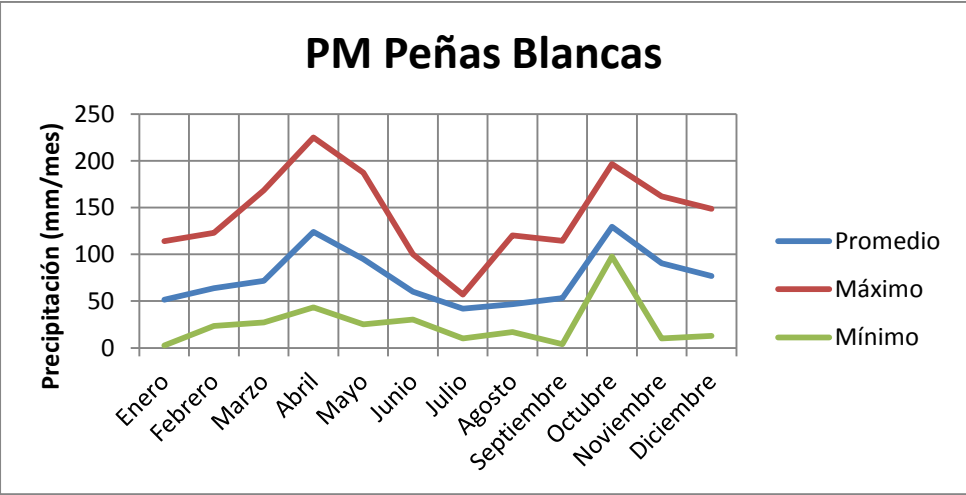
Gráfica 3. Régimen hidrológico, estación pluviométrica Ospina Pérez



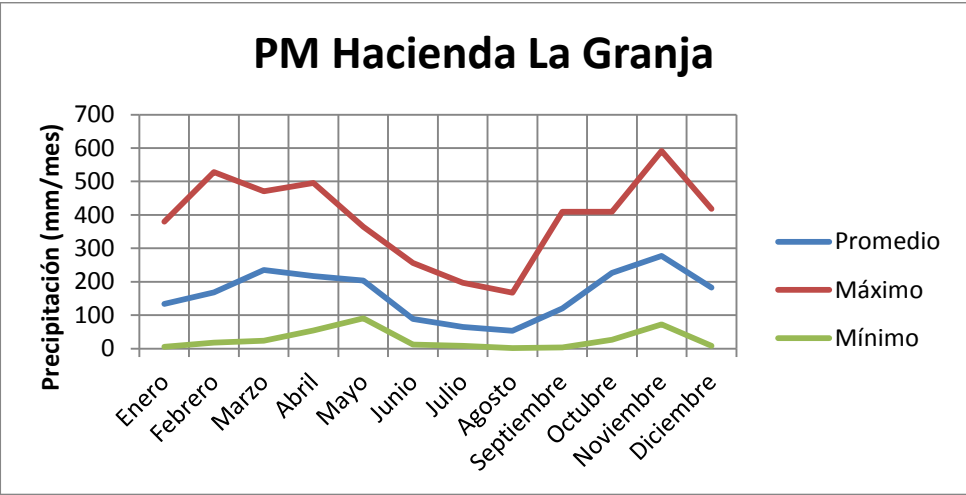
Gráfica 4. Régimen hidrológico, estación pluviométrica Carmen de Apicalá



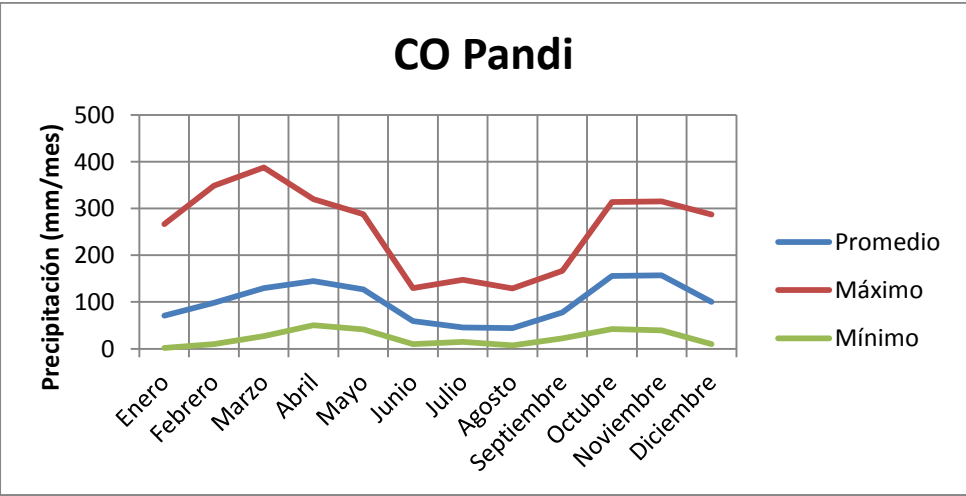
Gráfica 5. Régimen hidrológico, estación pluviométrica El Salero



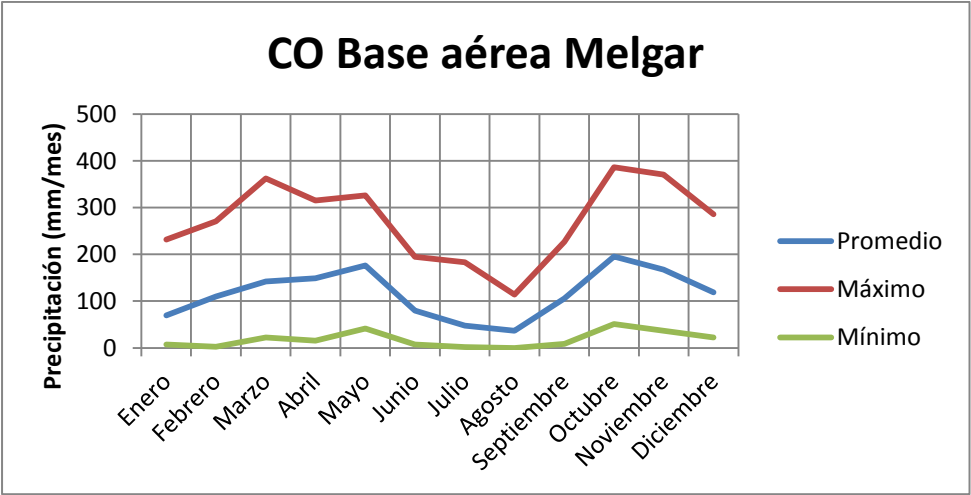
Gráfica 6. Régimen hidrológico, estación pluviométrica Peñas Blancas



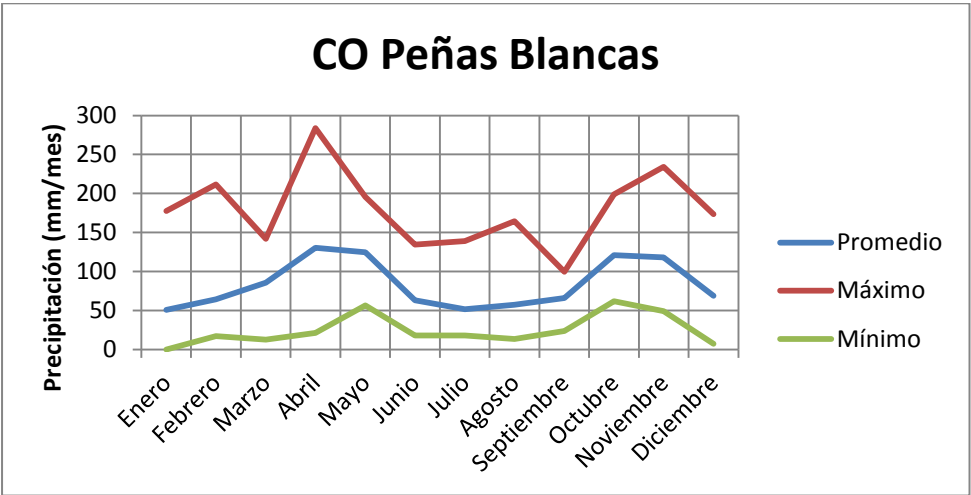
Gráfica 7. Régimen hidrológico, estación pluviométrica Hacienda La Granja



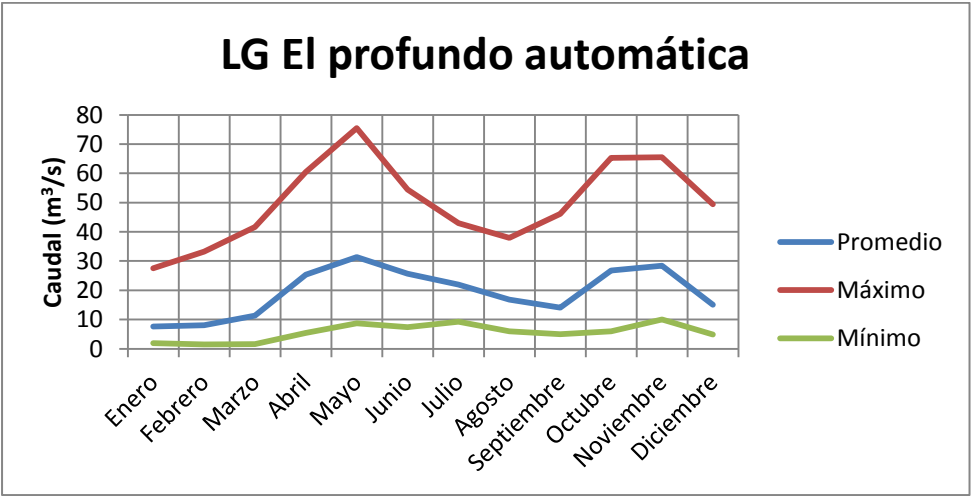
Gráfica 8. Régimen hidrológico, estación climatológica ordinaria Pandi



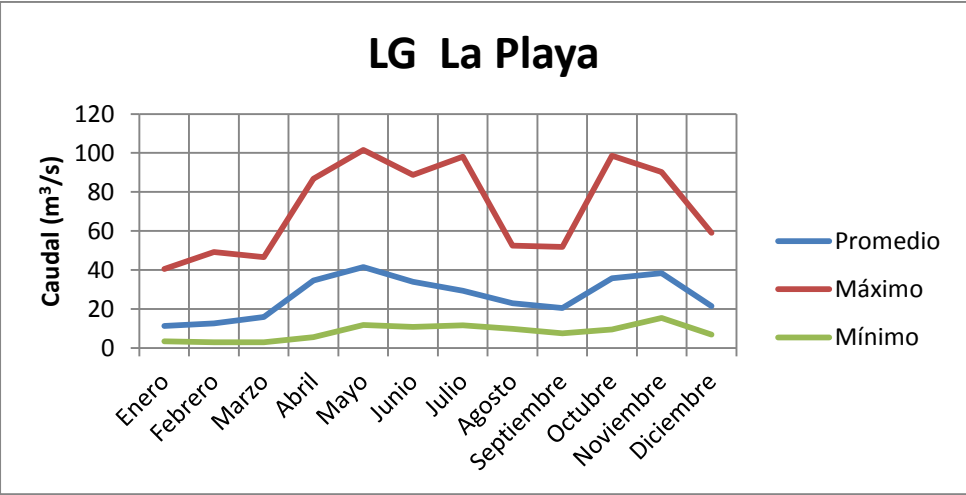
Gráfica 9. Régimen hidrológico, estación climatológica ordinaria Base aérea Melgar



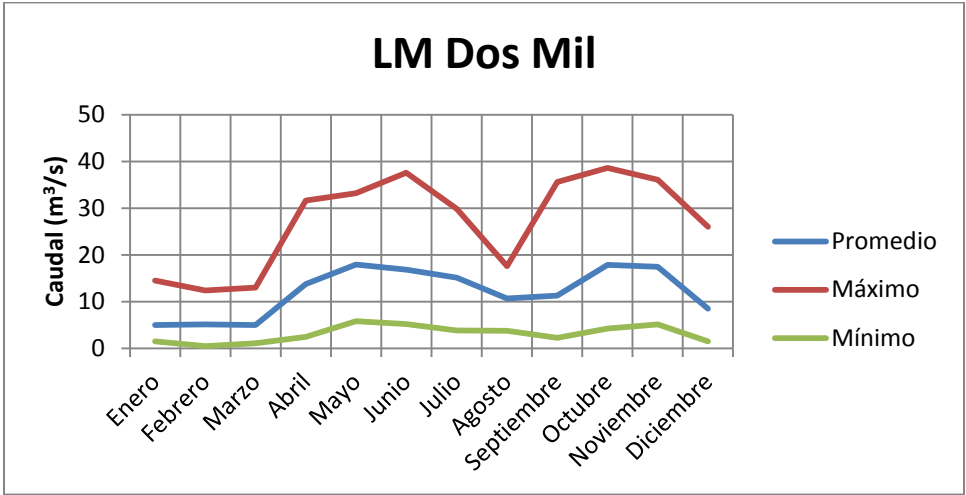
Gráfica 10. Régimen hidrológico, estación climatológica ordinaria Peñas Blancas



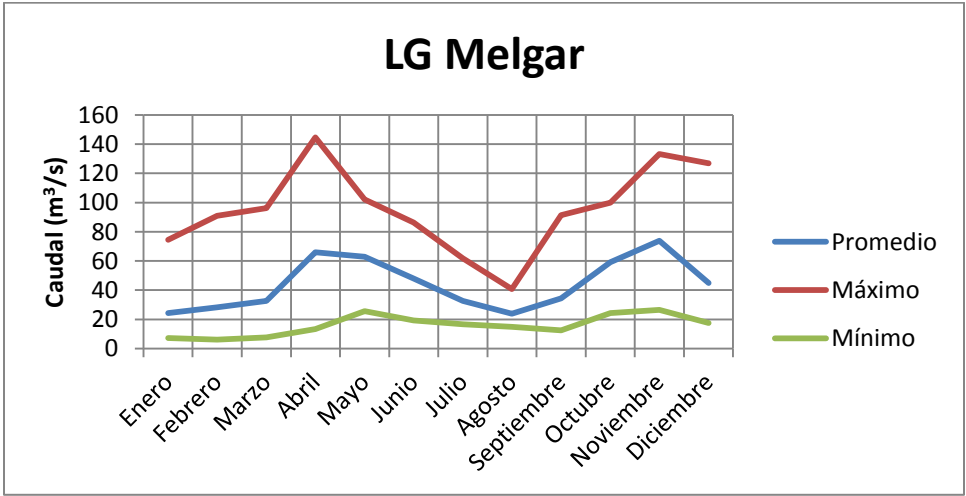
Gráfica 11. Régimen hidrológico, estación limnigráfica El profundo automática



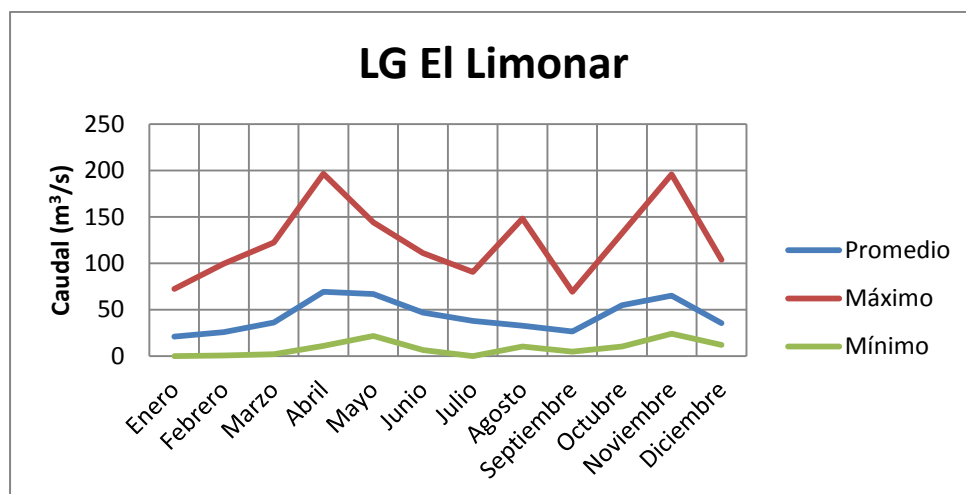
Gráfica 12. Régimen hidrológico, estación limnigráfica La Playa



Gráfica 13. Régimen hidrológico, estación limnimétrica Dos Mil



Gráfica 14. Régimen hidrológico, estación limnigráfica Melgar



Gráfica 15. Régimen hidrológico, estación limnigráfica El Limonar

En las gráficas anteriores es posible notar que, en general, para todas las estaciones pluviométricas y climatológicas analizadas se tiene un régimen bimodal con picos invernales entre los meses de Marzo y Mayo y Octubre y Diciembre. Igualmente, las precipitaciones medias máximas para todas las estaciones se encuentran en un rango entre 100mm/mes y 200mm/mes y las medias mínimas entre 0mm/mes y 100mm/mes. El máximo valor de precipitación registrado, considerando todas las estaciones, fue de, aproximadamente 1,000mm/mes y se presentó en el mes de Abril en la estación pluviométrica El Salero. En cuanto al mínimo valor de precipitación registrado, se tiene que este fue de 0mm/mes en las estaciones Base aérea Melgar (mes de Agosto), El Salero (Junio, Julio, Agosto y Septiembre) y Carmen de Apicalá (Julio y Agosto).

Respecto a las series de caudales, puede notarse que se presenta un comportamiento similar al de las gráficas de precipitación, con un leve rezago en el primer pico del año, en especial, en las estaciones El Profundo, La Playa y Dos Mil. En las estaciones antes mencionadas, el primer pico tiende a desplazarse un mes pasando a presentarse entre Abril y Junio. Igualmente, puede observarse que las estaciones El Limonar y Melgar son las que presentan los caudales mayores dado que, como puede revisarse en la Ilustración 7, son las estaciones que se encuentran más cerca a la desembocadura del río. Respecto al caudal mínimo registrado para el río en todas las series se tiene que este es de aproximadamente $0.5\text{m}^3/\text{s}$ en la estación Dos Mil en el mes de Febrero (nótese que este mes no corresponde a uno de los meses más secos respecto a precipitación). En cuanto al máximo, este se encuentra cercano a los $200\text{m}^3/\text{s}$ en la estación El Limonar en el mes de Abril (mes que sí coincide con la primera temporada de lluvias del área de estudio).

7.2. Cálculo de índices

Dada la extensión de los registros analizados se prefirió no presentar los valores de índices obtenidos para cada uno de los índices calculados. Sin embargo, se decidió

presentar la comparación realizada entre los periodos de sequía, obtenidos a partir de los diferentes índices, y los períodos de sequía, que según el IDEAM, se han presentado en la región Andina. A continuación se presentan los principales períodos de sequía que se encontraron, de acuerdo con los índices calculados, para cada una de las estaciones (se considera sequía más de 6 meses con valores de índices críticos):

Tabla 32. Periodos de sequía por índice en estaciones La Playa, Cabrera, Ospina Pérez y Carmen de Apicalá

	Porcentaje de normalidad	SPI				Deciles
		3 meses	6 meses	9 meses	12 meses	
<i>La Playa</i>	NOV/57-JUL/58 AGO/61-EN/62 OCT/64-MAR/65 FEB/69-AGO/69 NOV/69-ABR/70	EN/58-JUN/58 OCT/64-MAR/65	EN/58-JUN/58 JUL/61-DIC/61	JUL/57-DIC/58 ABR/61-DIC/61 EN/65-SEP/65	EN/58-DIC/58 EN/61-DIC/61	NOV/57-SEP/58
<i>Cabrera</i>	DIC/61-MAY/62 DIC/63-MAY/64 ABR/65-OCT/65 DIC/65-MAY/66 JUL/66-FEB/67 MAY/74-EN/75 SEP/80-ABR/81 MAY/83-NOV/83 NOV/86-JUN/87 NOV/87-MAY/88 EN/90-FEB/91 EN/92-JUN/92 MAY/93-OCT/93 ABR/94-MAR/95 JUN/00-ABR/01 ABR/09-SEP/09 ABR/12-DIC/12	EN/66-DIC/66 ABR/90-SEP/90 ABR/91-SEP/91 EN/92-JUN/92 JUL/93-DIC/93 ABR/97-DIC/97 EN/01-JUN/01	EN/65-JUN/65 EN/66-DIC/66 JUL/74-DIC/74 EN/87-JUN/87 EN/90-DIC/90 JUL/91-JUN/92 JUL/93-DIC/93 JUL/94-DIC/94 JUL/97-DIC/97 EN/01-JUN/01	EN/65-SEP/65 JUL/66-MAR/67 OCT/89-JUN/90 ABR/91-DIC/91 EN/92-SEP/92 ABR/97-DIC/97 EN/01-SEP/01	EN/66-DIC/66 EN/90-DIC/90 EN/91-DIC/91 EN/92-DIC/92 EN/97-DIC/97 EN/01-DIC/01	DIC/65-MAY/66 JUL/66-FEB/67 OCT/89-MAR/90 DIC/91-OCT/92
<i>Ospina Pérez</i>	SEP/72-JUL/73 SEP/80-MAY/81 MAY/90-OCT/90 OCT/91-ABR/92 EN/93-DIC/93 MAY/95-DIC/95 SEP/97-ABR/98 MAR/01-AGO/01 AGO/02-FEB/03 ABR/03-SEP/03 FEB/05-JUL/05 DIC/06-MAY/07 JUL/09-MAR/10 FEB/12-SEP/12	OCT/72-MAR/73 OCT/80-MAR/81 OCT/91-JUN/92 ABR/03-SEP/03	JUL/72-JUN/73 JUL/80-DIC/80 JUL/91-JUN/92 EN/93-JUN/93 JUL/95-DIC/95 JUL/97-DIC/97 EN/01-JUN/01 JUL/02-JUN/03 EN/04-JUN/04 EN/05-JUN/05 JUL/09-DIC/09 JUL/12-DIC/12	OCT/72-JUN/73 ABR/74-DIC/74 JUL/91-MAR/92 EN/93-SEP/93 JUL/97-MAR/98 OCT/02-JUN/03 EN/05-SEP/05 JUL/09-MAR/10	EN/73-DIC/73 EN/88-DIC/88 EN/92-DIC/93 EN/95-DIC/95 EN/97-DIC/97 EN/01-DIC/01 EN/09-DIC/09	JUL/80-ABR/81 OCT/91-ABR/92 JUN/97-MAR/98 AGO/02-FEB/03
<i>Carmen de Apicalá</i>	SEP/72-FEB/73 JUN/76-NOV/76 FEB/80-AGO/80 JUN/83-NOV/83 OCT/84-JUL/85 MAR/91-AGO/91 DIC/94-MAY/95 JUL/97-MAR/98 ABR/09-NOV/09 FEB/12-EN/13	OCT/72-MAR/73 EN/77-JUN/77 OCT/84-JUN/85 JUL/97-MAR/98 ABR/12-DIC/12	JUL/76-JUN/77 EN/80-JUN/80 EN/85-JUN/85 JUL/86-DIC/86 EN/92-JUN/92 EN/95-JUN/95 JUL/96-DIC/96 JUL/97-DIC/97 JUL/09-DIC/09 EN/12-DIC/12	OCT/72-JUN/73 JUL/76-MAR/77 OCT/84-JUN/85 ABR/86-DIC/86 ABR/89-SEP/90 JUL/97-MAR/98	EN/77-DIC/77 EN/85-DIC/85 EN/95-DIC/95 EN/97-DIC/97 EN/12-DIC/12	JUL/97-MAR/98 JUN/09-NOV/09

Tabla 33. Periodos de sequía por índice en estaciones El salero, Peñas Blancas (PM) y Hacienda La Granja,

	Porcentaje de normalidad	SPI				Deciles
		3 meses	6 meses	9 meses	12 meses	
<i>El salero</i>	DIC/72-MAY/73 JUN/76-JUN/77 ABR/78-EN/79 MAY/83-NOV/83 EN/85-JUL/85 ABR/86-SEP/86 DIC/86-SEP/87 NOV/87-JUL/88 ABR/90-SEP/90 EN/95-JUN/95 AGO/95-AGO/96 EN/97-MAR/98 MAY/98-NOV/98 MAR/99-JUL/99 NOV/99-NOV/01 JUL/03-SEP/05	JUL/76-DIC/76 OCT/87-JUN/88 JUL/97-MAR/98 EN/00-JUN/00	JUL/76-DIC/76 EN/87-JUN/88 EN/95-JUN/95 JUL/97-DIC/97 EN/00-JUN/00 EN/01-JUN/01 JUL/03-JUN/04	EN/87-JUN/88 JUL/97-MAR/98 OCT/99-JUN/00 ABR/01-DIC/01 JUL/03-MAR/04 EN/05-SEP/05	EN/87-DIC/87 EN/95-DIC/95 EN/97-DIC/97 EN/98-DIC/98 EN/00-DIC/00 EN/01-DIC/01 EN/04-DIC/04	MAY/72-OCT/72 ABR/86-SEP/86 MAY/95-FEB/96 MAY/97-MAR/98 NOV/99-SEP/00 JUN/02-NOV/02
<i>Peñas Blancas PM</i>	MAY/83-NOV/83 DIC/84-JUN/85 NOV/85-AGO/86		EN/85-JUN/85 EN/86-DIC/86	JUL/85-DIC/86	EN/86-DIC/86	NOV/85-SEP/86
<i>Hacienda La Granja</i>	MAY/83-ABR/84 NOV/86-ABR/87 OCT/87-MAR/88 EN/92-JUN/92 DIC/94-MAY/95 JUL/97-ABR/98 DIC/99-JUN/00 MAY/02-FEB/03 JUL/09-EN/10	OCT/87-MAR/88 EN/92-JUN/92 EN/95-JUN/95 ABR/97-DIC/97	JUL/86-JUN/88 EN/92-JUN/92 EN/95-JUN/95 JUL/97-DIC/97 EN/00-JUN/00 JUL/02-DIC/02 JUL/09-DIC/09	OCT/86-MAR/88 EN/92-SEP/92 ABR/97-DIC/97 ABR/00-DIC/00	EN/87-DIC/87 EN/92-DIC/92 EN/97-DIC/97 EN/00-DIC/00	MAY/92-OCT/92 ABR/97-OCT/97

Tabla 34. Periodos de sequía por índices en estación CO Pandi

	Porcentaje de normalidad	PDSI	PHDI	Z
<i>Pandi CO</i>	DIC/72-MAY/73 NOV/76-MAY/77 MAY/83-NOV/83 SEP/86-FEB/87 ABR/89-SEP/89 ABR/90-OCT/90 OCT/91-AGO/92 JUL/97-ABR/98 DIC/06-MAY/07 ABR/09-OCT/09 EN/12-JUL/12	MAR/70-SEP/70 DIC/72-JUL/73 MAY/74-EN/75 NOV/76-FEB/78 MAR/80-EN/81 JUN/82-NOV/82 MAY/83-NOV/83 OCT/84-JUL/85 ABR/89-NOV/89 ABR/90-SEP/90 DIC/91-OCT/92 FEB/97-ABR/98 OCT/00-NOV/01 OCT/02-AGO/04 EN/07-JUL/07 JUL/09-MAR/10 ABR/12-DIC/12	MAR/70-SEP/70 DIC/72-NOV/73 JUL/74-JUN/75 EN/77-JUN/78 DIC/78-JUN/79 ABR/80-ABR/81 MAY/83-DIC/83 FEB/85-AGO/85 OCT/86-AGO/87 NOV/87-MAY/88 ABR/90-FEB/91 EN/92-AGO/93 MAY/97-NOV/98 NOV/00-MAR/02 NOV/02-OCT/04 EN/07-JUL/07 AGO/09-MAR/10 JUN/12-DIC/12	FEB/70-SEP/70 DIC/72-JUL/73 FEB/74-AGO/74 NOV/76-MAY/77 JUL/86-FEB/87 OCT/87-MAR/88 ABR/90-SEP/90 DIC/91-AGO/92 JUL/97-ABR/98 AGO/02-EN/03

Tabla 35. Periodos de sequía por índice en estaciones Base aérea Melgar y Peñas Blancas (CO)

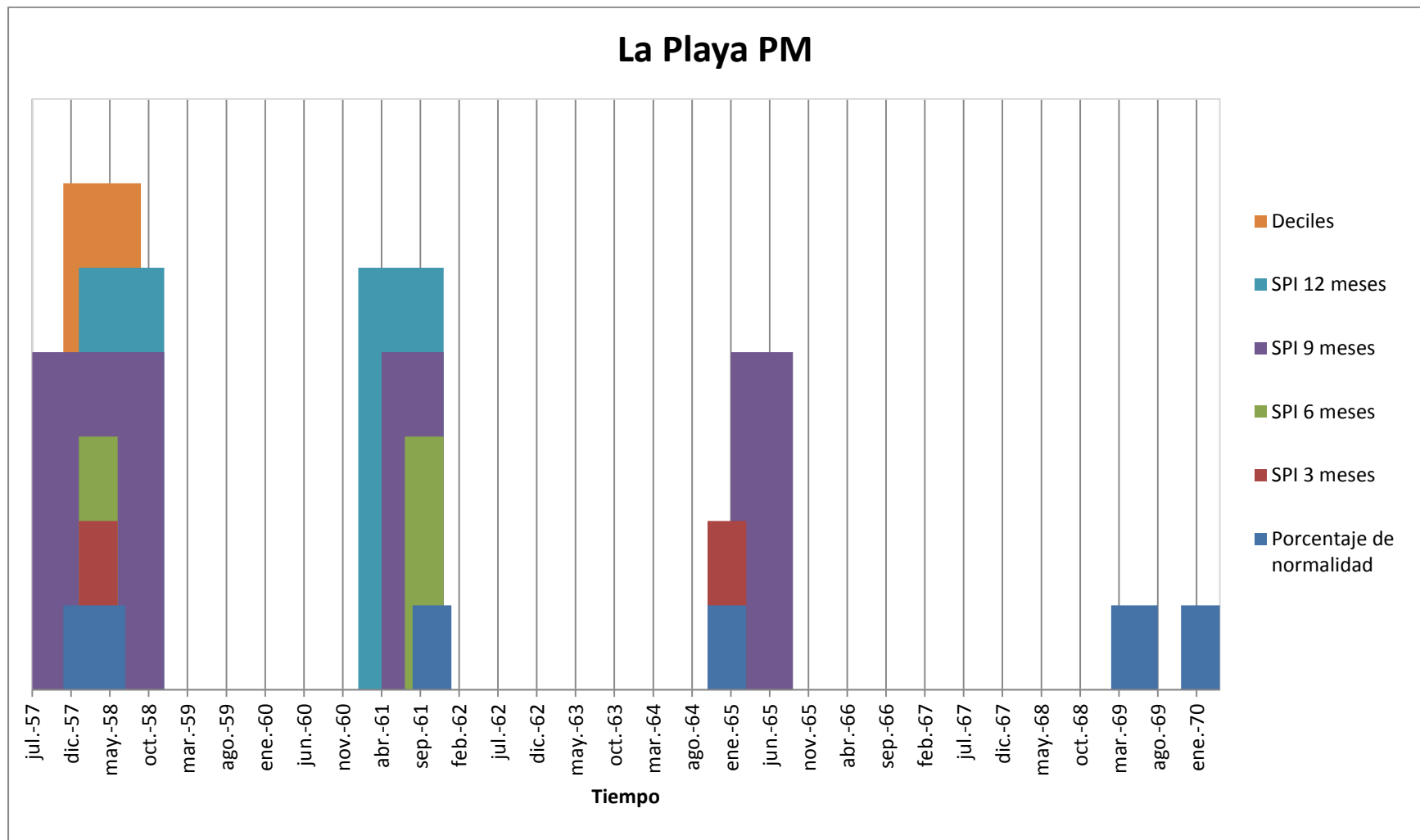
	Porcentaje de normalidad	PDSI	PHDI	Z
Base aérea de Melgar CO	EN/76-JUN/76 NOV/76-JUN/77 MAR/90-SEP/90 EN/92-JUN/92 FEB/93-OCT/93 NOV/96-MAY/97 JUL/97-EN/98 MAR/98-AGO/98	ABR/96-AGO/98 ABR/01-FEB/02 OCT/03-SEP/05	ABR/96-DIC/98 MAY/01-ABR/02 DIC/03-SEP/05	MAR/96-SEP/96 NOV/96-MAR/97 JUL/97-EN/98 MAR/98-AGO/98
Peñas Blancas CO	AGO/87-MAY/88 OCT/89-MAR/90 MAY/90-JUL/91 DIC/91-JUL/92 OCT/00-ABR/01 SEP/05-FEB/06 SEP/07-FEB/08 ABR/09-SEP/09	MAR/87-MAY/88 OCT/89-MAR/90 MAY/90-EN/93 JUL/97-ABR/98 DIC/00-FEB/02 NOV/04-AGO/04 EN/05-MAY/07 JUL/09-MAY/10	MAR/87-OCT/88 MAY/90-ABR/93 JUL/93-FEB/94 AGO/97-SEP/98 DIC/00-MAY/02 NOV/04-OCT/04 FEB/05-ABR/08	AGO/87-MAY/88 OCT/89-MAR/90 MAY/90-JUN/91 DIC/91-JUL/92 JUN/93-NOV/93 OCT/00-AGO/01 DIC/04-JUN/05 AGO/05-FEB/06

Tabla 36. Periodos de sequía por índice en estaciones Pandi, Base aérea Melgar y Peñas Blancas (CO)

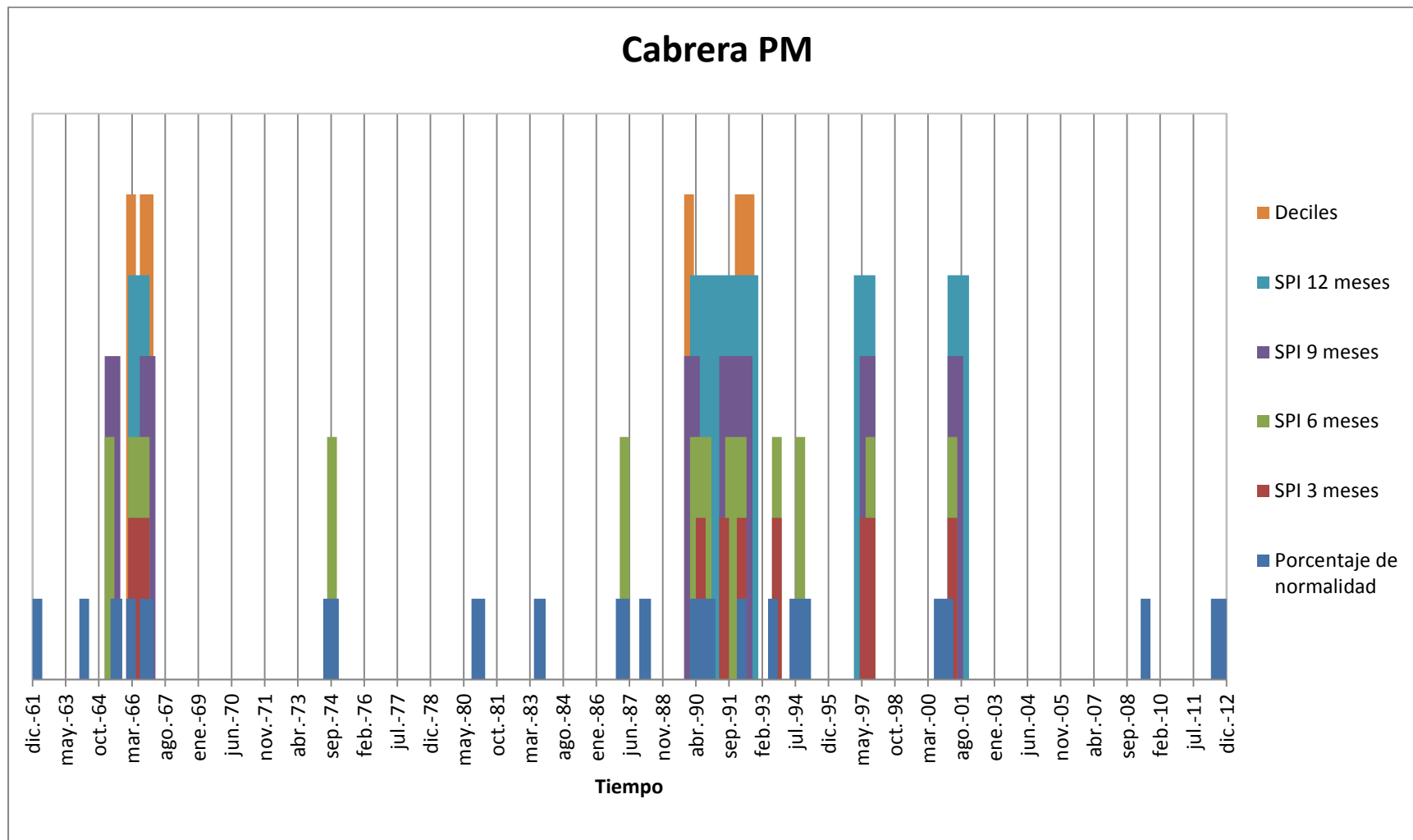
	SPI				Deciles
	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses	
Pandi CO	EN/73-JUN/73 JUL/97-DIC/97 JUL/09-MAR/10	EN/73-JUN/73 EN/77-DIC/77 JUL/86-DIC/86 EN/92-JUN/92 JUL/97-DIC/97 JUL/00-DIC/00 JUL/02-DIC/02 EN/07-JUN/07 JUL/09-DIC/09 EN/12-JUN/12	EN/70-SEP/70 EN/73-SEP/73 JUL/77-MAR/78 JUL/86-MAR/87 ABR/90-DIC/90 OCT/91-JUN/92 OCT/97-JUN/98 OCT/00-JUN/01 OCT/09-JUN/10 EN/12-SEP/12	EN/77-DIC/77 EN/92-DIC/92 EN/09-DIC/09 EN/12-DIC/12	ABR/90-SEP/90 ABR/12-SEP/12
Base aérea de Melgar CO	OCT/76-JUN/77 EN/91-JUN/91 EN/97-DIC/97	EN/76-JUN/76 EN/77-JUN/77 EN/91-DIC/91 JUL/92-DIC/92 EN/97-DIC/97	EN/77-SEP/77 JUL/91-DIC/92 OCT/96-MAR/98 JUL/03-MAR/04	EN/76-DIC/76 EN/91-DIC/91 EN/92-DIC/92 EN/97-DIC/97	NOV/76-ABR/77 EN/91-NOV/91 JUN/92-DIC/92 DIC/96-MAY/97
Peñas Blancas CO	OCT/87-MAR/88 JUL/90-DIC/90 EN/92-JUN/92	EN/87-JUN/88 JUL/90-DIC/90 EN/92-JUN/92 JUL/93-DIC/93 JUL/97-DIC/97 EN/01-JUN/01 EN/04-JUN/04 EN/05-DIC/05	EN/87-JUN/88 EN/90-JUN/91 JUL/03-MAR/04 EN/05-SEP/05	EN/87-DIC/87 EN/90-DIC/90 EN/92-DIC/92 EN/01-DIC/01 EN/05-DIC/05	JUN/93-NOV/93

De acuerdo con los resultados anteriores, es posible notar que para los mismos registros de precipitación los índices generan resultados diversos. Sin embargo, es posible encontrar periodos que se repiten para todos, o la mayoría, de los índices analizados. Igualmente, puede observarse la tendencia de los índices a mostrar periodos de sequía en años de Niño, como 1997, 1994-1995, 1991-1992 y 1982. A continuación se presenta una

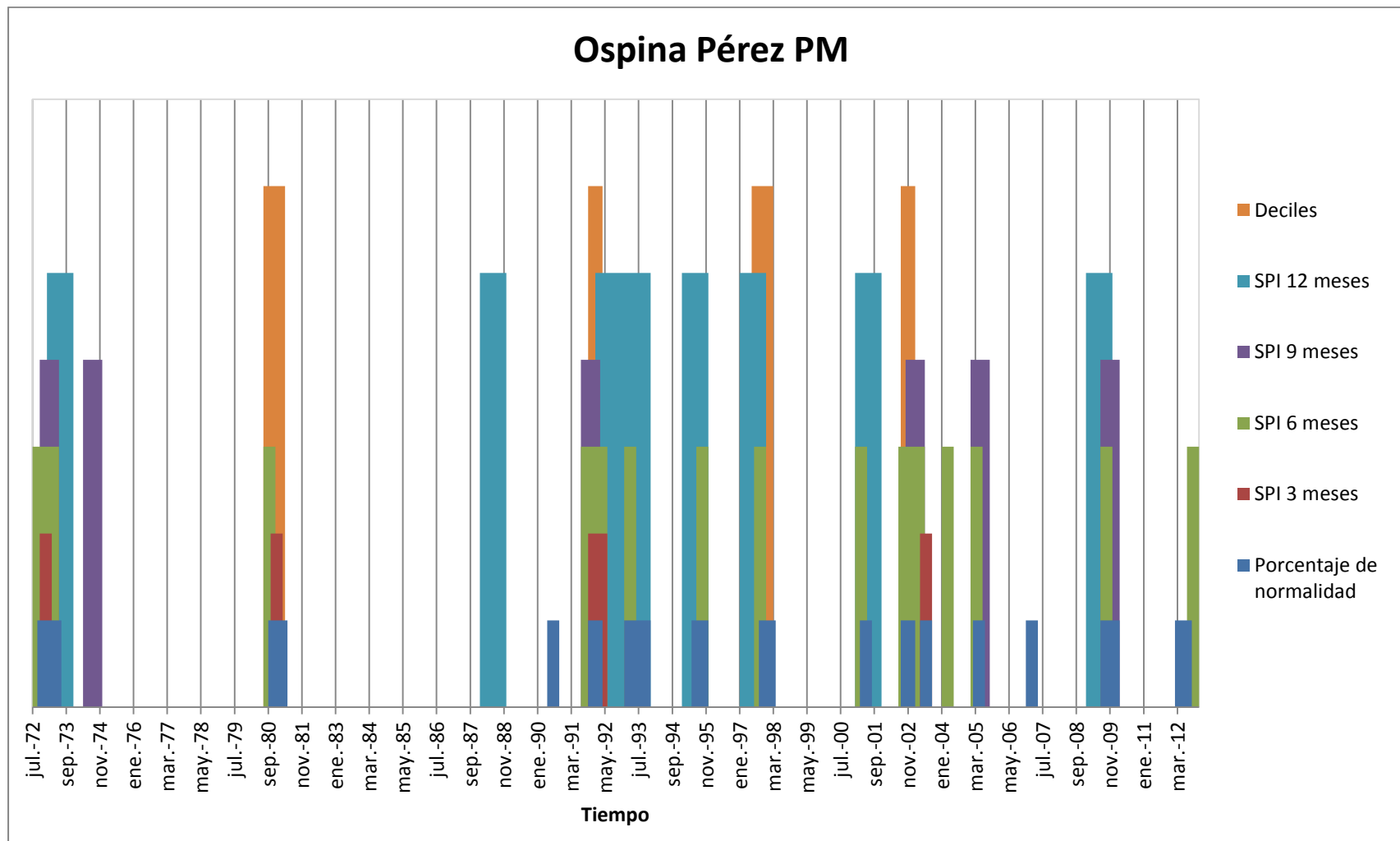
gráfica, por estación pluviométrica y climatológica analizada, con el periodo de registro y los eventos de sequía identificados a partir de los índices calculados. Estas gráficas permiten definir la coincidencia de los diferentes índices en la determinación de periodos de sequía así como la frecuencia de ocurrencia de las mismas a lo largo de los registros de cada estación. De esta forma se tiene:



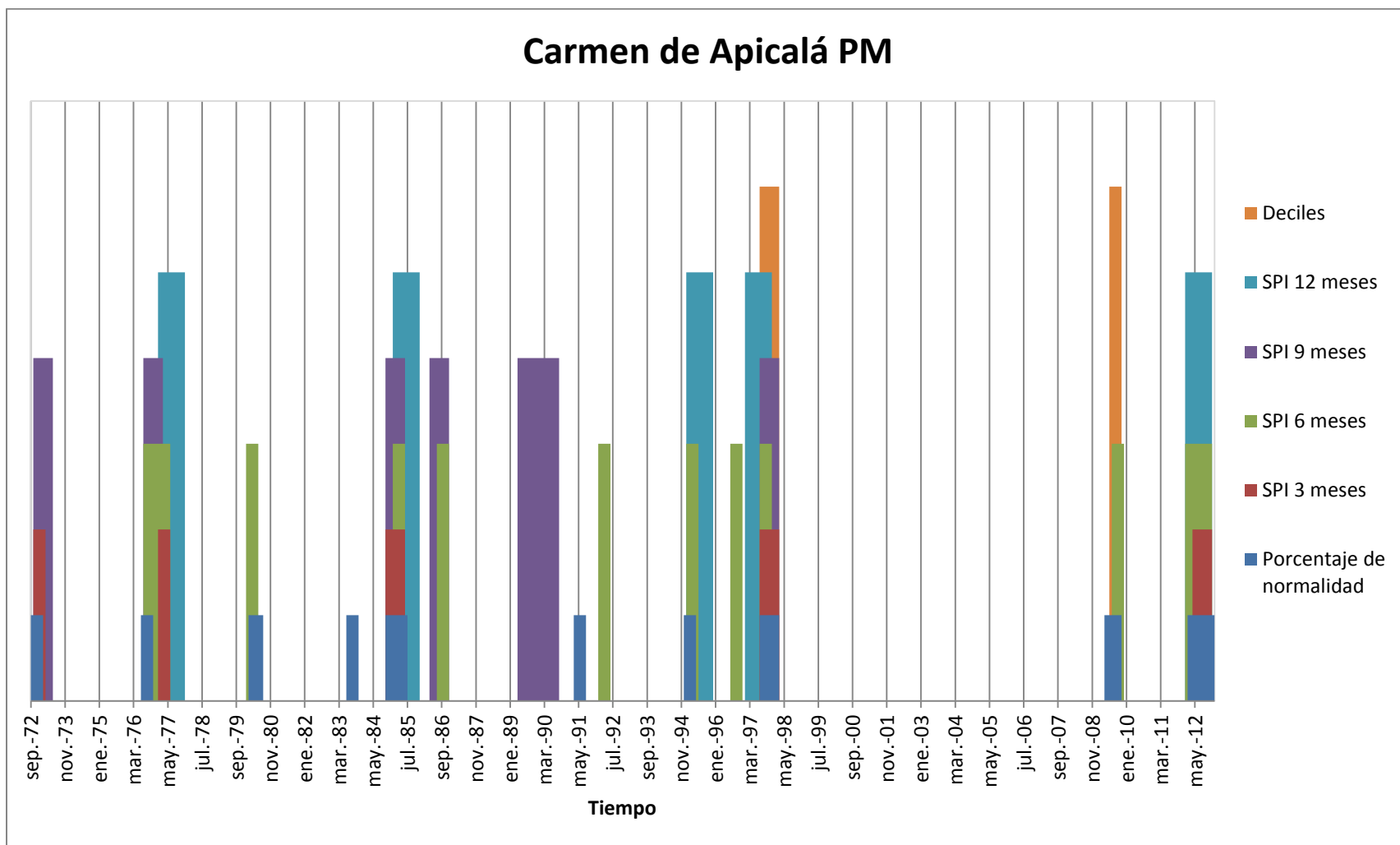
Gráfica 16. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación La Playa



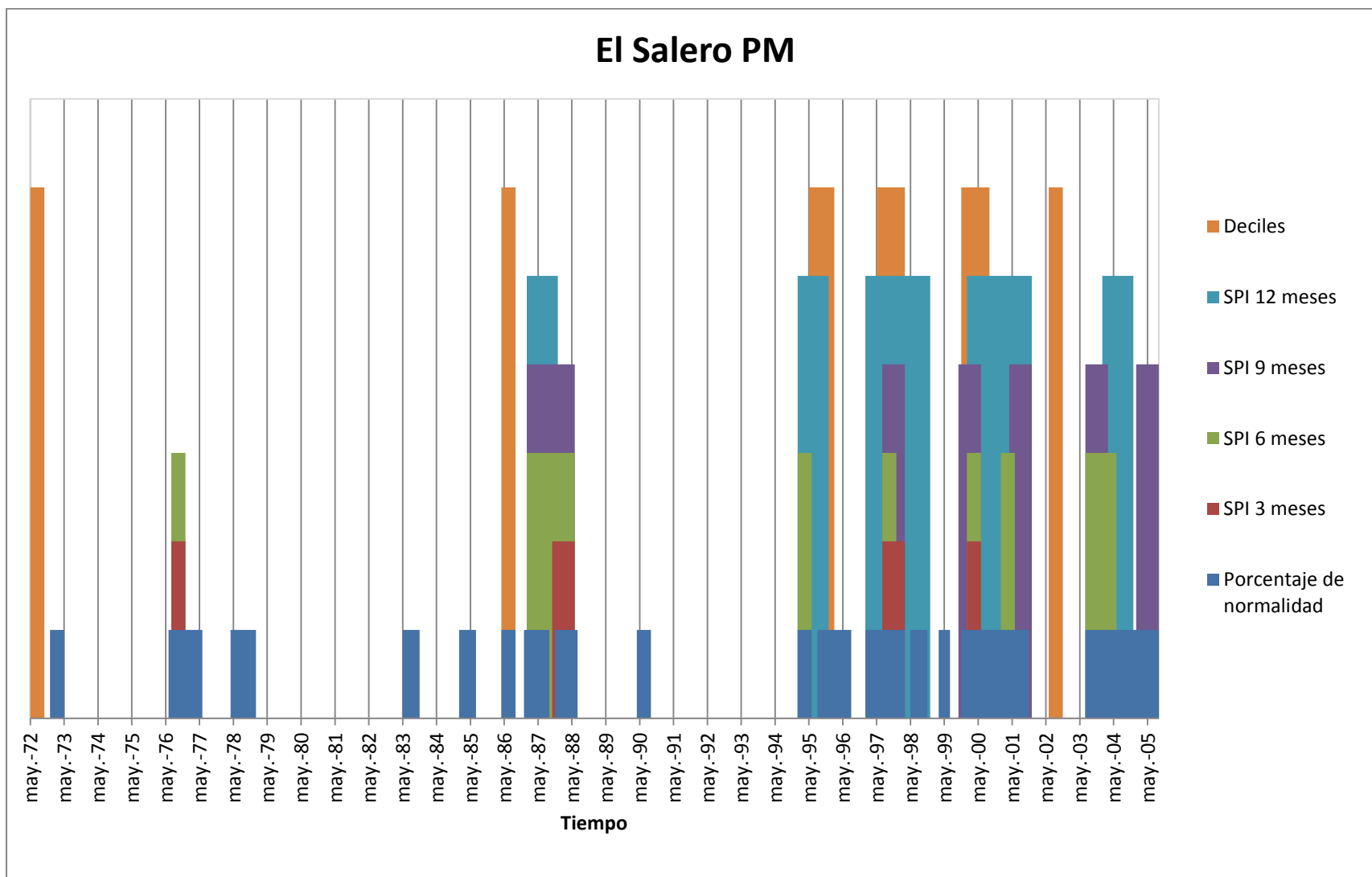
Gráfica 17. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Cabrera



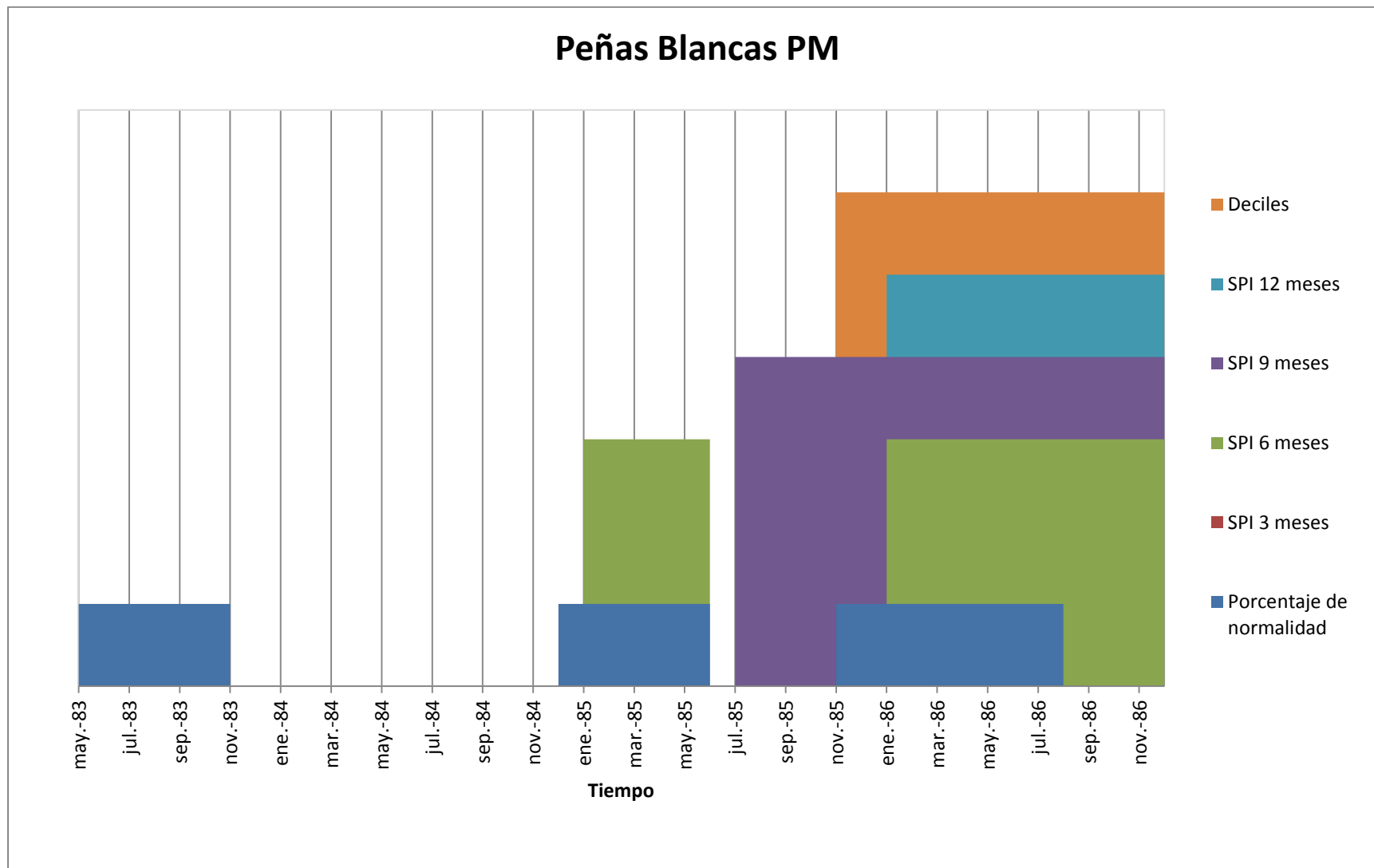
Gráfica 18. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Ospina Pérez



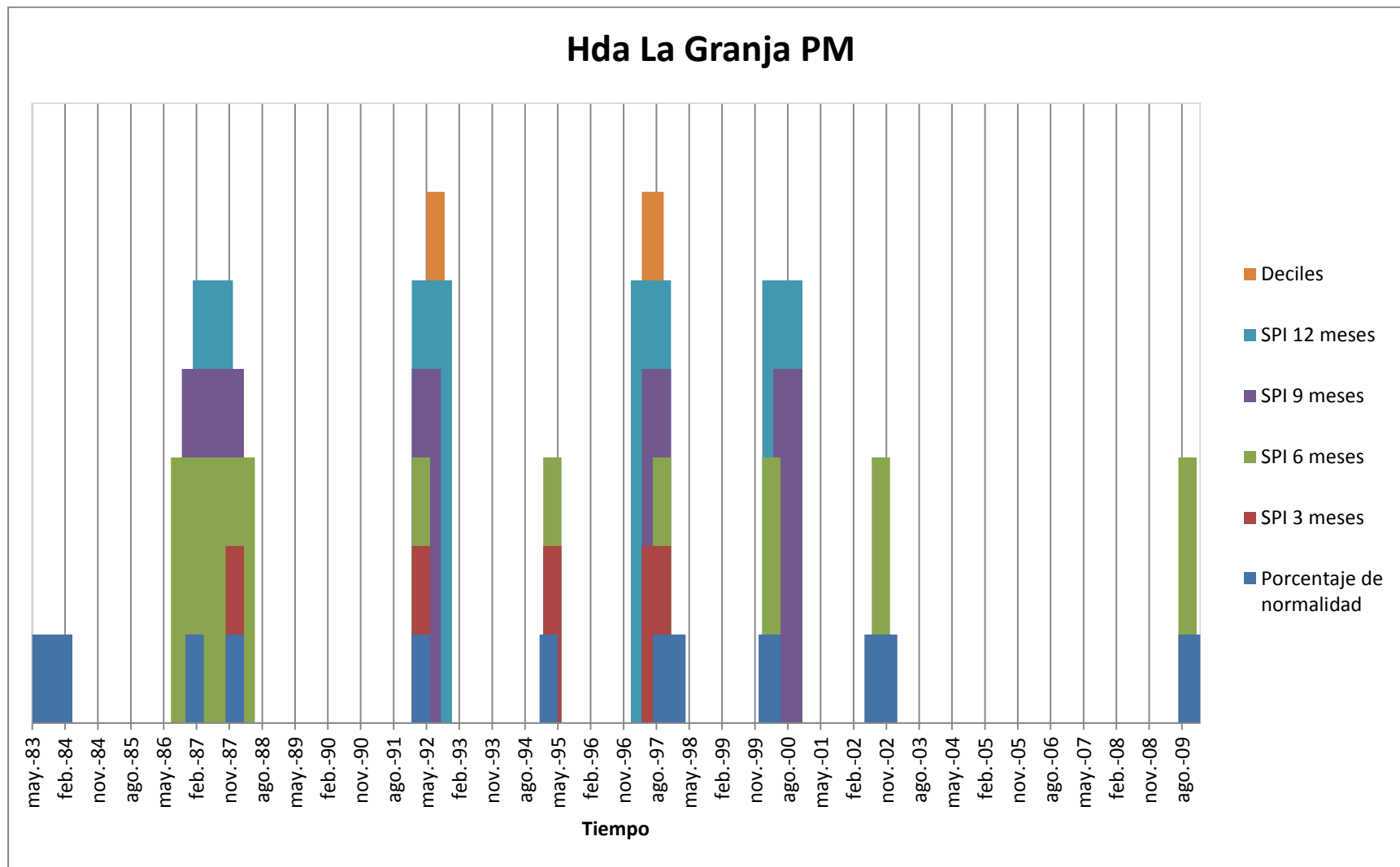
Gráfica 19. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Carmen de Apicalá



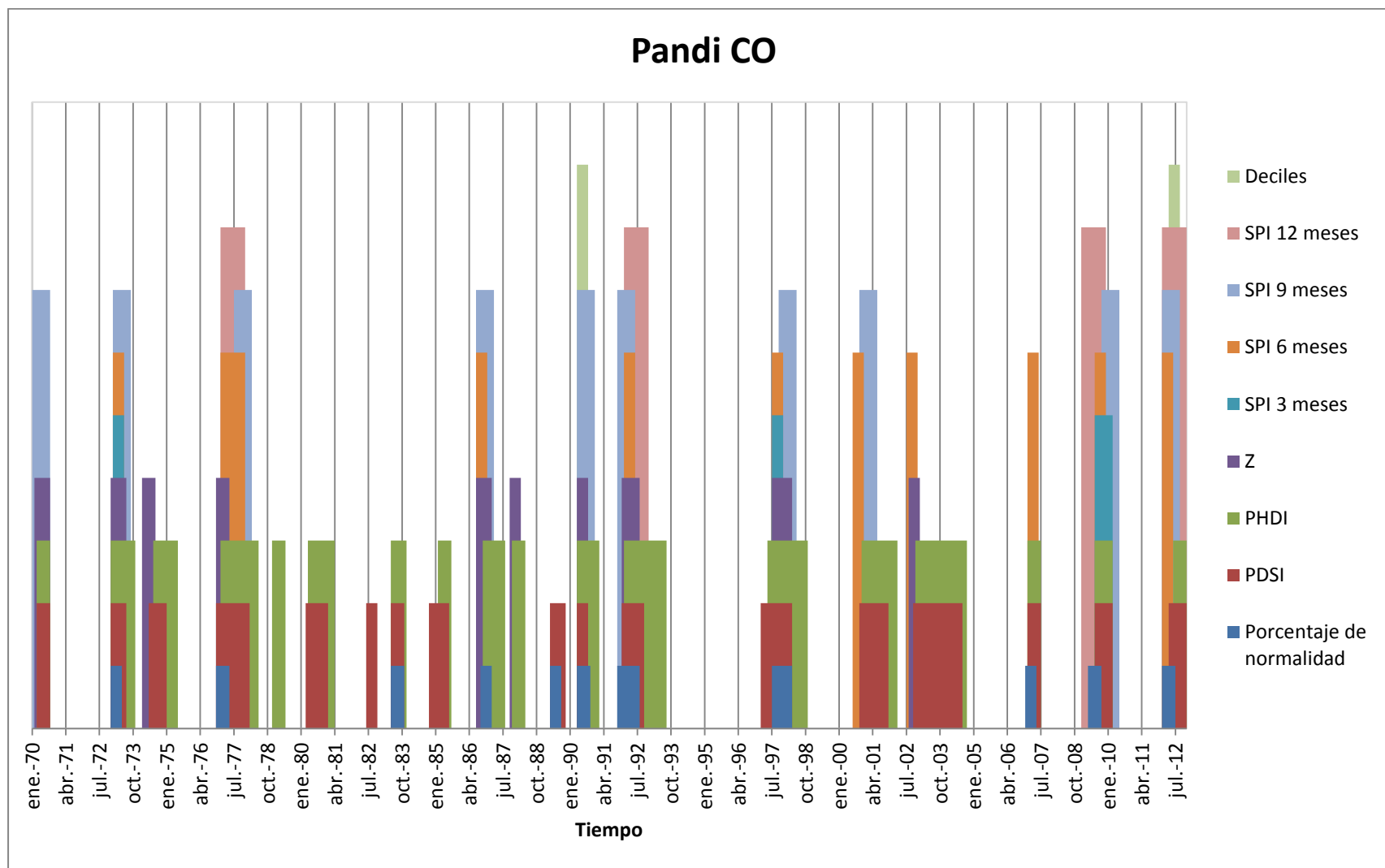
Gráfica 20. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación El Salero



Gráfica 21. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Peñas Blancas (pluviométrica)

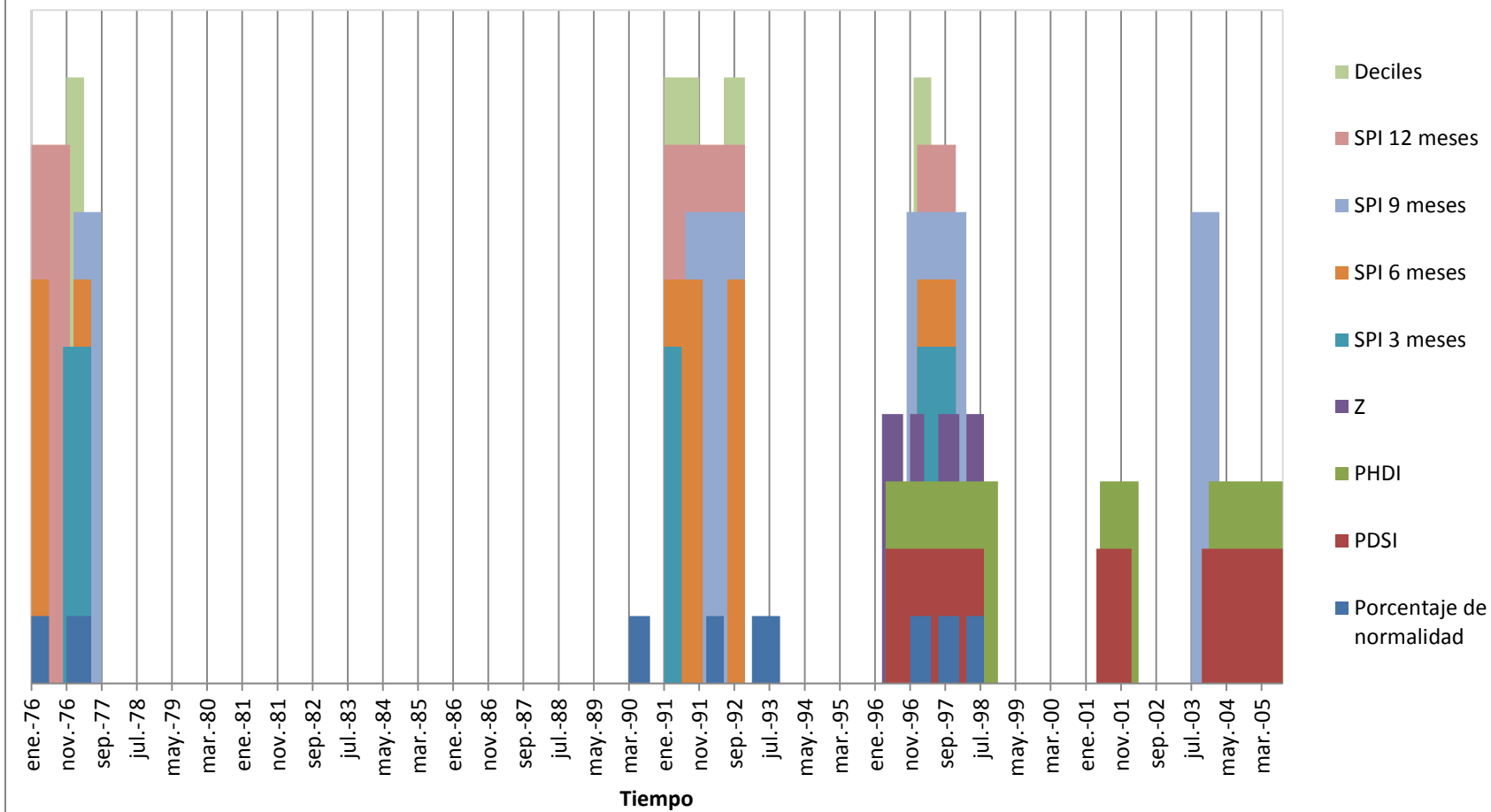


Gráfica 22. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Hacienda La Granja

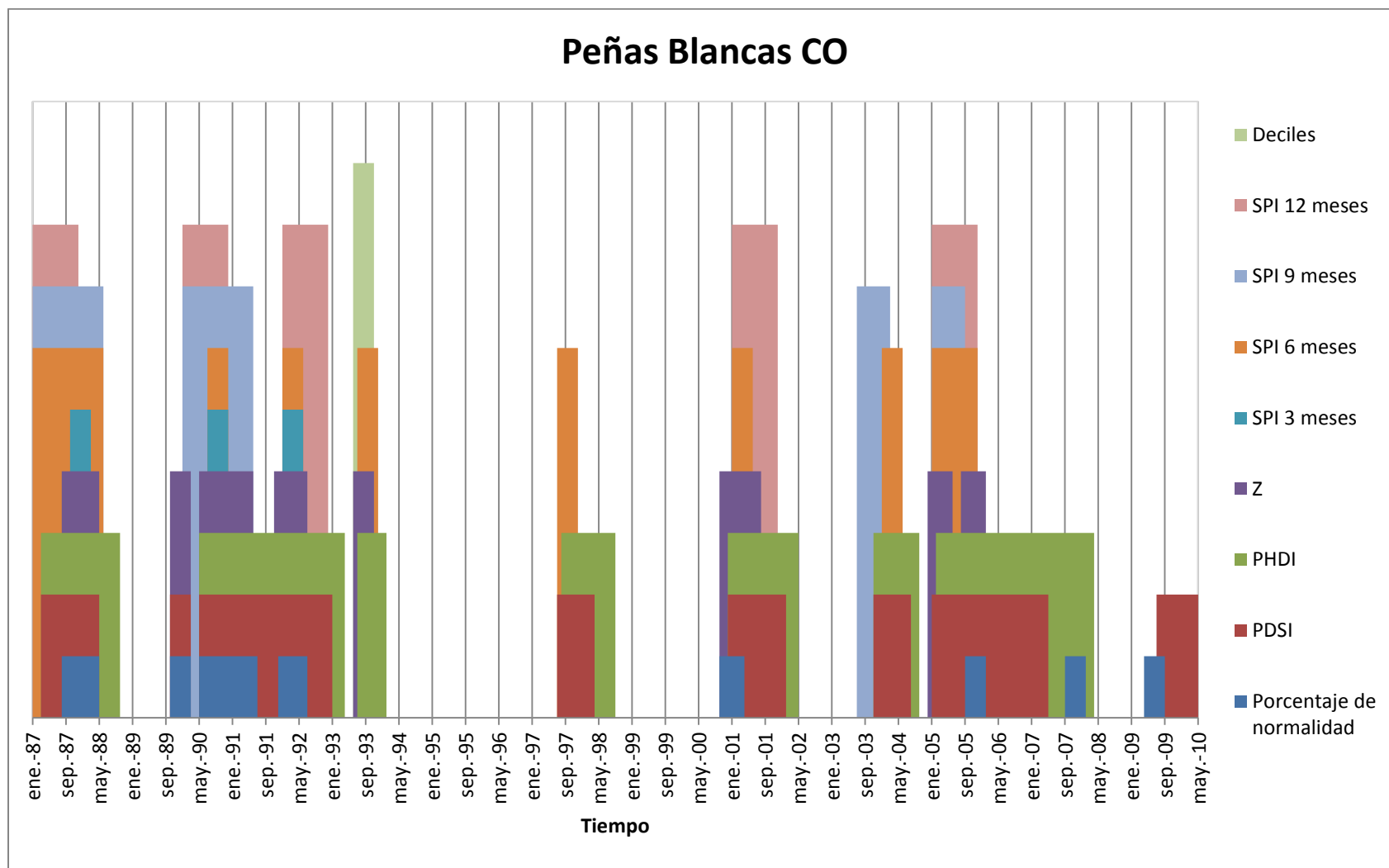


Gráfica 23. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Pandi

Base aérea Melgar CO



Gráfica 24. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Base aérea Melgar



Gráfica 25. Eventos de sequía identificados mediante índices analizados, estación Peñas Blancas (climatológica ordinaria)

En las gráficas anteriores, es posible notar que, en general, los índices analizados son consistentes en la identificación de eventos de sequía dado que se presenta la superposición de barras en varios periodos de tiempo. Igualmente, en las estaciones con series de tiempo más cortas, los índices obtenidos presentan mayor relación entre sí, tal como puede observarse en las gráficas correspondientes a las estaciones La Playa y Hacienda La Granja, en donde hay mayor coincidencia entre los periodos de tiempo en los que se presentaron eventos mediante diferentes índices.

De igual manera, en las gráficas anteriores puede identificarse la tendencia que tiene el índice de porcentaje de normalidad a catalogar un mayor número de eventos como sequías frente a otros índices analizados. Lo anterior puede deberse, a que este índice responde a ligeros cambios en la precipitación lo cuales toman más tiempo en ser evidenciados por otros índices. Por otro lado, es posible notar que índices, como el PHDI, muestran eventos de sequía de duración más prolongada que los identificados por medio de otros índices (por ejemplo porcentaje de normalidad). Esto último podría ser causado por el hecho de que el PHDI identifica, en general, sequías hidrológicas que, como se mencionó anteriormente, tienden a ser más extendidas y responder más lentamente a cambios en la precipitación. Finalmente, respecto a la frecuencia de ocurrencia de eventos de sequía en la región estudiada, se puede observar que no existe una tendencia clara en las gráficas que permita suponer que la frecuencia se ha mantenido o variado en el tiempo.

Por otro lado, al comparar los periodos de sequía obtenidos a través de los índices calculados con los registrados para la región Andina por el IDEAM se tiene:

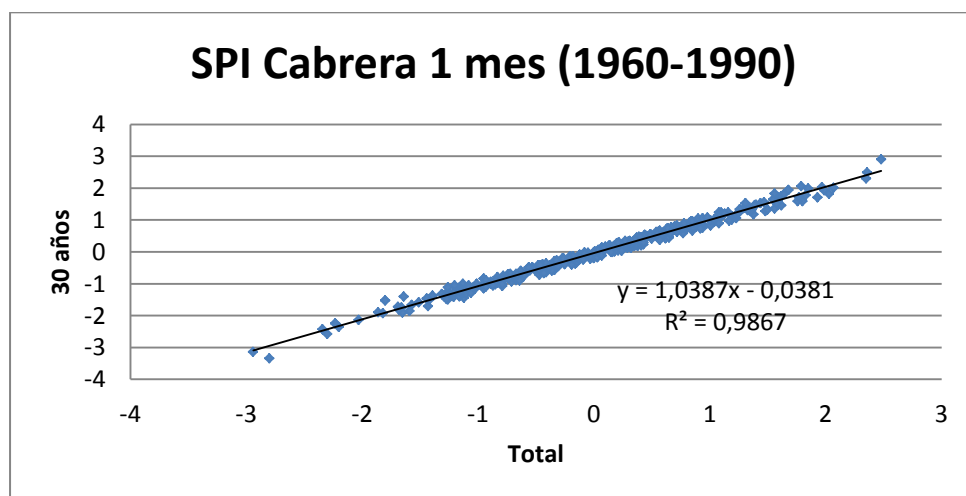
- En las estaciones con registro más antiguos (Cabrera y La Playa) se obtuvieron periodos de sequía entre 1964 y 1965. De acuerdo con lo indicado por el IDEAM, en ese intervalo de tiempo se presentó una de las sequías más importantes para la región por lo que se puede decir que los valores obtenidos son consistentes.
- En las estaciones de Ospina Pérez, Carmen de Apicalá, El Salero y Pandi, es posible observar que se obtuvieron índices que indican sequía entre 1972 y 1973; periodo en el que, según el IDEAM, se presentó una sequía extendida en la región.
- En las estaciones Carmen de Apicalá, El Salero, Pandi y Base aérea de Melgar, se obtuvieron valores que indican sequía entre 1976 y 1977 y, según los registros, en ese periodo se tuvo un evento de sequía importante en la zona Andina.
- Puede observarse que, en la mayoría de las estaciones analizadas se obtuvieron periodos secos cerca al año 1997. Este hecho puede deberse a la presencia del fenómeno del Niño; pero, adicionalmente, el IDEAM lo registro como un evento de sequía en la región Andina en el segundo semestre del año.

Finalmente, vale la pena mencionar que no se incluyó la escala temporal de 1 mes, en los valores obtenidos de SPI, porque para ninguna de las estaciones se encontró que el SPI indicara sequía para 6 meses consecutivos en ese análisis.

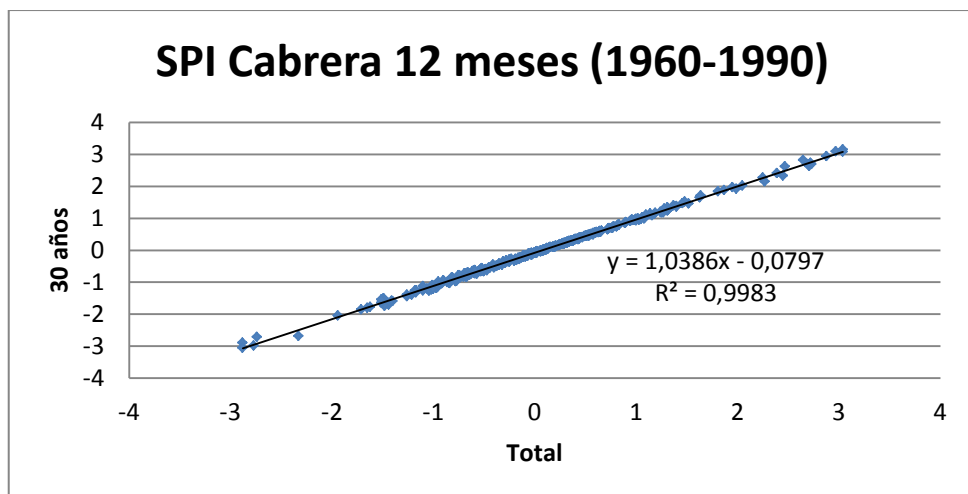
7.3. Comparación

7.3.1. Variaciones en longitud de series consideradas

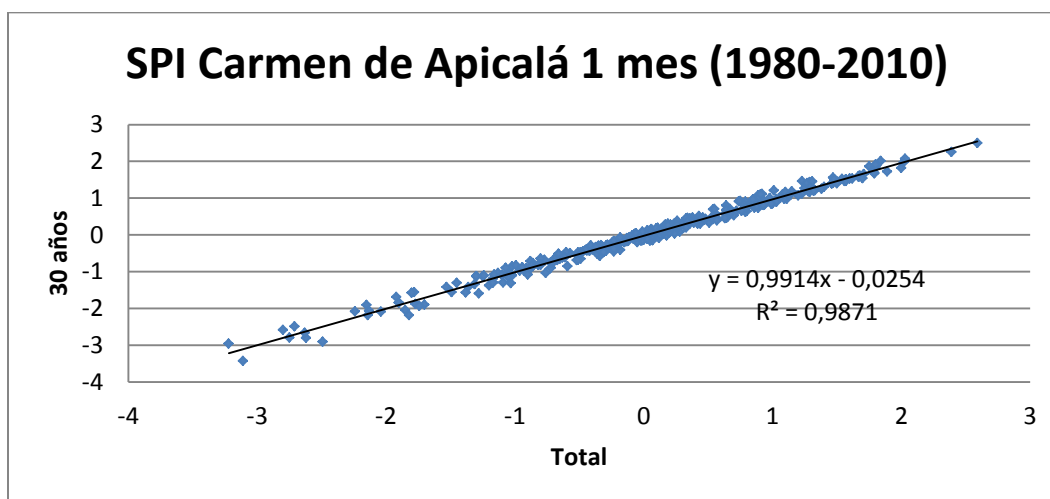
Como se explicó en Metodología, este procedimiento se llevó a cabo para los índices Estandarizado de Precipitación y de Palmer. A continuación, se presentan gráficas en la que es posible observar la correlación que se tiene entre los valores de índices obtenidos al emplear el registro completo y empleando sólo 30 años del mismo. Dado que, en el caso del SPI se observó una tendencia similar para todas las escalas temporales (1, 3, 6, 9 y 12 meses) se decidió sólo presentar las gráficas correspondientes a 1 y 12 meses para cada estación en un intervalo estándar de análisis. En el caso de los índices de Palmer se presentan, únicamente, las gráficas correspondientes a la estación Pandi ya que, esta es la única estación climatológica con un registro de más de 30 años. De acuerdo con lo anterior se tiene:



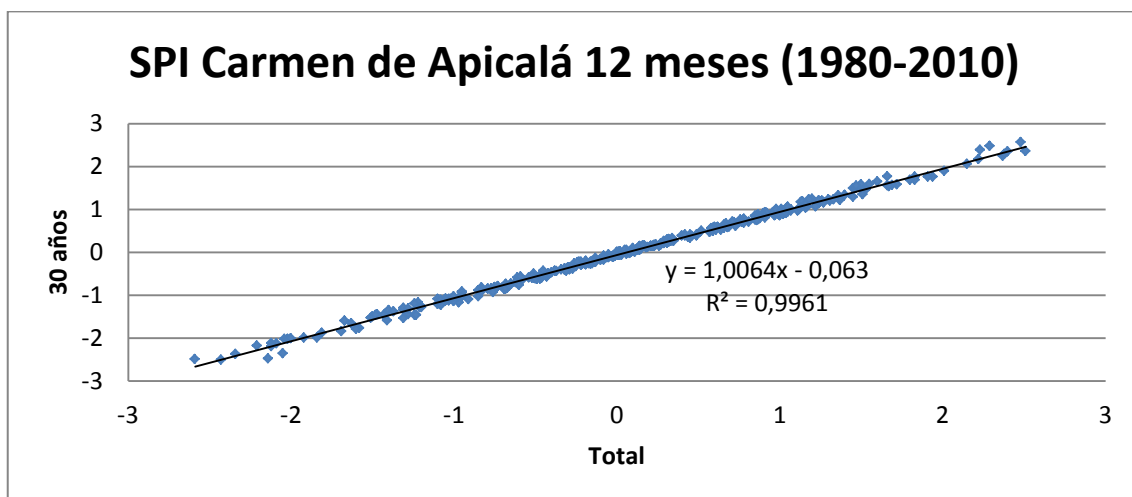
Gráfica 26. Comparación SPI 1 mes, estación Cabrera (1960-1990)



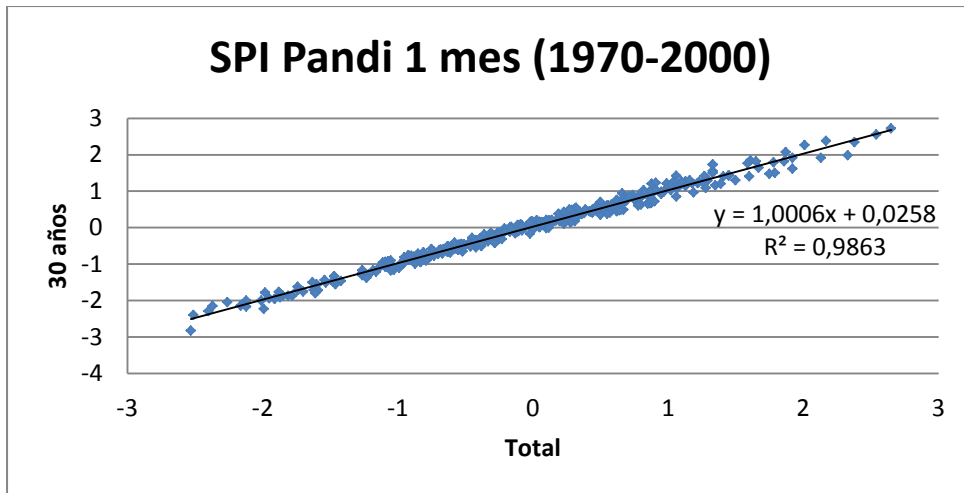
Gráfica 27. Comparación SPI 12 meses, estación Cabrera (1960-1990)



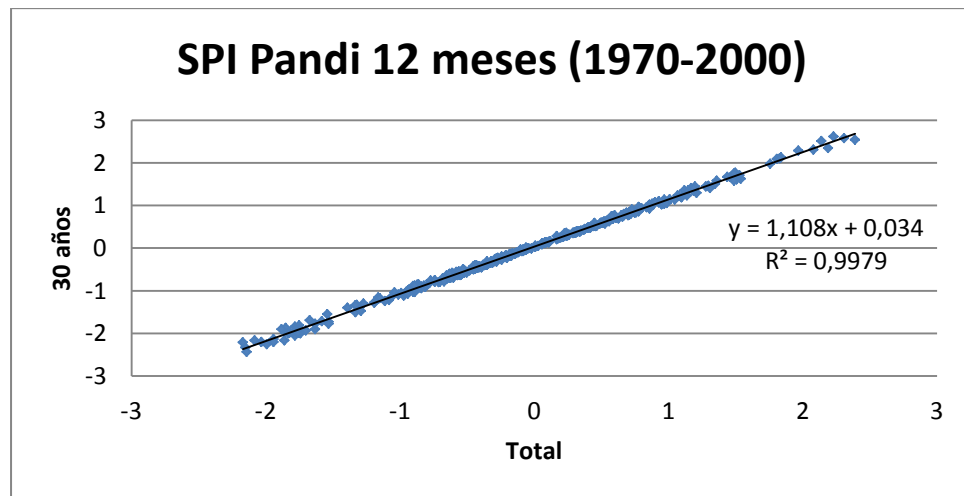
Gráfica 28 . Comparación SPI 1 mes, estación Carmen de Apicalá (1980-2010)



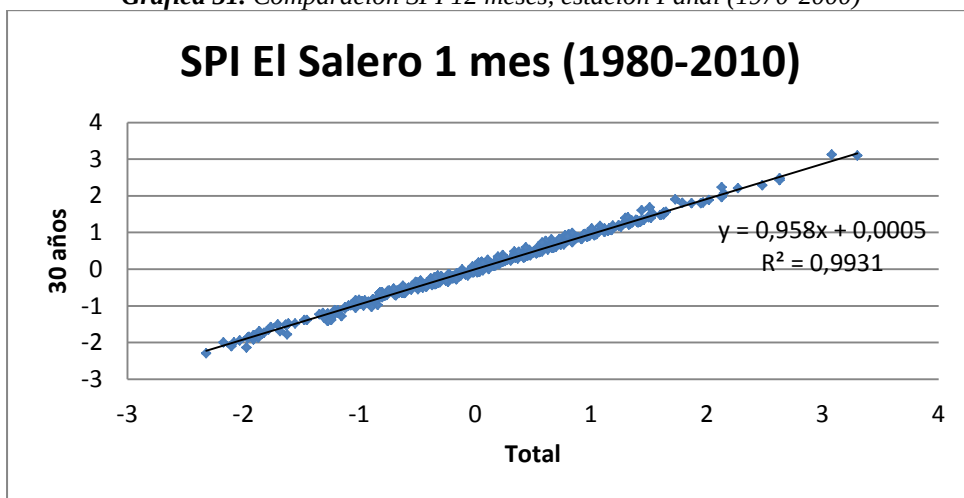
Gráfica 29. Comparación SPI 12 meses, estación Carmen de Apicalá (1980-2010)



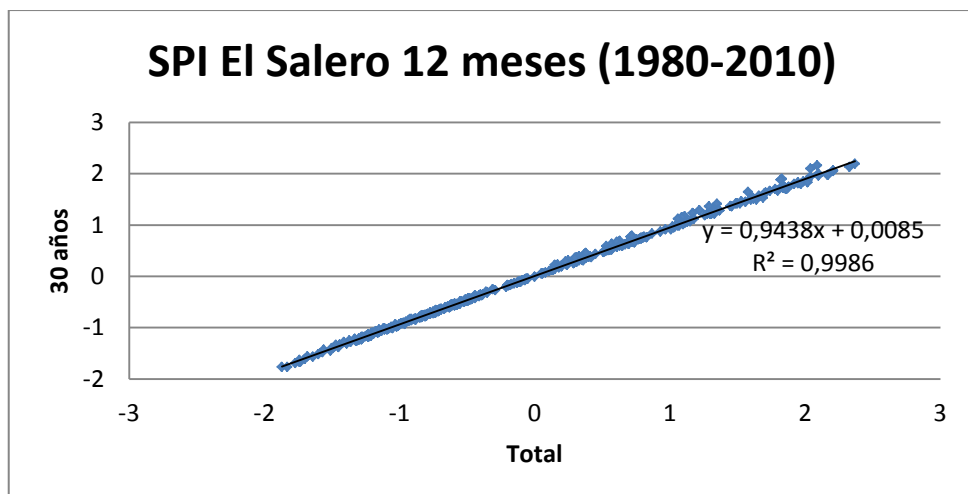
Gráfica 30. Comparación SPI 1 mes, estación Pandi (1970-2000)



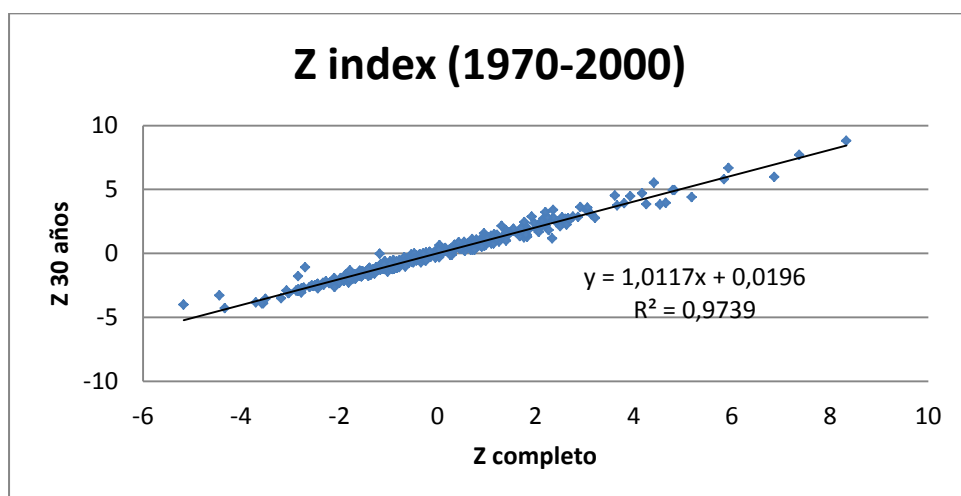
Gráfica 31. Comparación SPI 12 meses, estación Pandi (1970-2000)



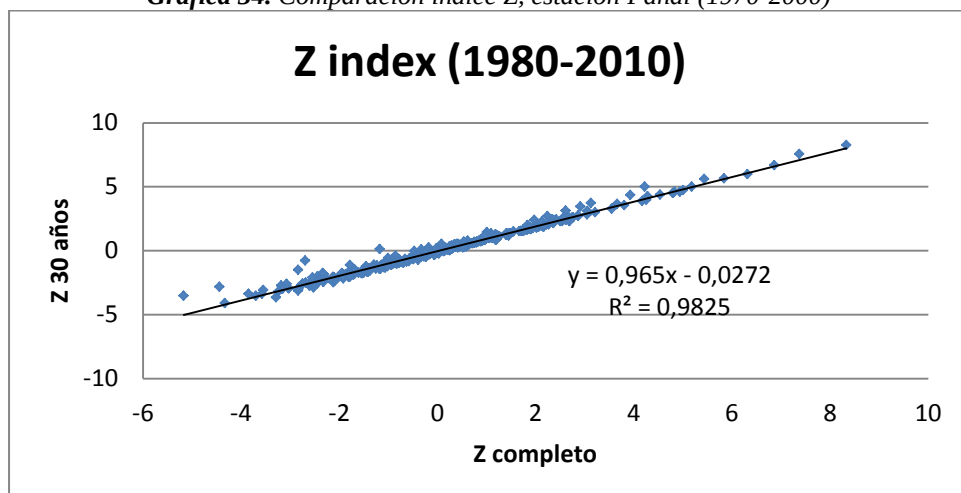
Gráfica 32. Comparación SPI 1 mes, estación El Salero (1980-2010)



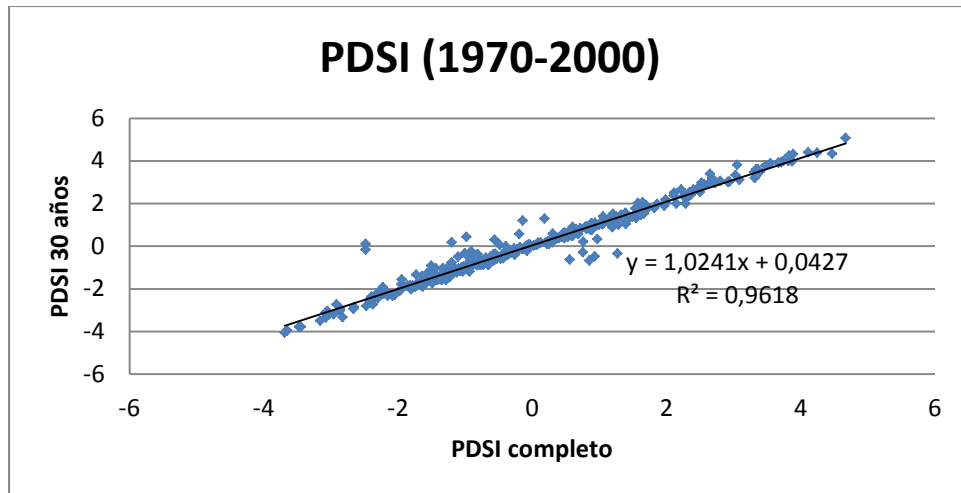
Gráfica 33. Comparación SPI 12 meses, estación El Salero (1980-2010)



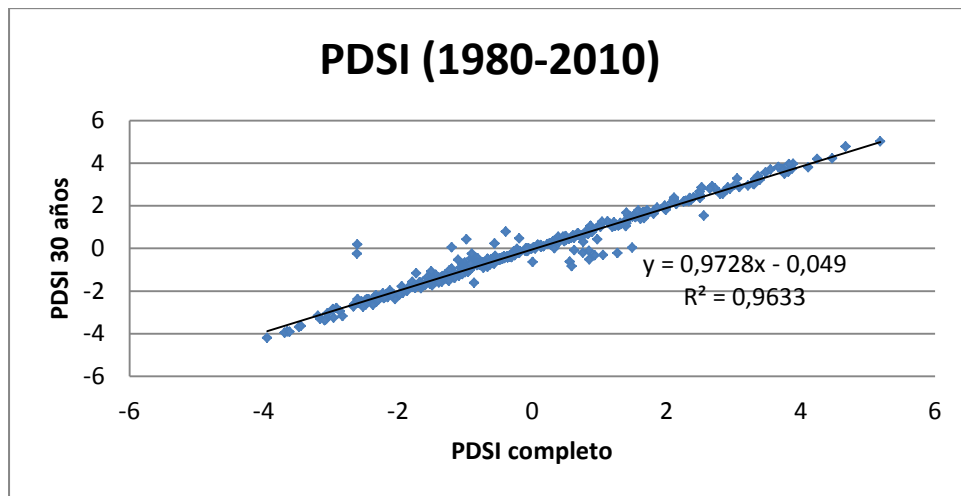
Gráfica 34. Comparación índice Z, estación Pandi (1970-2000)



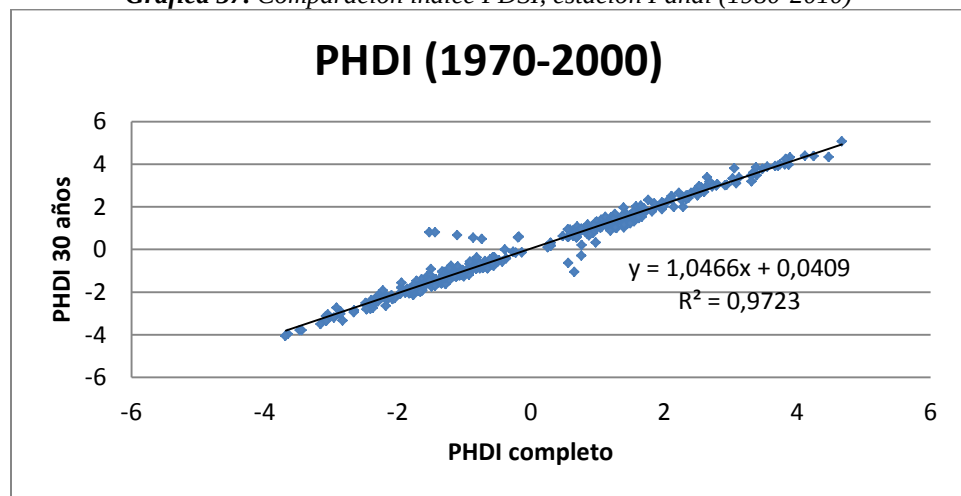
Gráfica 35. Comparación índice Z, estación Pandi (1980-2010)



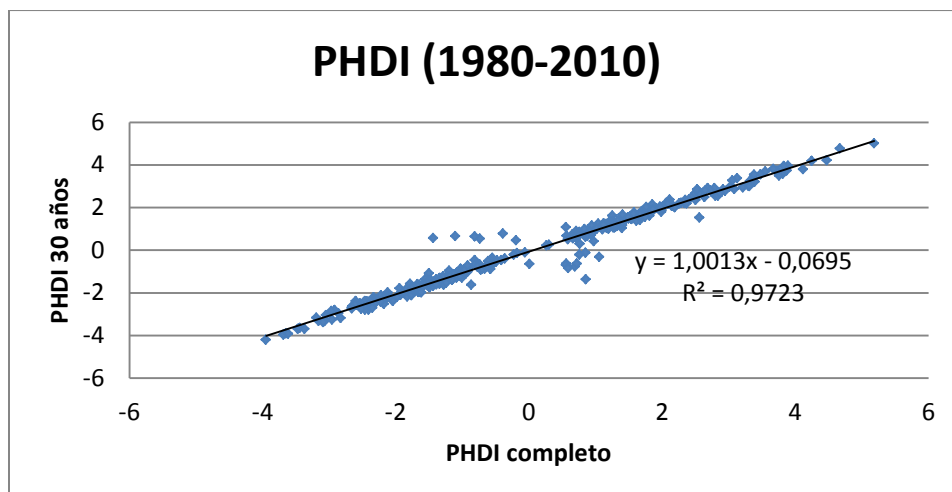
Gráfica 36. Comparación índice PDSI, estación Pandi (1970-2000)



Gráfica 37. Comparación índice PDSI, estación Pandi (1980-2010)



Gráfica 38. Comparación índice PHDI, estación Pandi (1970-2000)



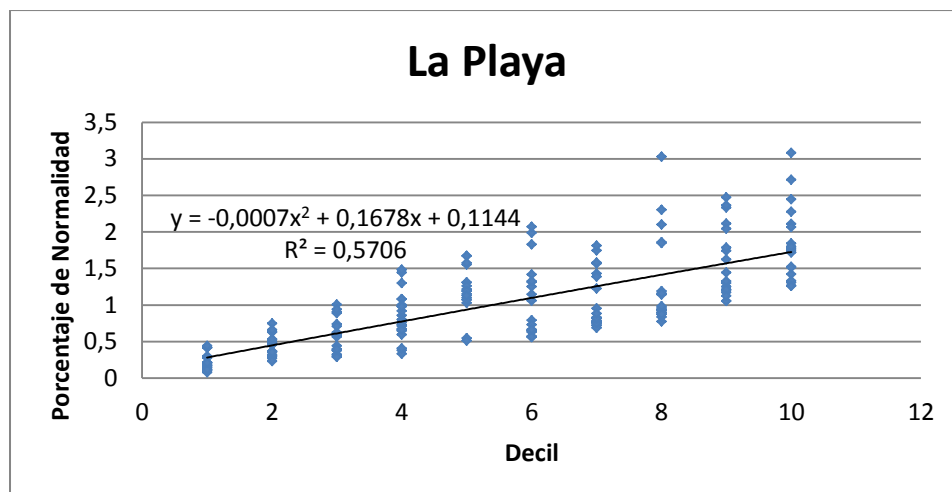
Gráfica 39. Comparación índice PHDI, estación Pandi (1980-2010)

De acuerdo con las gráficas anteriores es posible decir, en primer lugar, que la relación que presentan los valores de índices obtenidos con el registro total e intervalos de 30 años es, predominantemente, lineal. Igualmente, puede notarse que el comportamiento que presenta el SPI es menos variable que el de los índices de Palmer; sin embargo, en todos los casos, los coeficientes de relación obtenidos muestran ser elevados por lo que se considera que esta variabilidad puede ser considerada despreciable. Finalmente, se observa, respecto a la diferencia en el ajuste obtenido en el SPI con ventana temporal de 1 mes y 12 meses, que el ajuste tiende a mejorar cuando se amplía la ventana temporal. Lo anterior podría ser explicado por el hecho de que la variabilidad mensual se ve suavizada al considerar periodos más largos y, por lo tanto, la dispersión en los datos tiende a disminuir y el ajuste a mejorar.

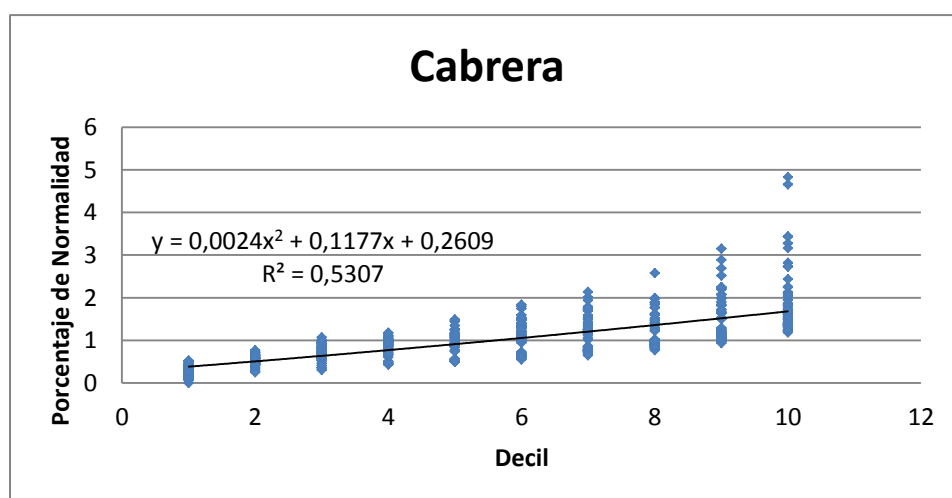
De este punto en adelante, todos los índices que se presentaran fueron hallados a partir del registro completo ya que, como se explicó antes, se pudo comprobar que la variabilidad asociada al periodo de análisis es despreciable

7.3.2. Comparación entre sí

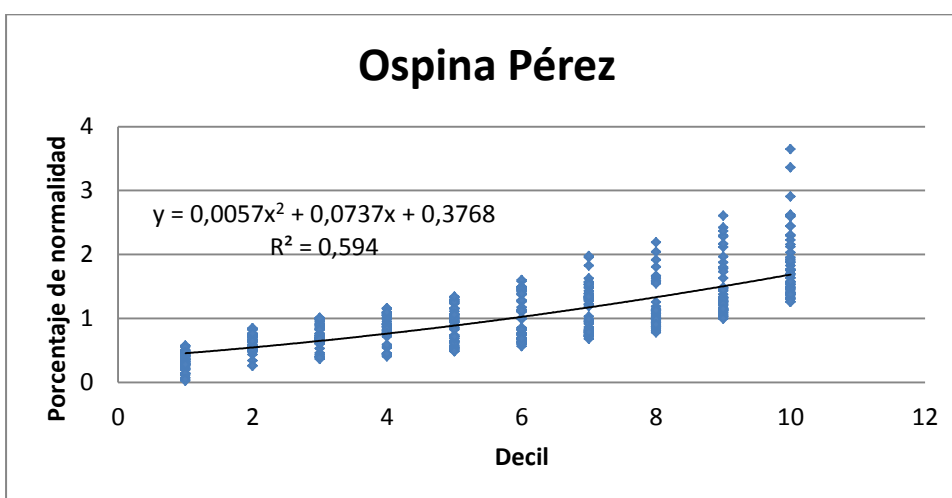
Tal como se explicó en Metodología, se realizó la comparación entre los diferentes índices calculados, para cada estación, empleando regresiones lineales y potenciales y coeficientes de correlación. Vale la pena mencionar que, debido a que la escala de la mayoría de los índices se mide de forma mensual, se decidió considerar para este análisis únicamente el índice estandarizado de precipitación correspondiente a una ventana temporal de 1 mes. A continuación se presentan las gráficas correspondientes a la comparación realizada, para las estaciones pluviométricas, entre el índice de porcentaje de normalidad y el de deciles:



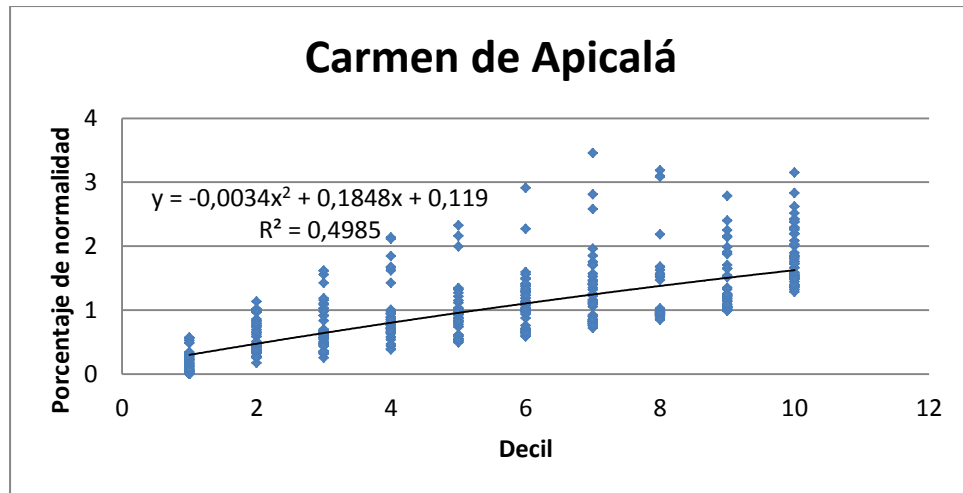
Gráfica 40. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación La Playa



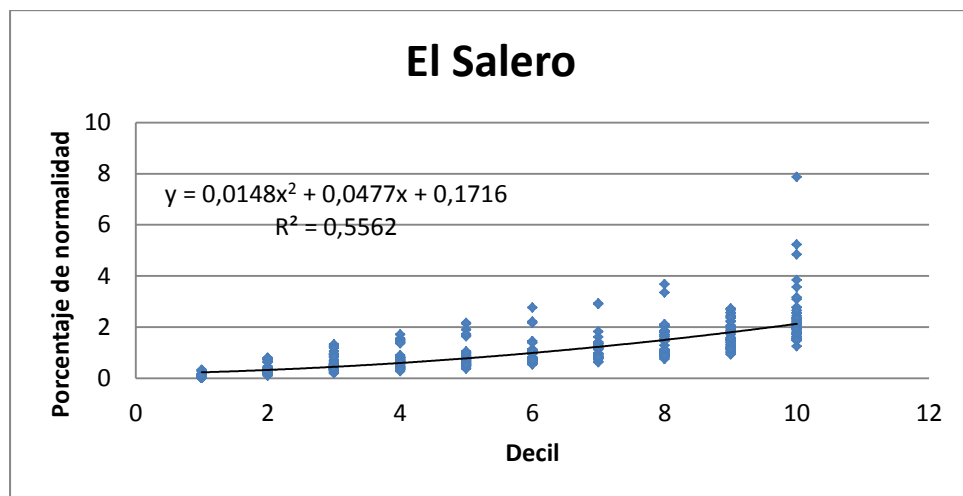
Gráfica 41. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación Cabrera



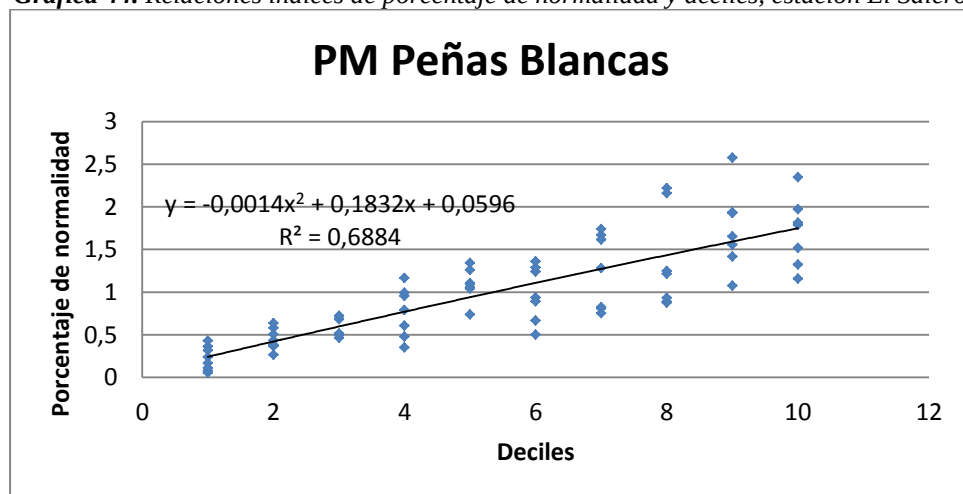
Gráfica 42. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación Ospina Pérez



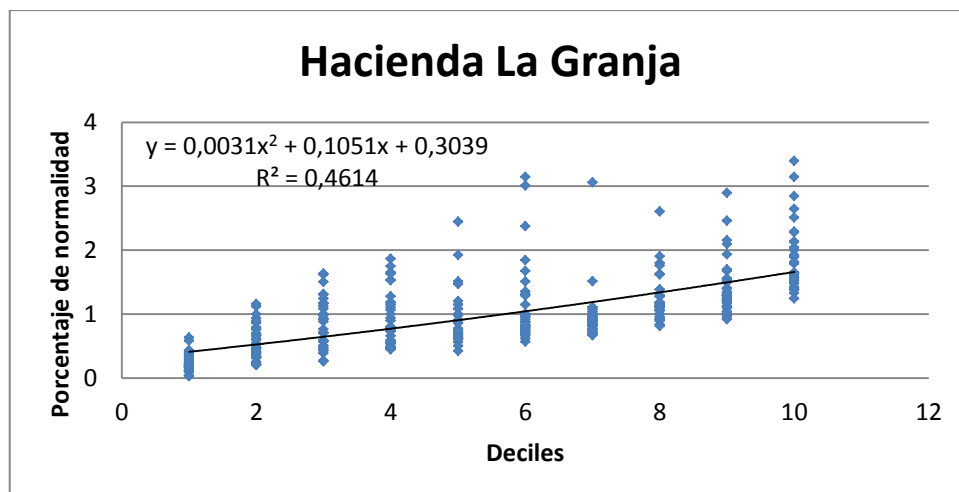
Gráfica 43. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación Carmen de Apicalá



Gráfica 44. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación El Salero



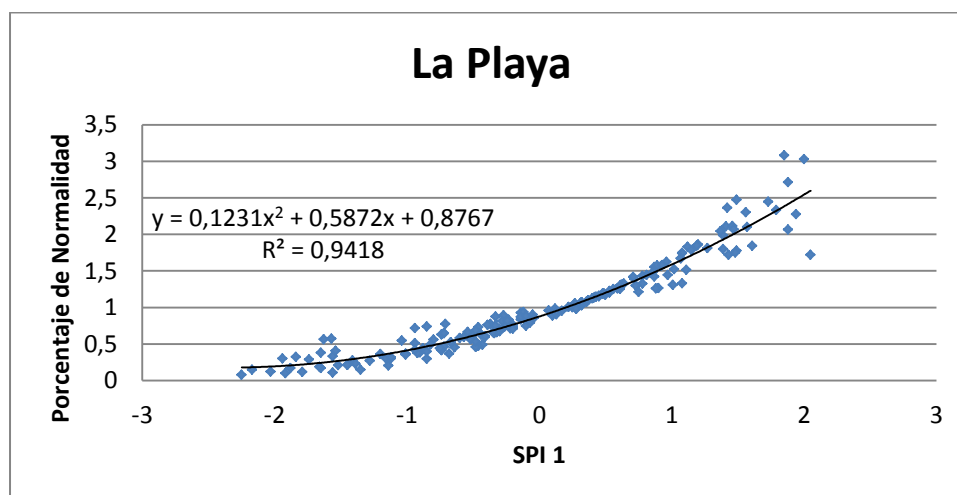
Gráfica 45. Relaciones índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación Peñas Blancas PM



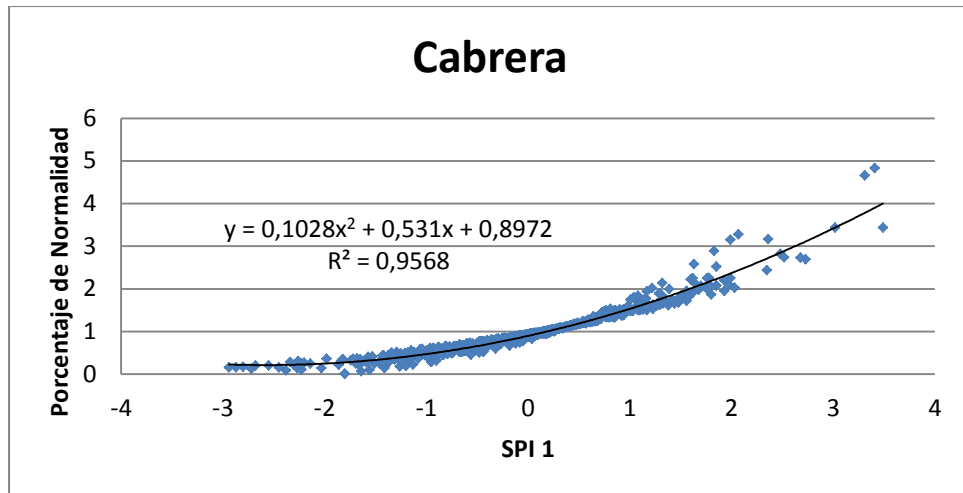
Gráfica 46. Relación índices de porcentaje de normalidad y deciles, estación Hacienda La Granja

Puede notarse, en primer lugar, que el uso del índice de deciles hace que la variabilidad que se presente cuando se realizan las comparaciones con los demás índices aumente. Lo anterior se debe a que los valores discretos de deciles que se asignan contienen un rango amplio de valores de precipitación mientras que, otros índices asignan un único valor a una precipitación disminuyendo la dispersión. En este caso, puede notarse que la relación entre el índice de porcentaje de normalidad y el índice de deciles es lineal y puede ser representada, aproximadamente por una regresión potencial de segundo orden. Sin embargo, el coeficiente de correlación no resulta lo suficientemente alto para considerar que la relación entre los índices efectivamente exista.

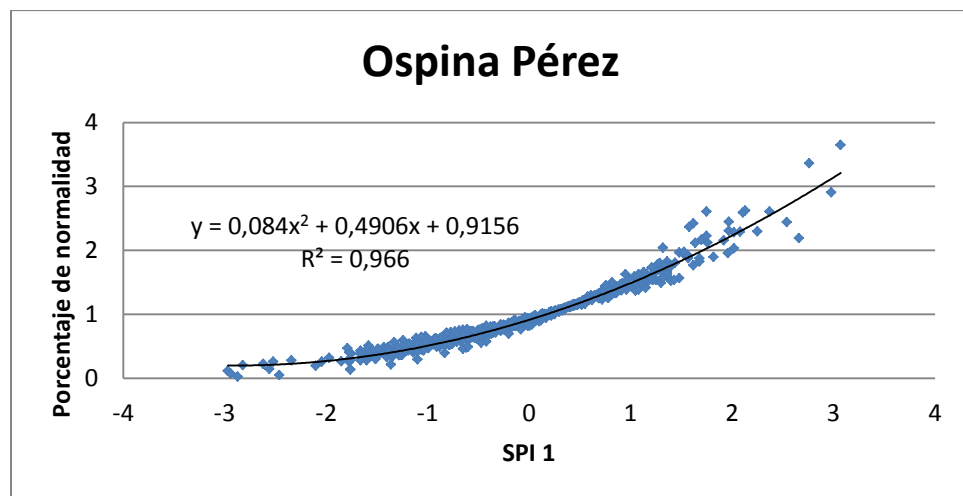
A continuación se presenta la comparación llevada a cabo, para las estaciones pluviométricas, de los índices de porcentaje de normalidad y estandarizado de precipitación para un mes:



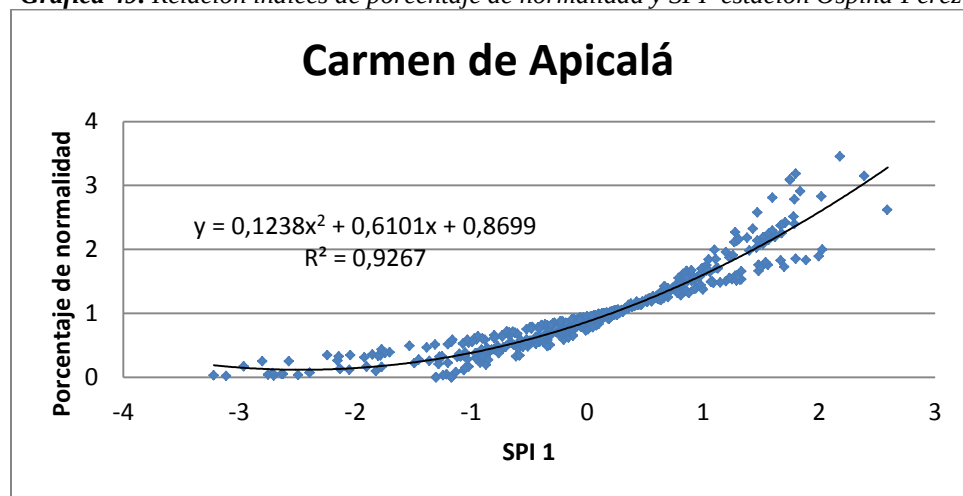
Gráfica 47. Relación índices de porcentaje de normalidad y estandarizado de precipitación estación La Playa



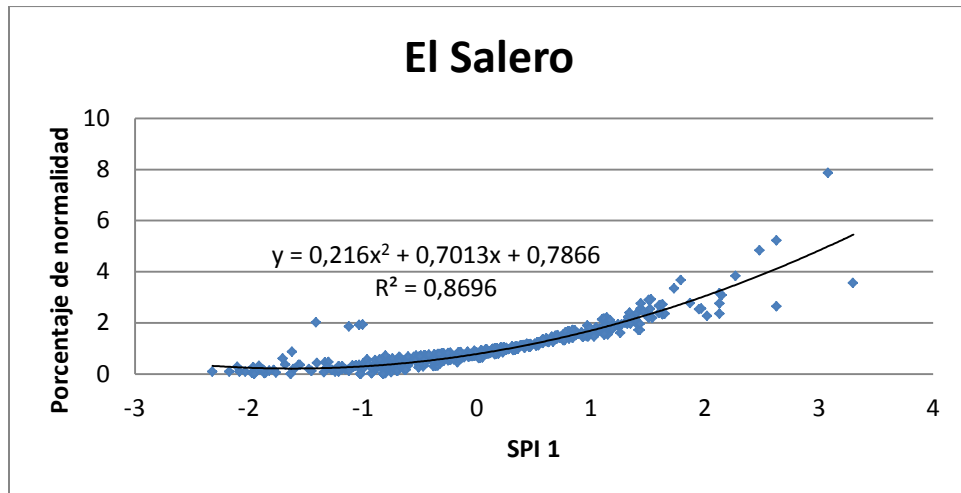
Gráfica 48. Relación índices de porcentaje de normalidad y estandarizado de precipitación estación Cabrera



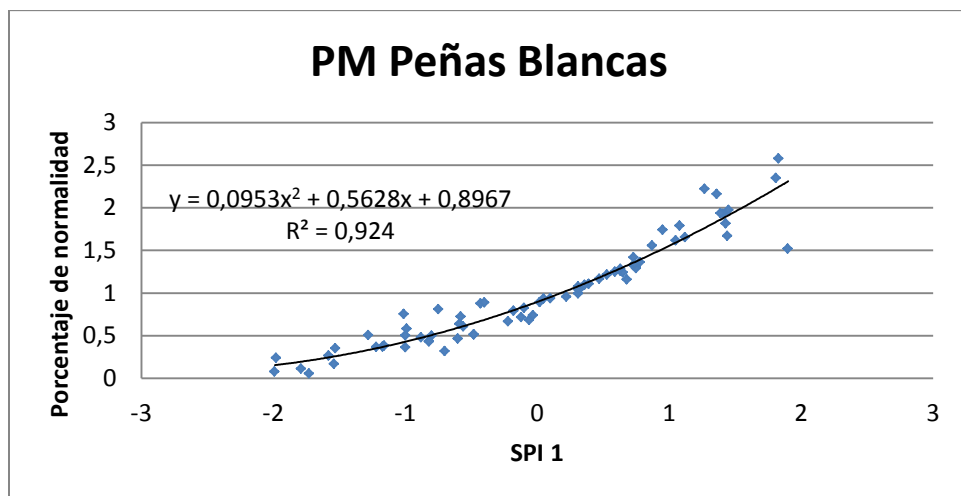
Gráfica 49. Relación índices de porcentaje de normalidad y SPI estación Ospina Pérez



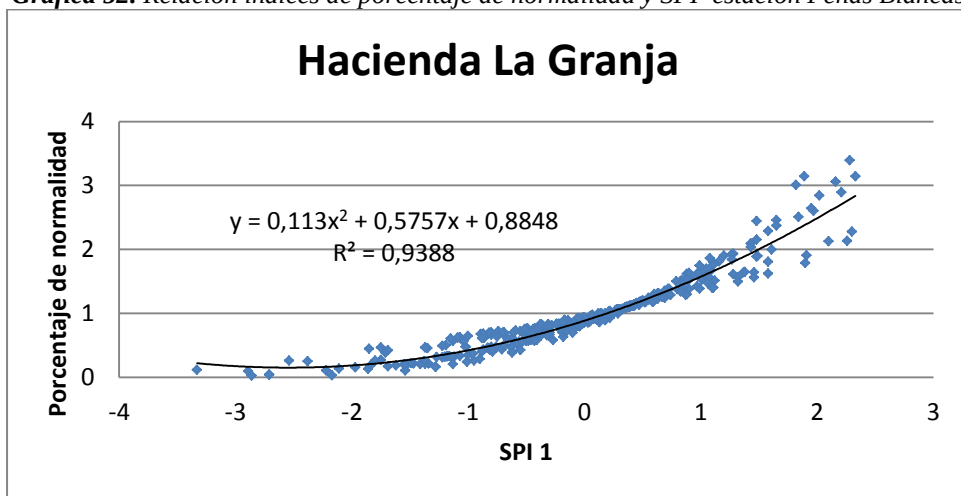
Gráfica 50. Relación índices de porcentaje de normalidad y SPI estación Carmen de Apicalá



Gráfica 51. Relación índices de porcentaje de normalidad y SPI estación El Salero



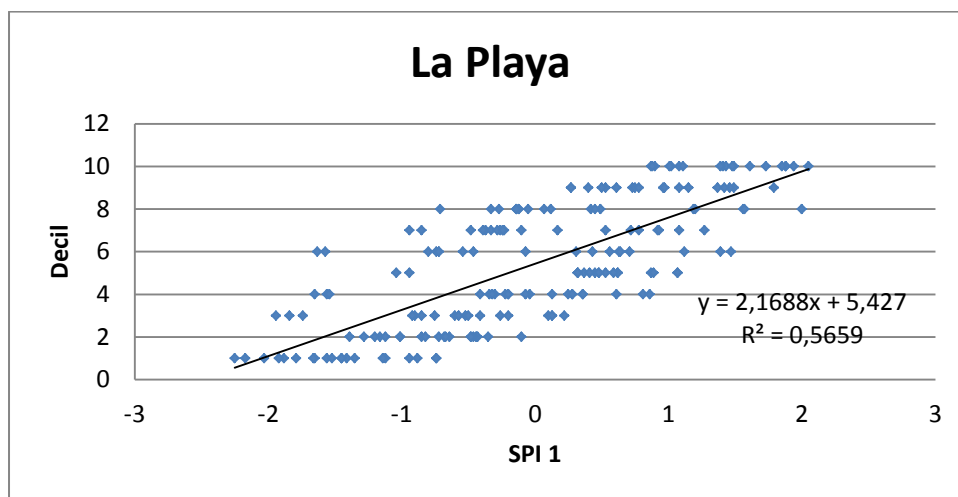
Gráfica 52. Relación índices de porcentaje de normalidad y SPI estación Peñas Blancas



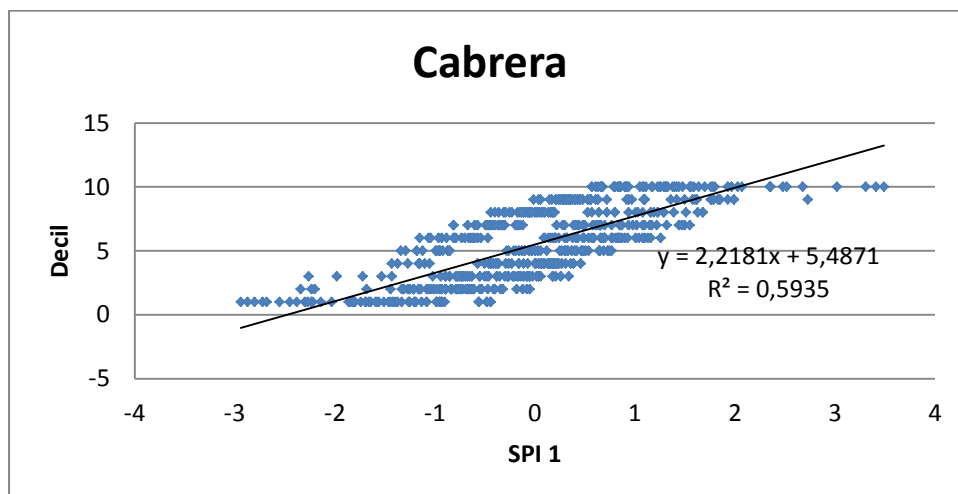
Gráfica 53. Relación índices de porcentaje de normalidad y SPI estación Hacienda La Granja

De acuerdo con las gráficas anteriores, puede notarse que la relación que se presenta entre los índices de porcentaje de normalidad y estandarizado de precipitación puede ser representada con una función de orden 2 para todas las estaciones evaluadas. Lo anterior, resulta importante si se considera que tanto el índice de porcentaje de normalidad como el índice estandarizado de precipitación resultan relativamente simples de calcular y, ese hecho, los hace los más adecuados para usos operativos.

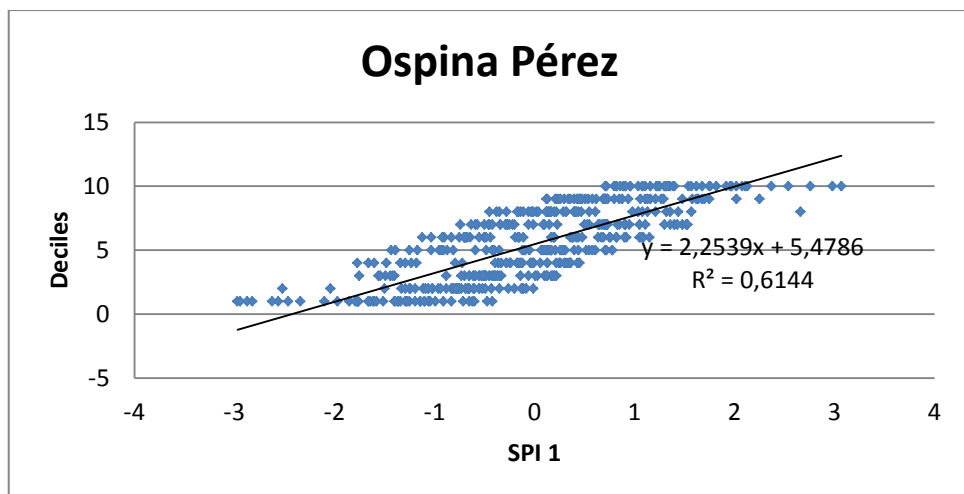
Finalmente, se presentan las relaciones halladas entre los índices de deciles y estandarizado de precipitación para las estaciones pluviométricas estudiadas. Sólo se presentan las gráficas de cuatro estaciones estudiadas dado que el comportamiento obtenido no presenta mayores variaciones entre estaciones.



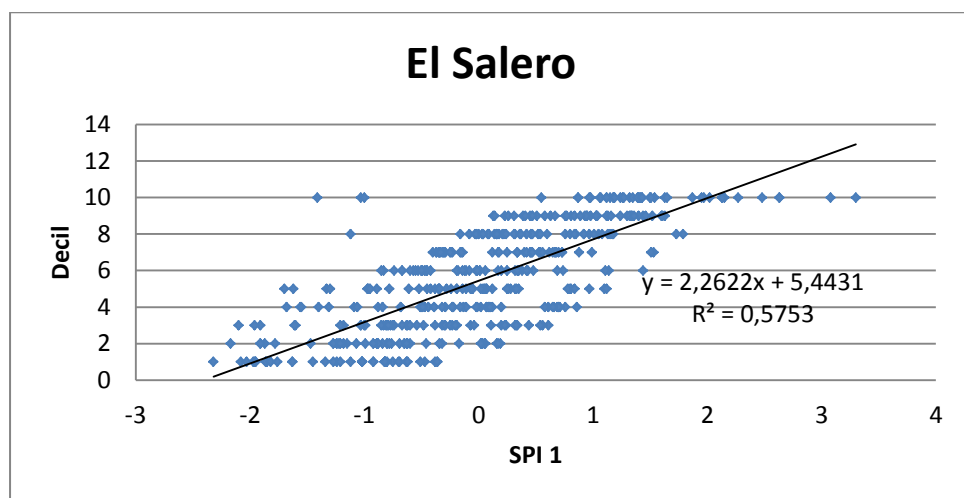
Gráfica 54. Relación índices de deciles y SPI estación La Playa



Gráfica 55. Relación índices de deciles y SPI estación Cabrera



Gráfica 56. Relación índices de deciles y SPI estación Ospina Pérez



Gráfica 57. Relación índices de deciles y SPI estación El Salero

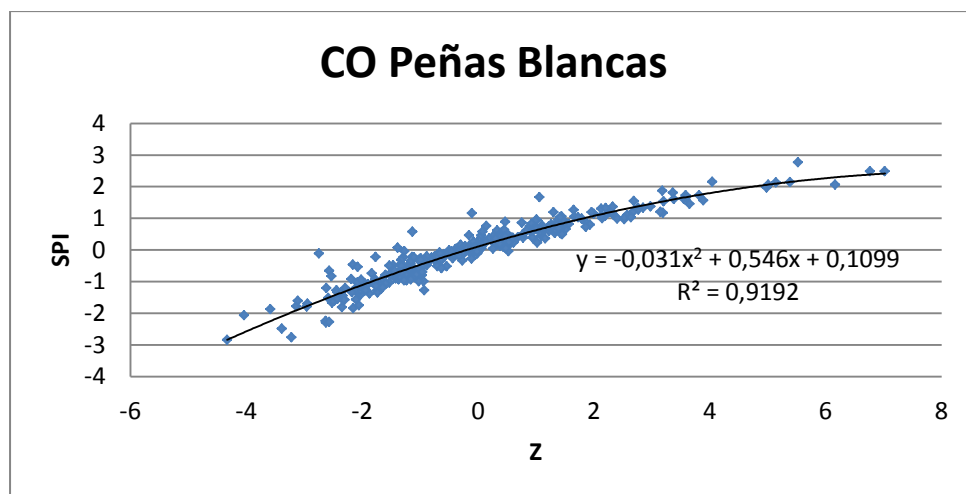
Las gráficas anteriores, permiten observar, nuevamente, la dispersión que genera la utilización del índice de deciles. Igualmente, en este caso, es posible notar la relación directa que presentan los dos índices analizados a pesar de que, como ya se mencionó en la comparación entre deciles y porcentaje de normalidad, el coeficiente de determinación obtenido permite asegurar que la relación sea efectivamente lineal entre los dos índices. Sin embargo, el coeficiente de determinación obtenido sí resulta, en todos los caso superior al que se encontró para la comparación entre deciles y porcentaje de normalidad.

En el caso de las estaciones climatológicas se llevó a cabo el mismo proceso, aunque se incluyeron los índices de Palmer y, adicionalmente a las regresiones, se calculó el coeficiente de correlación de las series. En este caso se decidió presentar únicamente los valores de coeficiente de determinación (considerando una relación lineal de las series) y correlación obtenidos para cada una de las estaciones al comparar todos los índices.

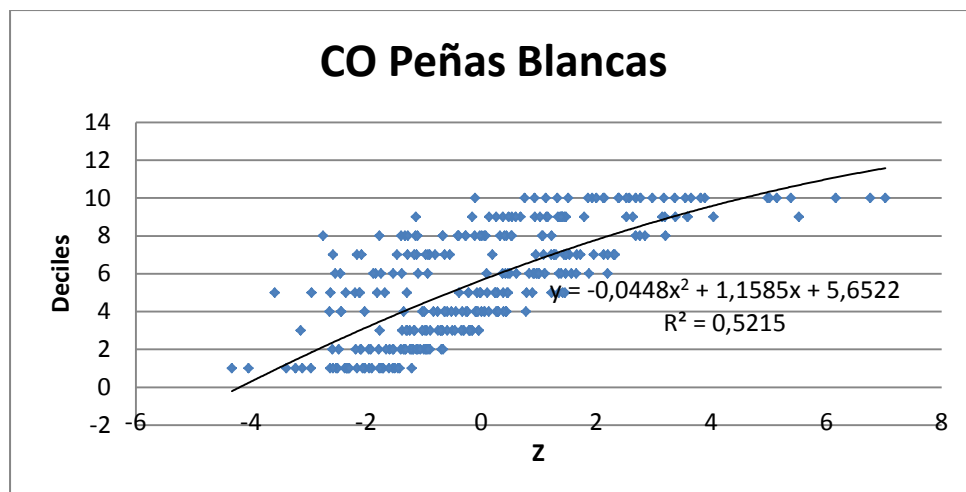
Igualmente, se presentan gráficas con la relación obtenidas para aquellos índices que mostraron presentar mayores coeficientes de correlación:

Tabla 37. Coeficientes de correlación y determinación lineales, estación CO Peñas Blancas

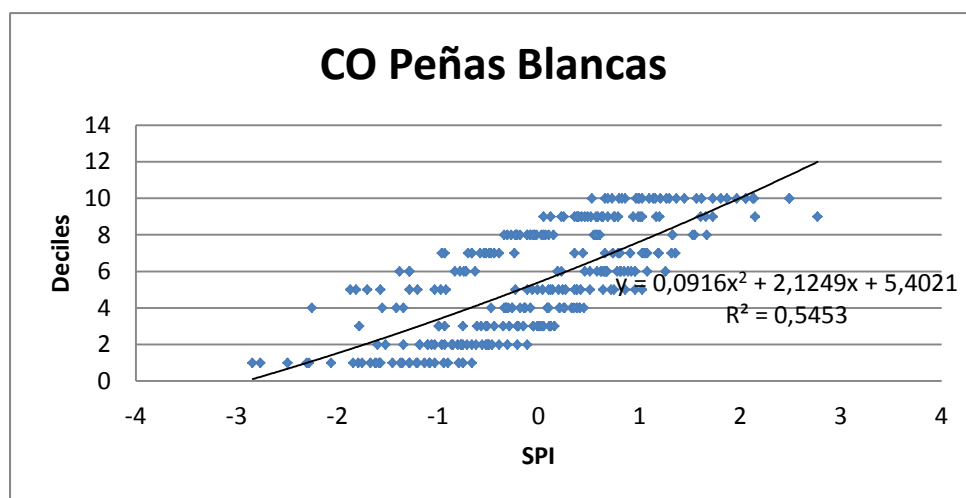
	Correlación	R²
PHDI y SPI	0.4407	0.1942
PDSI y SPI	0.5395	0.2910
Z y SPI	0.9437	0.8906
PHDI y Deciles	0.3392	0.1151
PDSI y Deciles	0.4219	0.1780
Z y Deciles	0.7171	0.5143
SPI y Deciles	0.7372	0.5434
PN y SPI	0.1958	0.0383
PN y Deciles	0.1453	0.0211
PN y PDSI	0.5037	0.2537
PN y PHDI	0.4767	0.2273
PN y Z	0.2904	0.0843



Gráfica 58. Relación índices Z y SPI estación CO Peñas Blancas



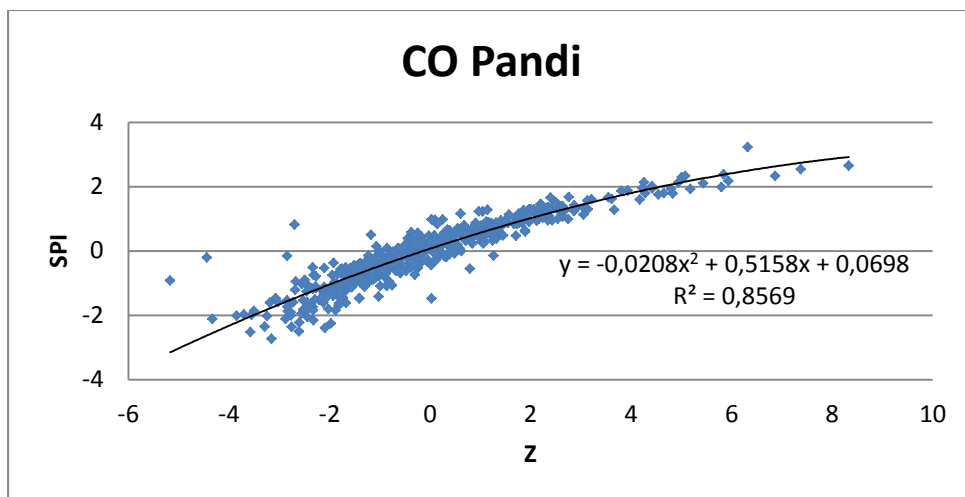
Gráfica 59. Relación índices de deciles y Z estación CO Peñas Blancas



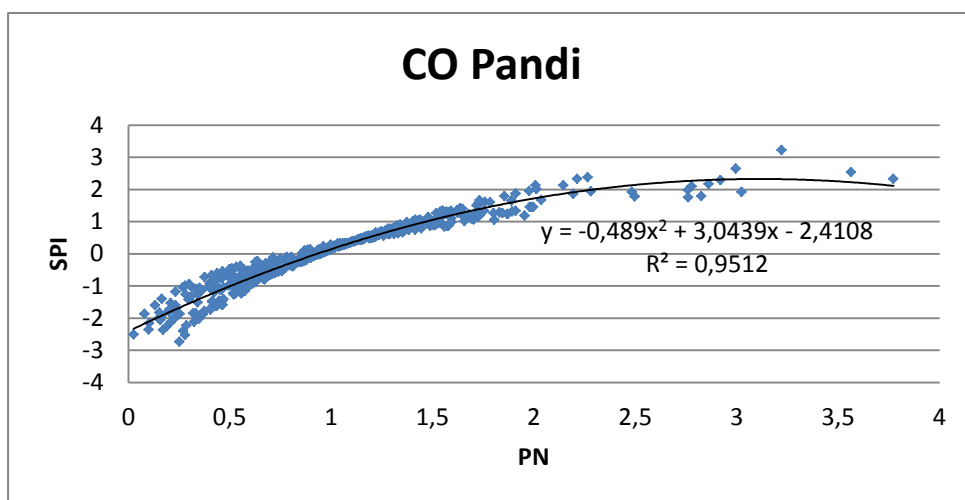
Gráfica 60. Relación índices de deciles y SPI estación CO Peñas Blancas

Tabla 38. Coeficientes de correlación y determinación lineales, estación CO Pandi

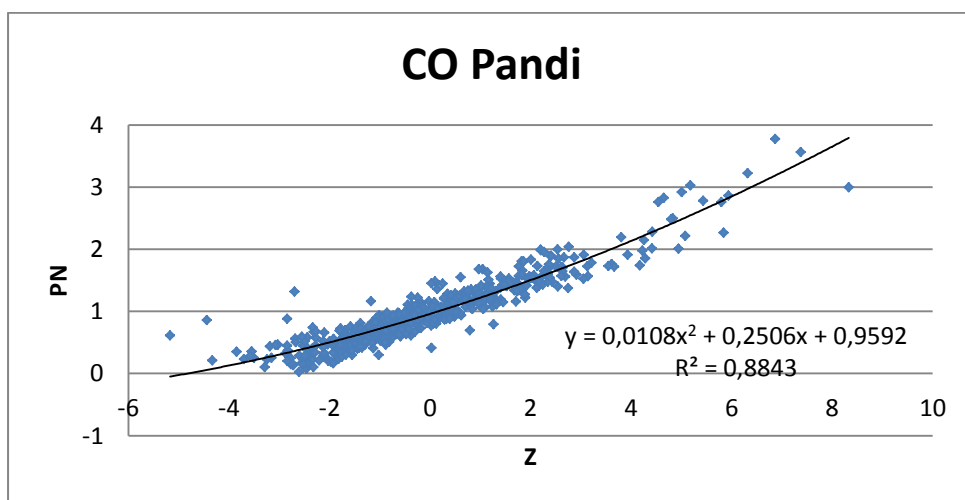
	Correlación	R ²
PHDI y SPI	0.4705	0.2214
PDSI y SPI	0.6191	0.3833
Z y SPI	0.9171	0.8411
PHDI y Deciles	0.3307	0.1094
PDSI y Deciles	0.4453	0.1983
Z y Deciles	0.6711	0.4503
SPI y Deciles	0.7127	0.5079
PN y SPI	0.9368	0.8776
PN y Deciles	0.6933	0.4806
PN y PDSI	0.6214	0.3861
PN y PHDI	0.4845	0.2347
PN y Z	0.9329	0.8702



Gráfica 61. Relación índices Z y SPI estación CO Pandi



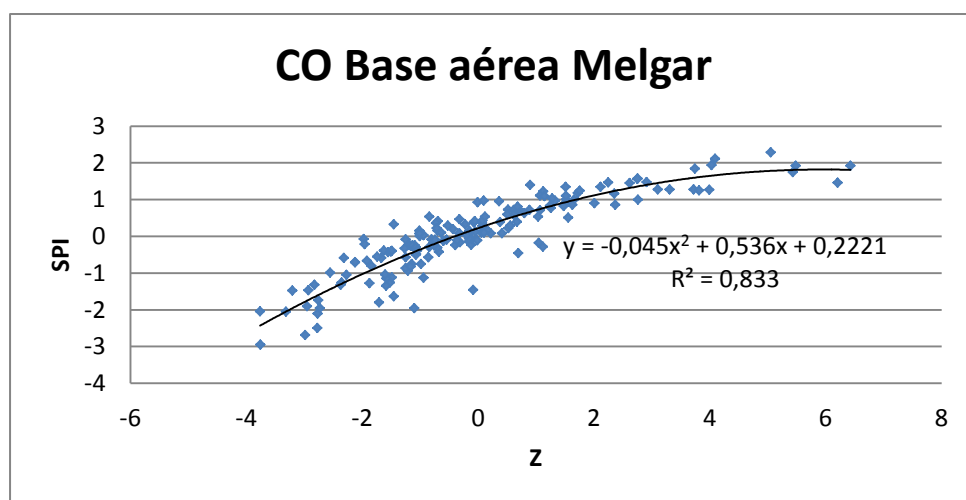
Gráfica 62. Relación índices SPI y porcentaje de normalidad estación CO Pandi



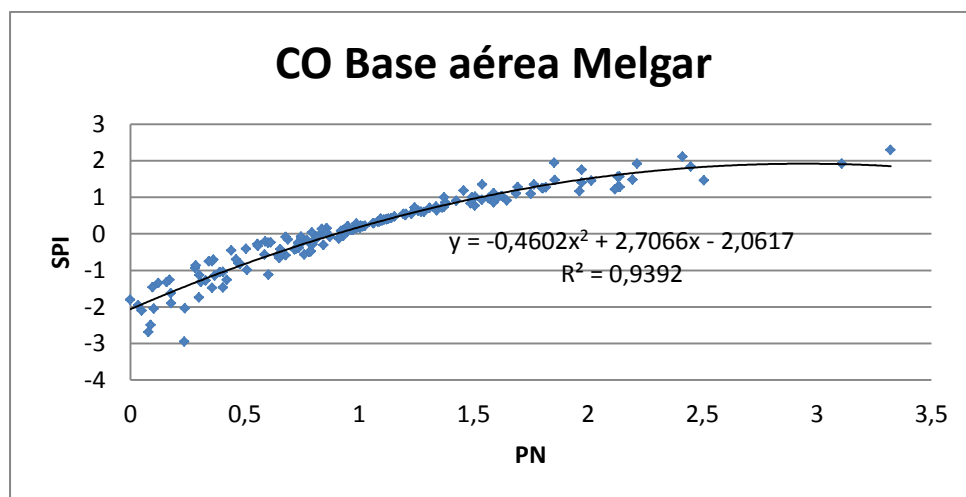
Gráfica 63. Relación índices de porcentaje de normalidad y Z estación CO Pandi

Tabla 39. Coeficientes de correlación y determinación lineales, estación CO Base aérea Melgar

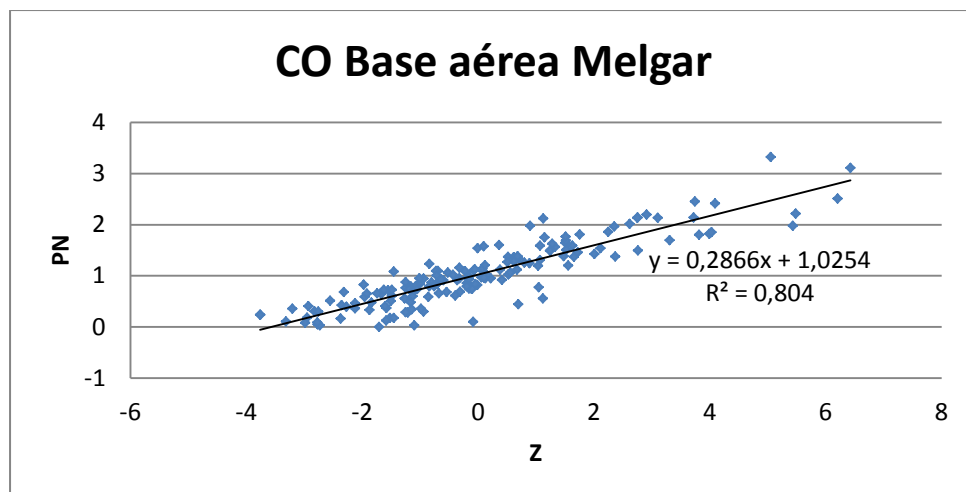
	Correlación	R ²
PHDI y SPI	0.4141	0.1715
PDSI y SPI	0.4699	0.2208
Z y SPI	0.8786	0.7720
PHDI y Deciles	0.3181	0.1012
PDSI y Deciles	0.3619	0.1310
Z y Deciles	0.6551	0.4292
SPI y Deciles	0.7527	0.5665
PN y SPI	0.9350	0.8743
PN y Deciles	0.7281	0.5301
PN y PDSI	0.5030	0.2530
PN y PHDI	0.4441	0.1972
PN y Z	0.8967	0.8040



Gráfica 64. . Relación índices Z y SPI estación CO Base aérea Melgar



Gráfica 65. Relación índices SPI y porcentaje de normalidad estación CO Base aérea Melgar



Gráfica 66. Relación índices de porcentaje de normalidad y Z estación CO Base aérea Melgar

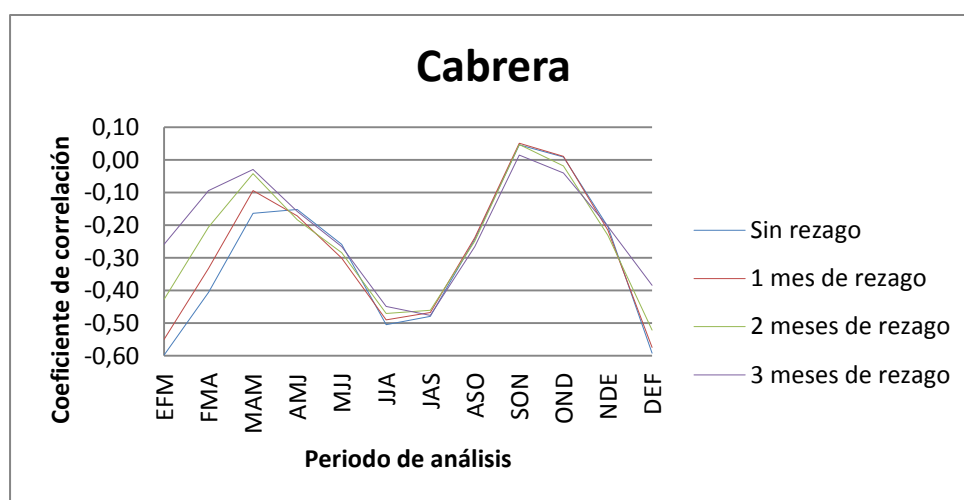
De acuerdo con lo presentado en las anteriores gráficas y tablas se puede concluir que, para todos los casos, se presenta una relación clara entre el índice Z y SPI. Esta relación, puede ser representada satisfactoriamente por una función de segundo orden en los tres casos analizados. Respecto a la relación que se presenta entre el índice de porcentaje de normalidad y el SPI se puede notar que, al igual que en las estaciones pluviométricas, esta es la más clara y, como ya se había mencionado, puede ser representada de forma satisfactoria por una función potencial de orden 2 (la única excepción se presentó en el caso de la estación CO Peñas Blancas donde los coeficientes de correlación y determinación no fueron suficientemente altos para decidir graficar la relación). Finalmente, también se pueden notar relaciones importantes entre el índice de porcentaje de normalidad y Z; así como entre deciles y SPI y deciles y Z.

7.3.3. Índices de eventos macro climáticos

A continuación se presenta, de acuerdo con lo explicado anteriormente, la comparación realizada entre el ONI y SPI y entre el MEI y los índices de Palmer. En el caso del SPI, se realizó la comparación utilizando la escala temporal de tres meses de tal forma que los periodos de tiempo respecto al ONI fueran consistentes. La medida del nivel de correlación se hizo para series de 3 meses individualmente a través del coeficiente de correlación. Dado que los valores obtenidos no fueron satisfactorios, sólo se presentaron los resultados de la comparación para tres estaciones: Cabrera, Base aérea Melgar y Carmen de Apicalá. De esta forma, respecto al ONI y SPI se tiene:

Tabla 40. Coeficientes de correlación obtenidos entre series de SPI 3 y ONI con rezago y sin él, Cabrera

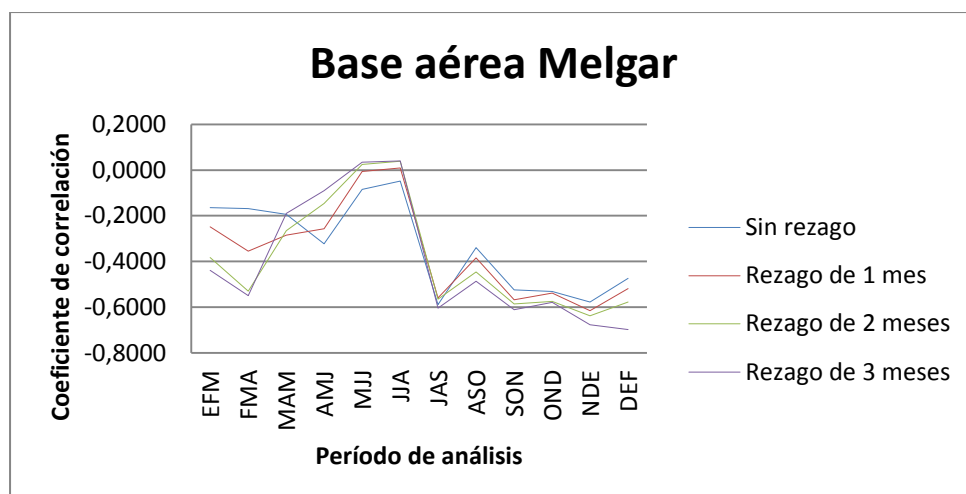
	ONI sin rezago	Rezago de 1 mes	Rezago de 2 meses	Rezago de 3 meses
EFM	-0.5981	-0.5498	-0.4277	-0.2587
FMA	-0.4059	-0.3320	-0.2061	-0.0941
MAM	-0.1638	-0.0941	-0.0428	-0.0301
AMJ	-0.1525	-0.1721	-0.1832	-0.1582
MJJ	-0.2587	-0.3014	-0.2843	-0.2656
JJA	-0.5047	-0.4899	-0.4706	-0.4488
JAS	-0.4794	-0.4677	-0.4607	-0.4762
ASO	-0.2434	-0.2382	-0.2490	-0.2657
SON	0.0460	0.0502	0.0470	0.0142
OND	0.0087	0.0104	-0.0186	-0.0406
NDE	-0.2054	-0.2156	-0.2314	-0.2038
DEF	-0.5924	-0.5744	-0.5215	-0.3841



Gráfica 67. Coeficientes de correlación obtenidos para diferentes periodos, estación Cabrera

Tabla 41. Coeficientes de correlación obtenidos entre series de SPI 3 y ONI con rezago y sin él, Base aérea Melgar

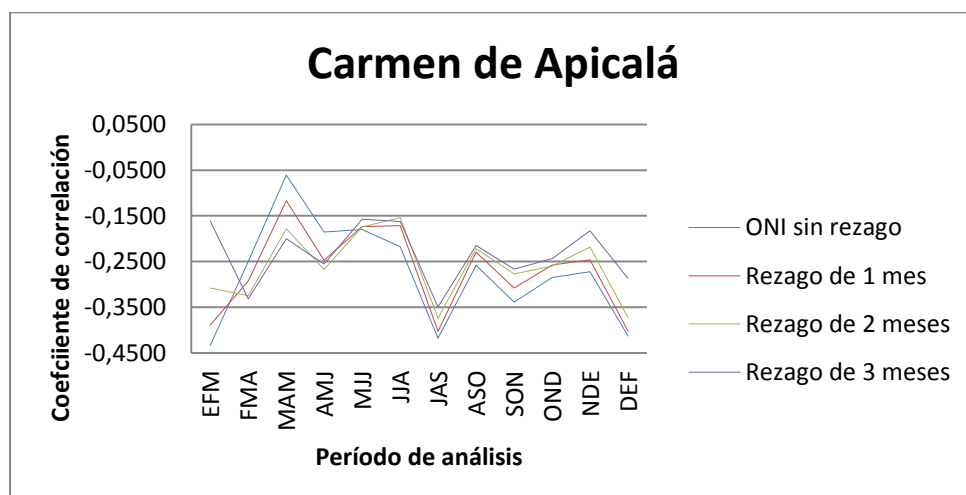
	ONI sin rezago	Rezago de 1 mes	Rezago de 2 meses	Rezago de 3 meses
EFM	-0.1651	-0.2488	-0.3828	-0.4394
FMA	-0.1679	-0.3552	-0.5292	-0.5488
MAM	-0.1937	-0.2851	-0.2653	-0.1896
AMJ	-0.3219	-0.2573	-0.1461	-0.0909
MJJ	-0.0848	-0.0069	0.0246	0.0339
JJA	-0.0488	0.0091	0.0382	0.0403
JAS	-0.5886	-0.5595	-0.5652	-0.6037
ASO	-0.3398	-0.3835	-0.4461	-0.4867
SON	-0.5239	-0.5680	-0.5860	-0.6109
OND	-0.5307	-0.5387	-0.5744	-0.5785
NDE	-0.5769	-0.6152	-0.6369	-0.6769
DEF	-0.4738	-0.5185	-0.5773	-0.6972



Gráfica 68. Coeficientes de correlación obtenidos para diferentes periodos, estación Base aérea Melgar

Tabla 42. Coeficientes de correlación obtenidos entre series de SPI 3 y ONI con rezago y sin él, Carmen de Apicalá

	ONI sin rezago	Rezago de 1 mes	Rezago de 2 meses	Rezago de 3 meses
EFM	-0.4339	-0.3892	-0.3076	-0.1609
FMA	-0.2496	-0.2928	-0.3248	-0.3317
MAM	-0.0607	-0.1169	-0.1786	-0.2002
AMJ	-0.1857	-0.2471	-0.2671	-0.2556
MJJ	-0.1797	-0.1732	-0.1740	-0.1576
JJA	-0.2175	-0.1715	-0.1540	-0.1622
JAS	-0.4178	-0.4025	-0.3736	-0.3488
ASO	-0.2584	-0.2298	-0.2221	-0.2145
SON	-0.3389	-0.3076	-0.2774	-0.2667
OND	-0.2848	-0.2575	-0.2592	-0.2434
NDE	-0.2720	-0.2460	-0.2183	-0.1823
DEF	-0.4125	-0.4026	-0.3731	-0.2872

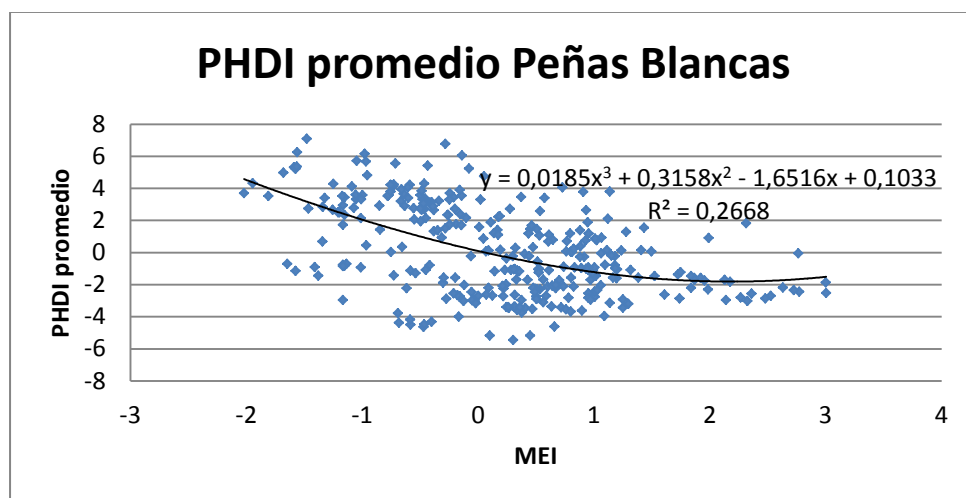


Gráfica 69. Coeficientes de correlación obtenidos para diferentes periodos, estación Carmen de Apicalá

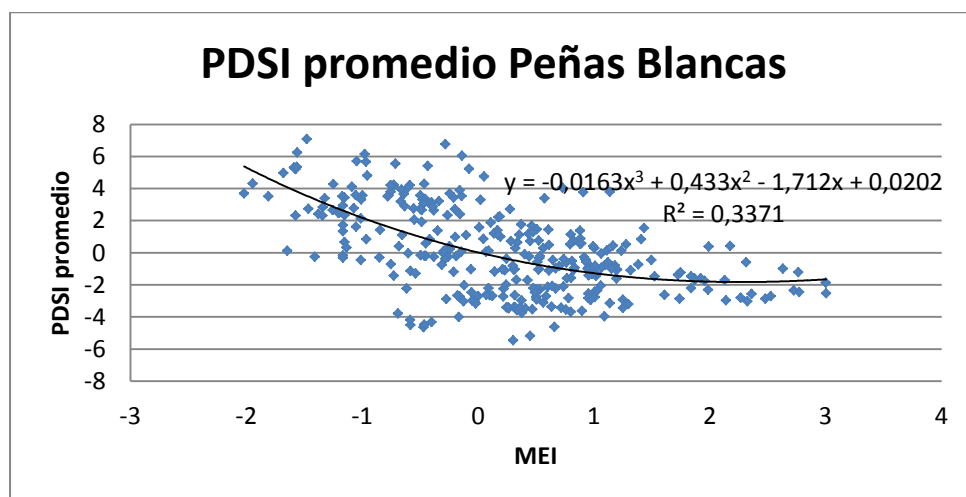
Como se puede observar en las anteriores gráficas, el coeficiente de correlación obtenido, en todos los casos analizados resulta deficiente para todos los periodos de análisis. Lo anterior, implica que no es posible establecer una relación entre valores obtenidos de SPI y el índice macro climático seleccionado, ni siquiera aplicando rezagos a las series de SPI. Ahora, respecto a la comparación entre MEI e índices de Palmer se tiene:

Tabla 43. Coeficientes de correlación y determinación obtenidos para índices realizando promedio y sin realizarlo, estación Peñas Blancas

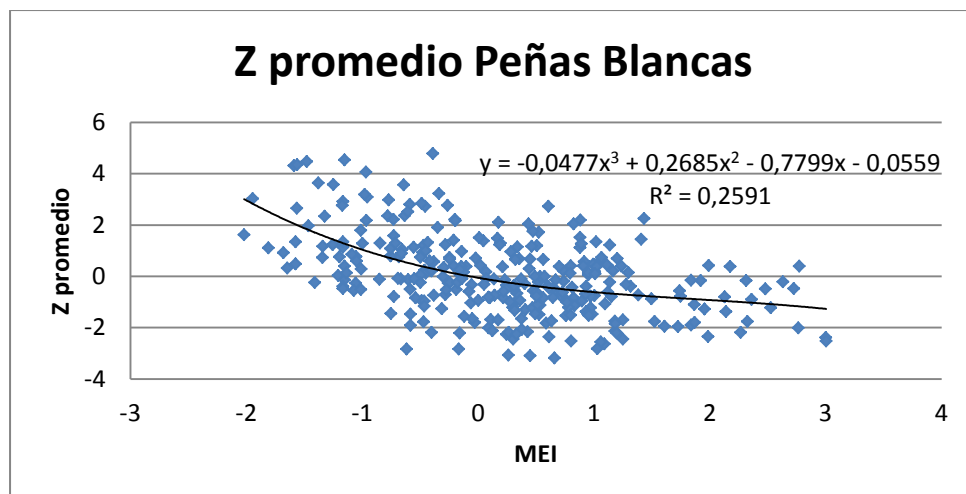
	Z index	PDSI	PHDI	Z promedio	PDSI promedio	PHDI promedio
Correlación	-0.3873	-0.5236	-0.4580	-0.4760	-0.5426	-0.4890
R ²	0.1500	0.2741	0.2098	0.2265	0.2945	0.2392



Gráfica 70. Comparación valores MEI y PHDI promedio, estación Peñas Blancas



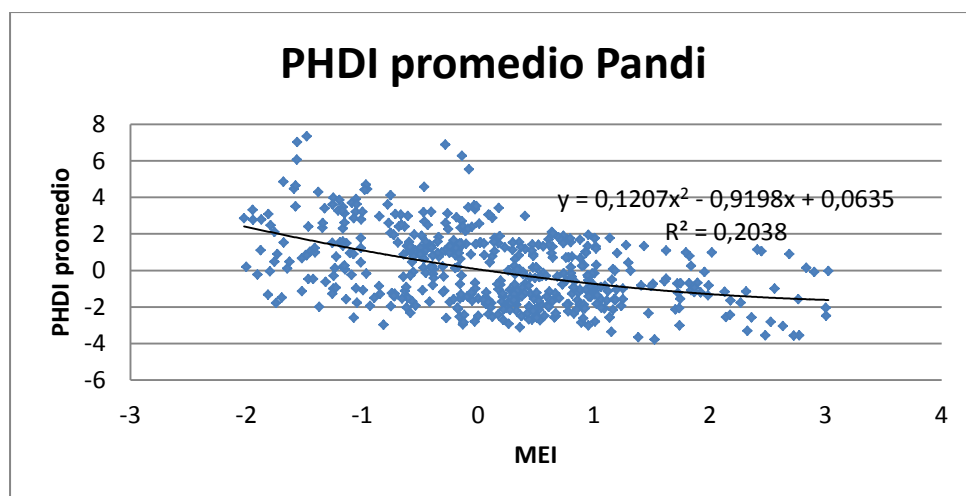
Gráfica 71. Comparación valores MEI y PDSI promedio, estación Peñas Blancas



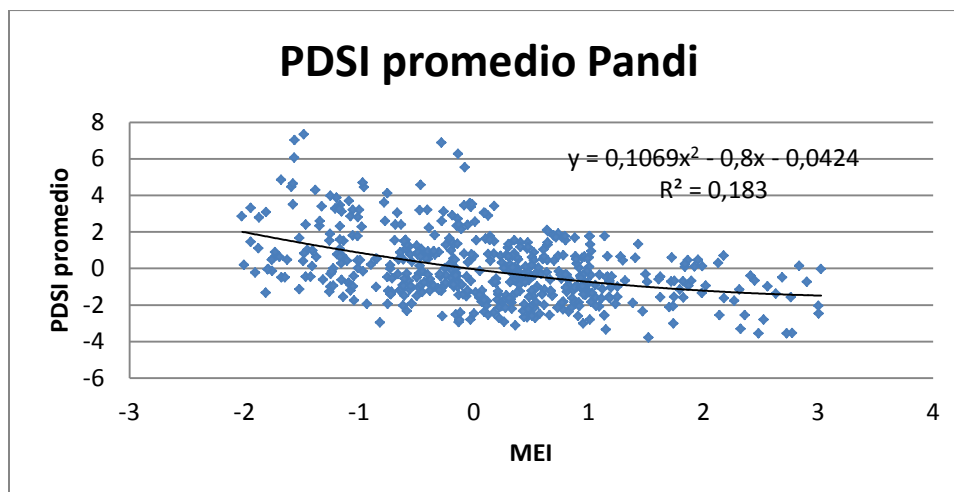
Gráfica 72. Comparación valores MEI y Z promedio, estación Peñas Blancas

Tabla 44. Coeficientes de correlación y determinación obtenidos para índices realizando promedio y sin realizarlo, estación Pandi

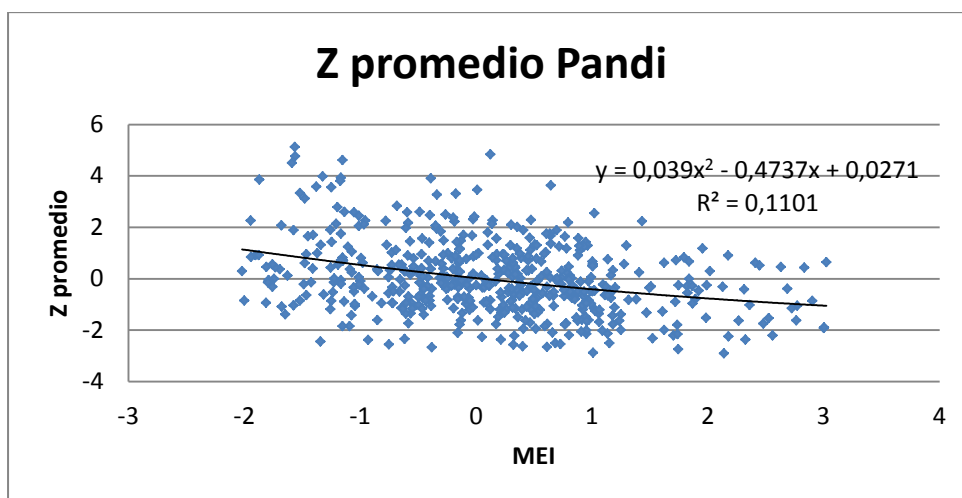
	Z index	PDSI	PHDI	Z promedio	PDSI promedio	PHDI promedio
Correlación	-0.2461	-0.3970	-0.4038	-0.3294	-0.4192	-0.4427
R^2	0.0606	0.1576	0.1631	0.1085	0.1758	0.1960



Gráfica 73. Comparación valores MEI y PHDI promedio, estación Pandi



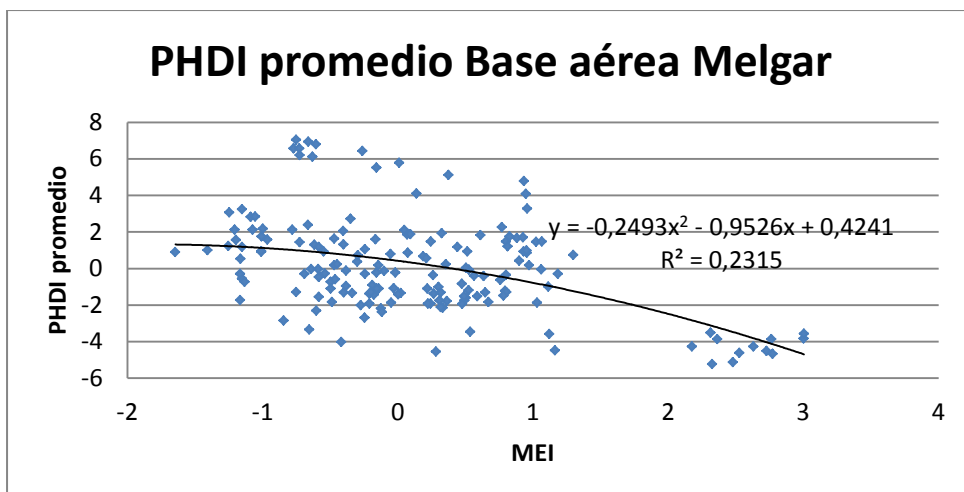
Gráfica 74. Comparación valores MEI y PDSI promedio, estación Pandi



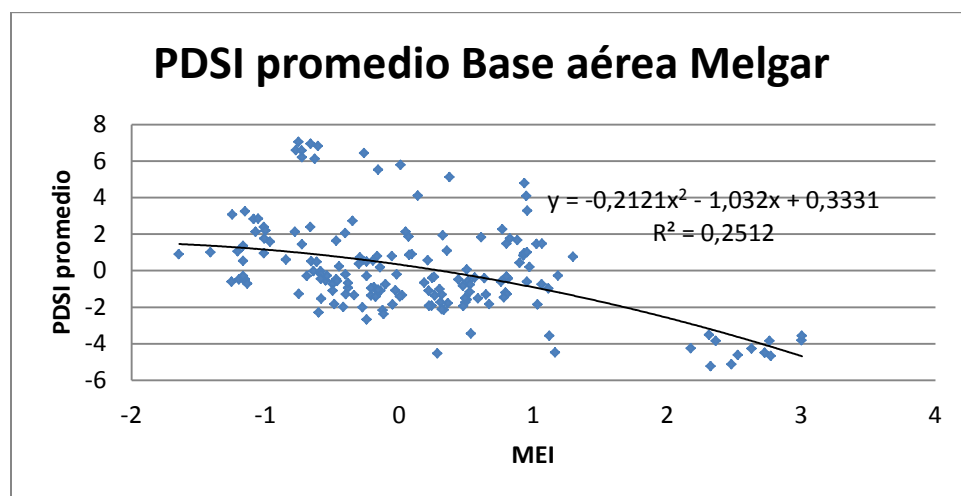
Gráfica 75. Comparación valores MEI y Z promedio, estación Pandi

Tabla 45. Coeficientes de correlación y determinación obtenidos para índices realizando promedio y sin realizarlo, estación Base aérea Melgar

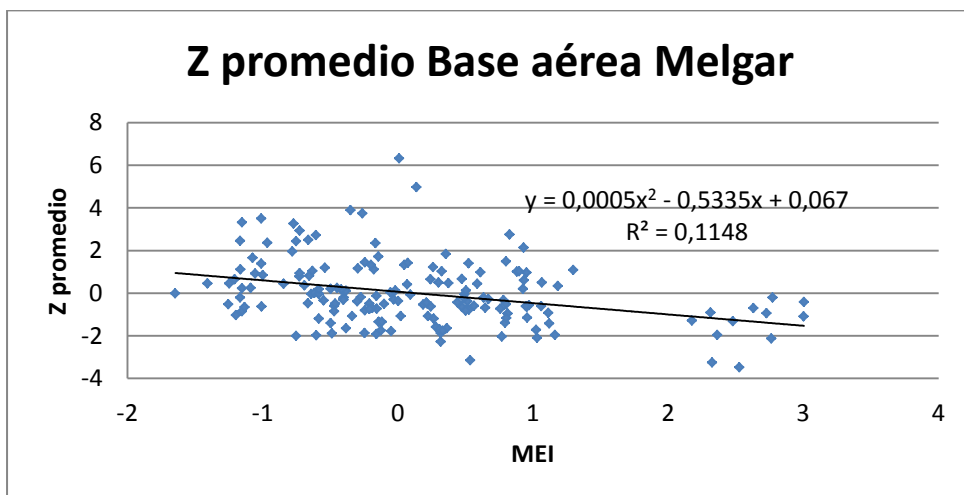
	Z index	PDSI	PHDI	Z promedio	PDSI promedio	PHDI promedio
Correlación	-0.2581	-0.4662	-0.4391	-0.3388	-0.4887	-0.4639
R²	0.0666	0.2174	0.1928	0.1148	0.2388	0.2152



Gráfica 76. Comparación valores MEI y PHDI promedio, estación Base aérea Melgar



Gráfica 77. Comparación valores MEI y PDSI promedio, estación Base aérea Melgar



Gráfica 78. Comparación valores MEI y Z promedio, estación Base aérea Melgar

Las anteriores gráficas y tablas muestran que las correlaciones que se presentan entre el MEI y los índices evaluados mejoran al realizar el promedio centrado a la izquierda de los índices para dos meses. Igualmente, puede observarse que la mejor correlación obtenida corresponde, en dos de los tres casos, a la de PHDI promedio y MEI y, en el caso en cual esta no es la mejor, sí presenta un valor bastante alto. De la misma forma, se aprecian correlaciones altas entre el MEI y el PDSI promedio y bajas entre este y el Z, a diferencia de análisis anteriores, en donde Z se relaciona de forma importante con otros índices. Finalmente, respecto a los ajustes obtenidos al realizar las regresiones, es posible decir que, en ninguno de los casos, el coeficiente de determinación obtenido resulta satisfactorio dada la gran variabilidad que se presenta en los datos; dado esto, no sería posible establecer una función que relacione el comportamiento de los índices de Palmer respecto al MEI aunque, sí es posible afirmar que entre sus valores existe un cierto nivel de correlación.

7.3.4. Series de caudales

Según se definió en Metodología, se realizó la comparación entre el SPI aplicado a series de precipitación y a series de caudales. Con el fin de comprobar la relación existente, se utilizaron gráficas de SPI contra tiempo, coeficientes de correlación lineal y coeficientes de determinación para ajustes lineales y polinomiales de segundo grado. De la misma forma, se utilizaron rezagos en las series de caudales respecto a las de precipitación, para definir qué tanto tiempo toma observar los efectos de la precipitación en los caudales de la corriente de estudio.

Dado que para ninguno de los análisis, antes mencionados, se obtuvieron resultados satisfactorios en las estaciones Dos Mil y El Limonar, se optó por presentar únicamente las tablas con los resultados de coeficientes de correlación para todas las ventanas temporales (1, 3, 6, 9 y 12 meses) sin rezago para estas series. Para las demás se presentan, adicionalmente, gráficas de SPI contra tiempo y de dispersión relacionando SPI de caudales y de precipitación. En primer lugar, se presentan las tablas con coeficientes de correlación de todas las estaciones:

Tabla 46. Resultados comparación series caudales y precipitación, estación Melgar

Resultados comparación series cuadares y precepcción, estado							
Ventana temporal (meses)		1	3	6	9	12	
Coeficiente de correlación	Número de periodos de rezago	0	0.3194	0.3792	0.3927	0.4514	0.4703
		1	0.4126	0.4325	0.4091	0.4639	0.5108
		2	0.1365	0.3351	0.3906	0.4650	0.5436
		3	0.1559	0.2253	0.3550	0.4725	0.5755
		4				0.4762	0.6104
		5				0.4899	0.6427
		6				0.5038	0.6684
		7				0.5317	0.6949
		8				0.5500	0.7208
		9				0.5660	0.7377
		10				0.5908	0.7503
		11				0.6158	0.7441
		12				0.6288	
		13				0.6346	

Tabla 47. Resultados comparación series caudales y precipitación, estación La Playa

Ventana temporal (meses)			1	3	6	9	12
Coeficiente de correlación	Número de periodos de rezago	0	0.4012	0.4537	0.5311	0.6101	0.6616
		1	0.2585	0.4047	0.5146	0.6024	0.6663

Tabla 48. Resultados comparación series caudales y precipitación, estación El Limonar

Ventana temporal (meses)	1	3	6	9	12
Coeficiente de correlación	0.1226	0.1648	0.1142	0.1317	0.1471

Tabla 49. Resultados comparación series caudales y precipitación, estación El Profundo

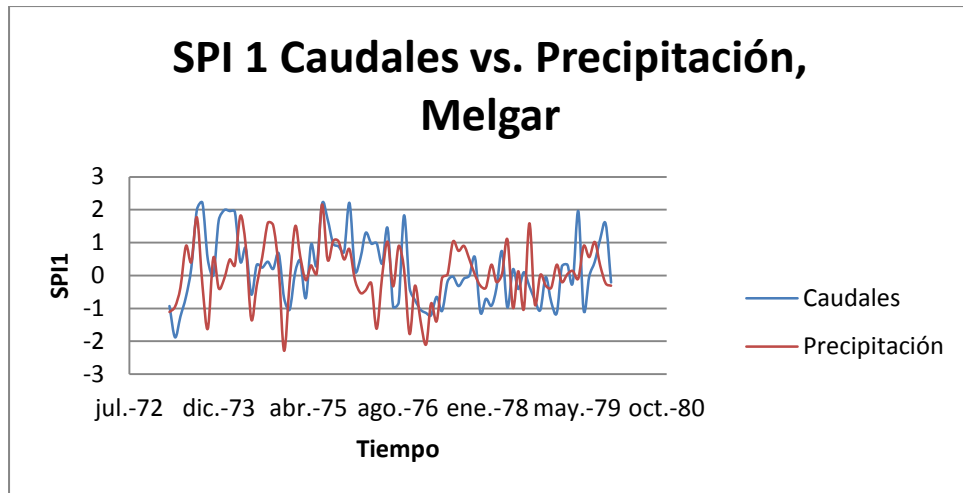
Ventana temporal (meses)			1	3	6	9	12
Coeficiente de correlación	Número de periodos de rezago	0	0.4662	0.4541	0.4426	0.4423	0.4304
		1	0.2569	0.4280	0.4428	0.4470	0.4428

Tabla 50. Resultados comparación series caudales y precipitación, estación Dos Mil

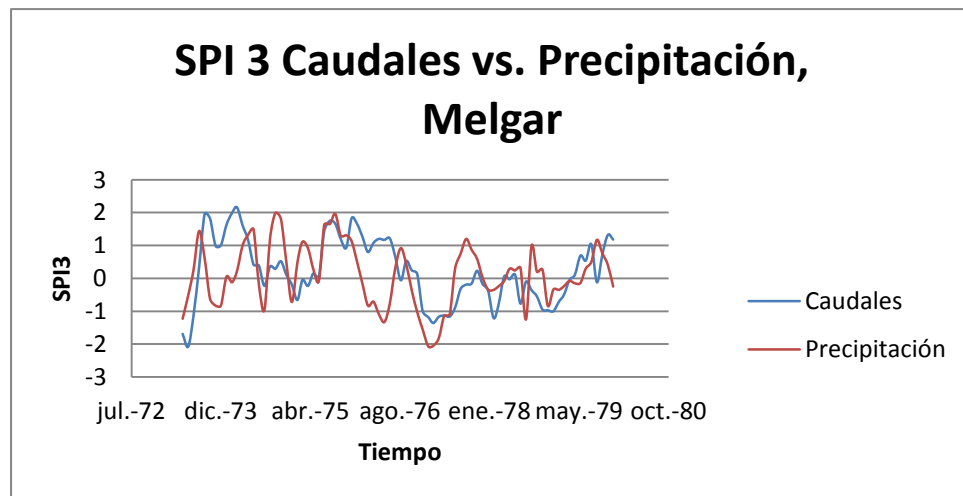
Ventana temporal (meses)	1	3	6	9	12
Coeficiente de correlación	0.3069	0.2617	0.1808	0.1038	0.0089

De acuerdo con las tablas anteriores, puede decirse que la relación entre caudales y precipitación no es evidente en todas las estaciones analizadas, como es el caso de las estaciones Dos Mil y El Limonar. Respecto al rezago de las series de caudales respecto a las de precipitación, puede notarse que, para la mayoría de estaciones y ventanas temporales, se tiene un mejor ajuste al desplazar las series de caudal un período de análisis. Lo anterior implicaría que los efectos en los caudales, de las series de precipitación, toman alrededor de un periodo (dependiendo de la ventana temporal que se tome) en hacerse evidentes. Finalmente, respecto a los mejores ajustes obtenidos para ventanas temporales de 9 y 12 meses en la estación Melgar, se tiene que fue necesario rezagar las series de caudal un número importante de periodos para obtener buenas medidas de bondad de ajuste. Lo anterior, implicaría que en estas zonas el río puede tener aportes importantes de aguas subterráneas por lo que, los efectos de las precipitación toman más tiempo en hacerse evidentes que en otras zonas; igualmente, podría suponerse que las estaciones pluviométricas y climatológicas elegidas para realizar la comparación no son lo suficientemente cercanas y, por esta razón, se presenta esta disconformidad en los resultados.

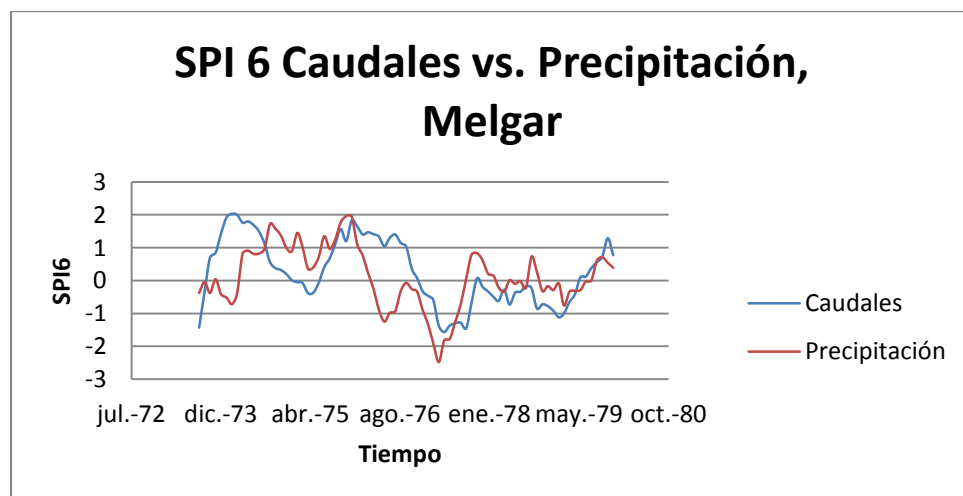
A continuación, se presentan las gráficas en las que se relacionan los índices obtenidos, para series de precipitación y caudales, con el tiempo, para las dos estaciones con las cuales se obtuvieron los mejores ajustes: Melgar y La Playa. Así:



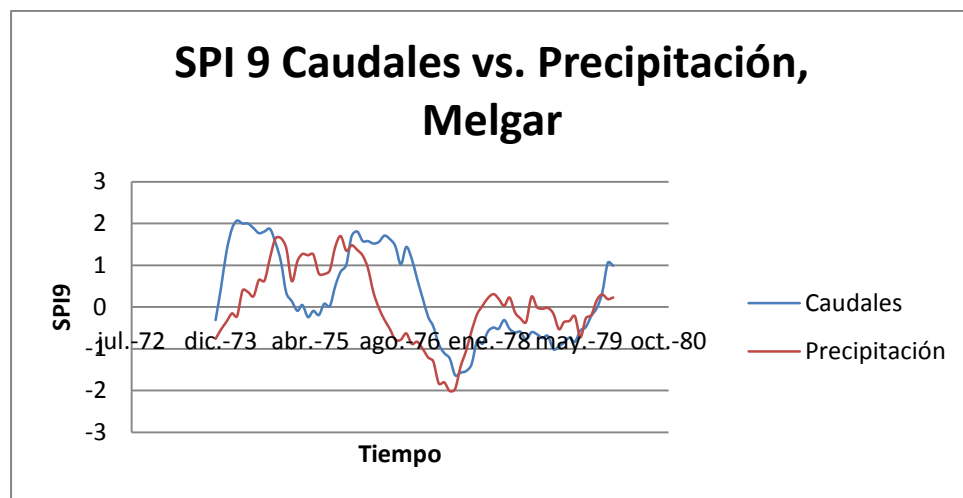
Gráfica 79. Series de índices, ventana temporal 1 mes, estación Melgar



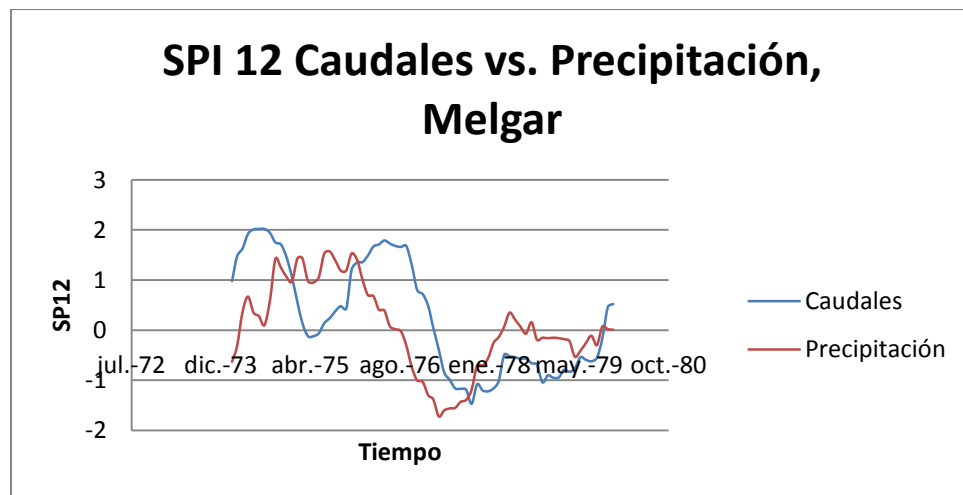
Gráfica 80. Series de índices, ventana temporal 3 meses, estación Melgar



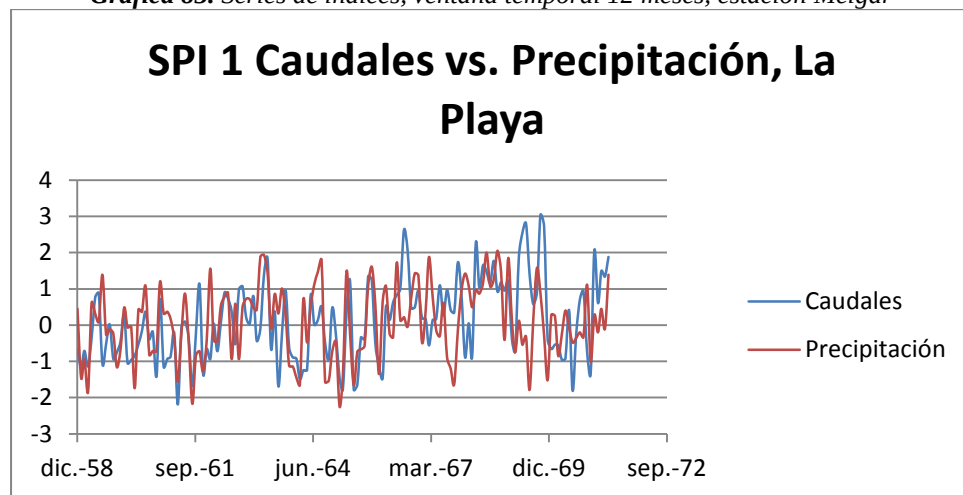
Gráfica 81. Series de índices, ventana temporal 6 meses, estación Melgar



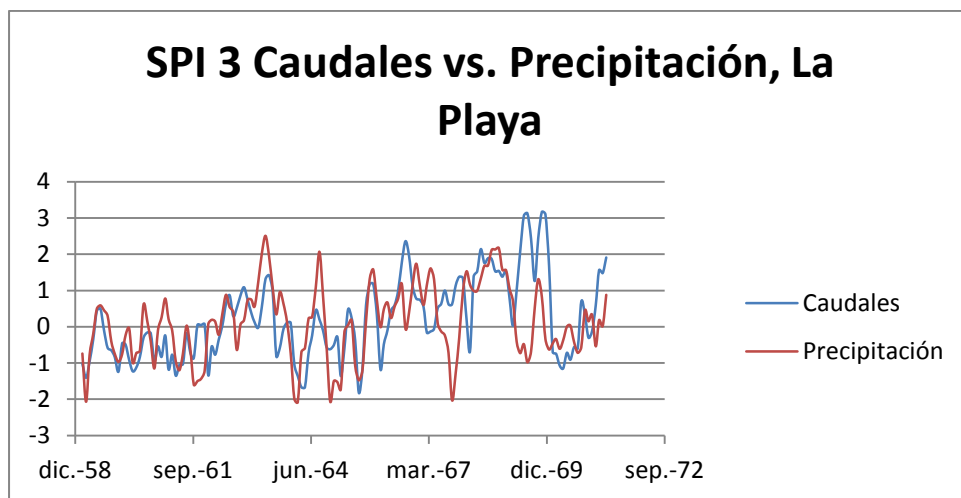
Gráfica 82. Series de índices, ventana temporal 9 meses, estación Melgar



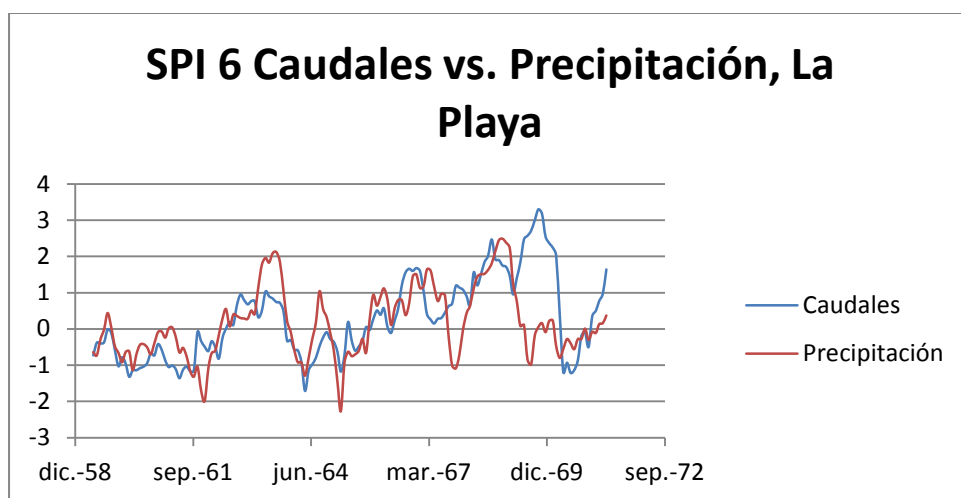
Gráfica 83. Series de índices, ventana temporal 12 meses, estación Melgar



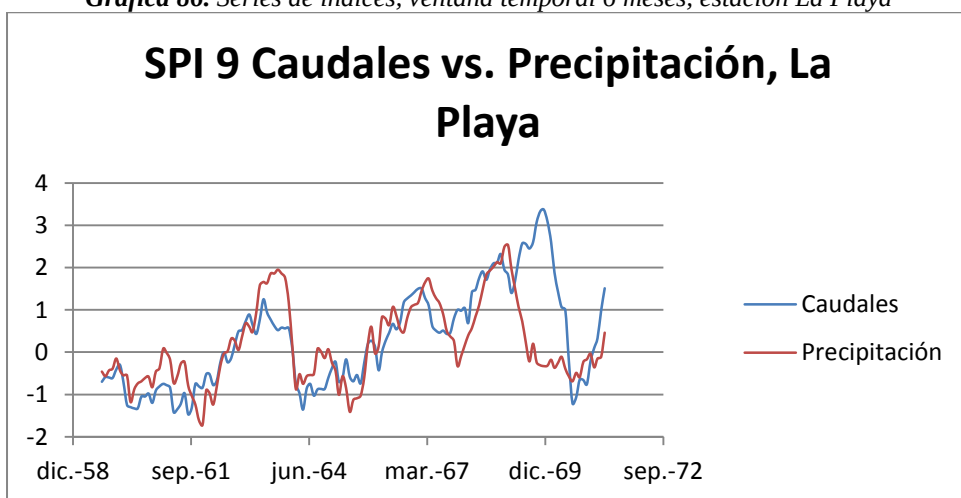
Gráfica 84. Series de índices, ventana temporal 1 mes, estación La Playa



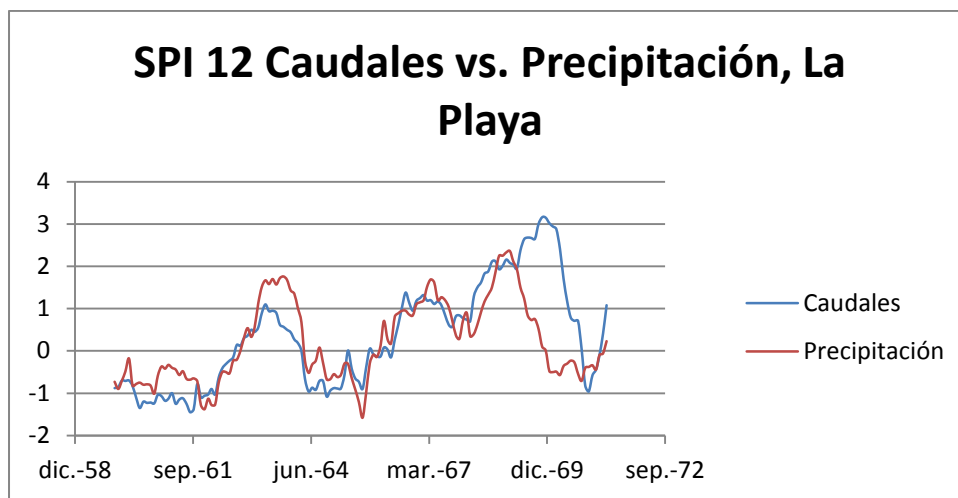
Gráfica 85. Series de índices, ventana temporal 3 meses, estación La Playa



Gráfica 86. Series de índices, ventana temporal 6 meses, estación La Playa

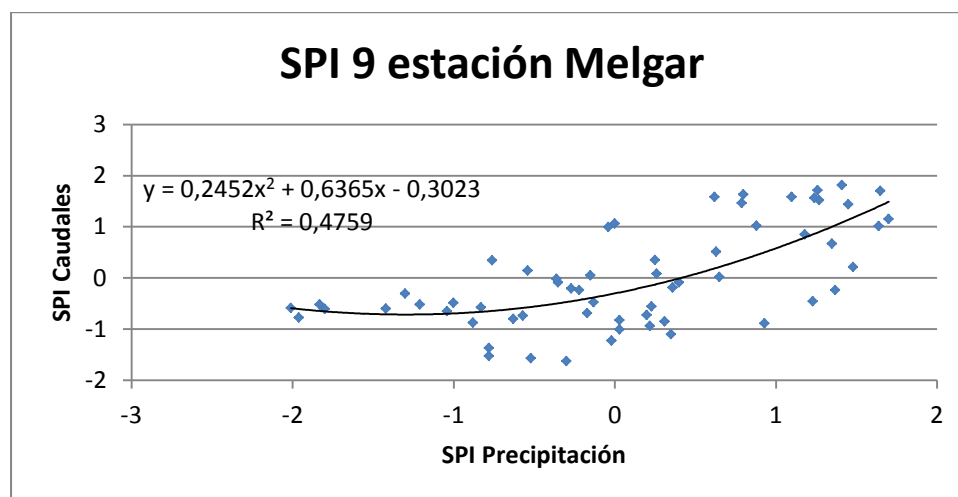


Gráfica 87. Series de índices, ventana temporal 9 meses, estación La Playa

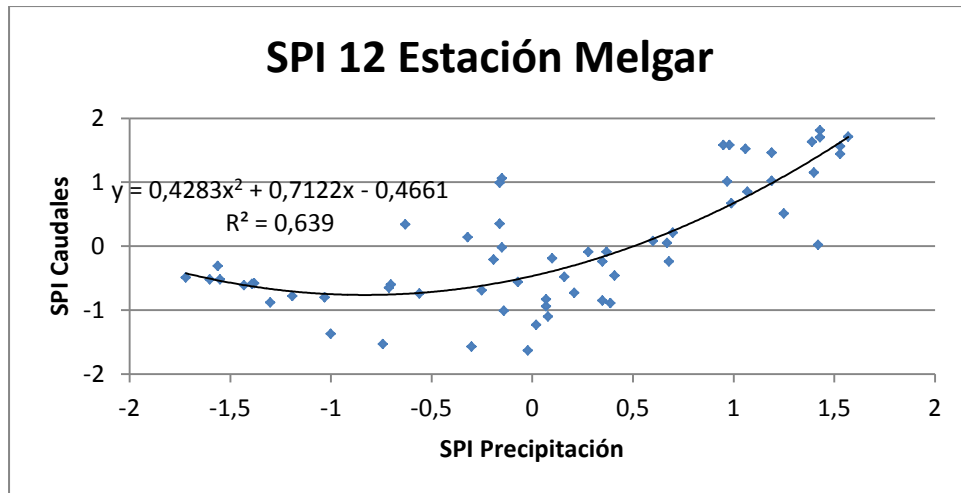


Gráfica 88. Series de índices, ventana temporal 12 meses, estación La Playa

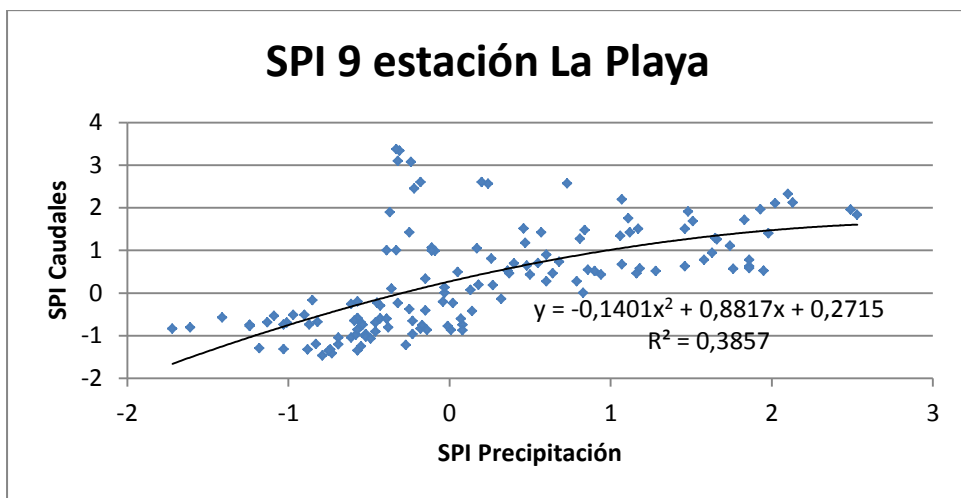
En las gráficas, puede notarse que se presenta un leve desfase entre las series de precipitación y las series de caudal. Lo anterior, confirmaría que se hay un tiempo de retraso entre las señales de precipitación y su efecto en los caudales. Igualmente, puede notarse que el fenómeno de rezago se presenta, de forma más clara, en las escalas temporales mayores, es decir, 9 meses y un año. A continuación se presentan las gráficas que relacionan los valores de SPI obtenidos para series de caudal y precipitación en aquellos casos en los cuales se obtuvieron los dos mayores coeficientes de correlación para cada estación (ver celdas resaltadas en azul en Tabla 46, Tabla 47, Tabla 49):



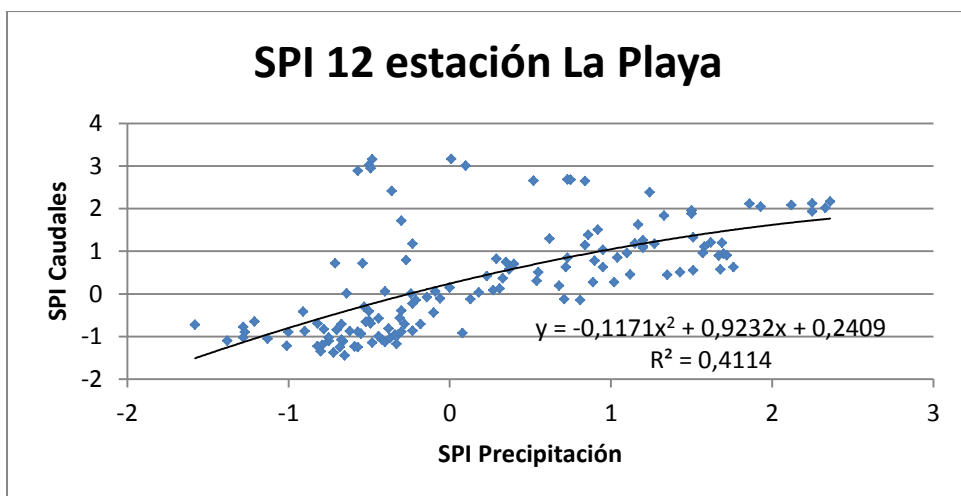
Gráfica 89. Relación SPI 9 meses, estación Melgar



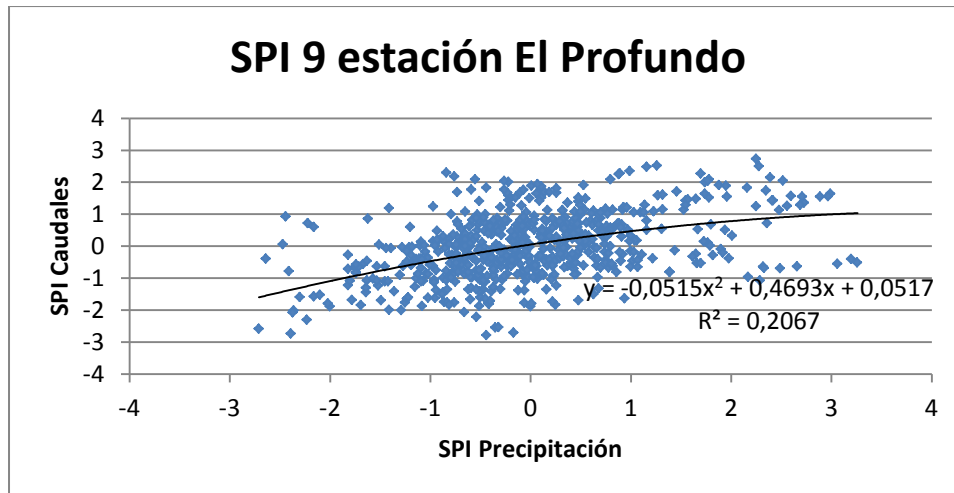
Gráfica 90. Relación SPI 12 meses, estación Melgar



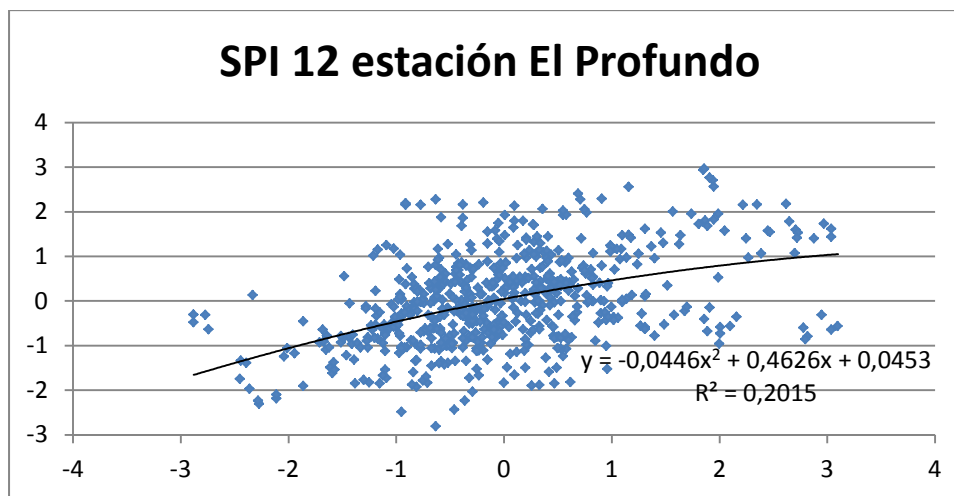
Gráfica 91. Relación SPI 9 meses, estación La Playa



Gráfica 92. Relación SPI 12 meses, estación La Playa



Gráfica 93. Relación SPI 9 meses, estación El Profundo

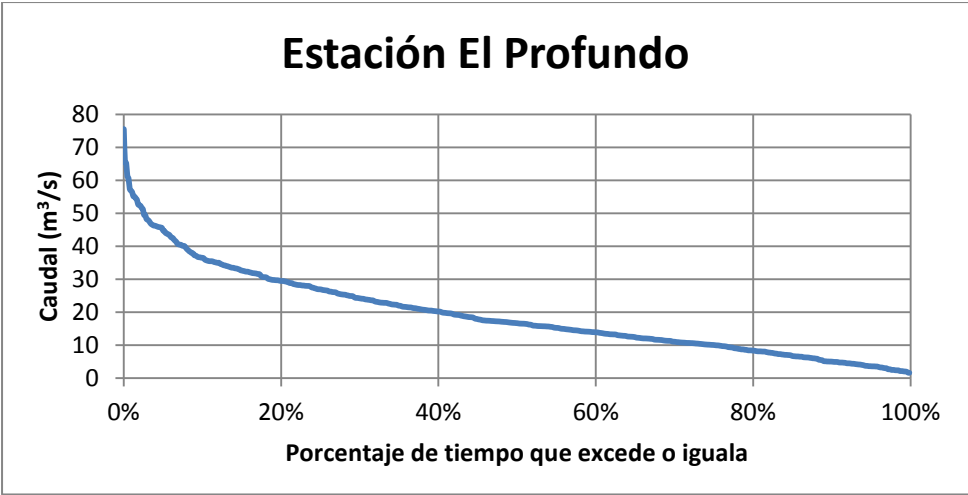


Gráfica 94. Relación SPI 12 meses, estación El Profundo

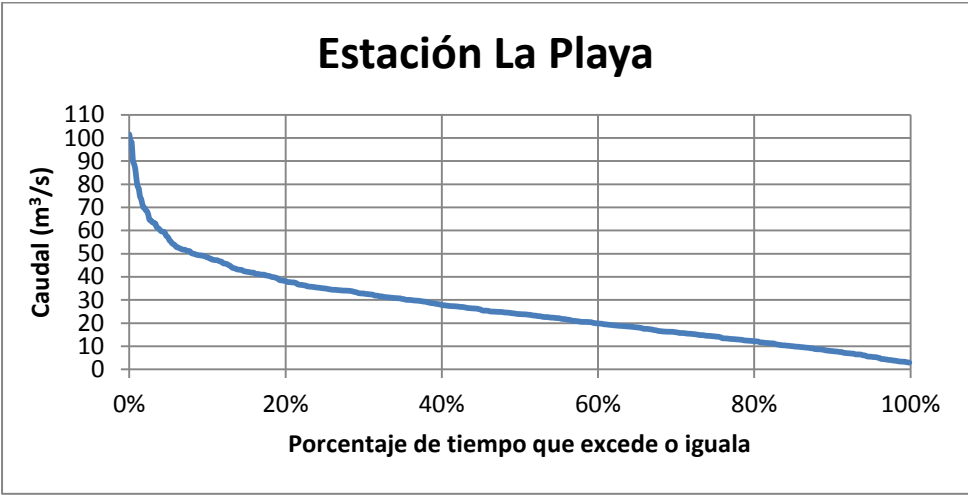
En las anteriores gráficas puede notarse que, aún para aquellas escalas temporales y estaciones con coeficientes de correlación lineales altos, no se obtiene un ajuste adecuado al relacionar las series SPI de caudales y precipitación. Sin embargo, si puede notarse la relación directa que existe entre los dos conjuntos de datos comparados. El hecho de que las gráficas obtenidas sean alargadas, muestra que la reacción de las series de precipitación en el tiempo se da de forma rápida mientras que las de caudales responden más lentamente.

7.6. Recolección de información

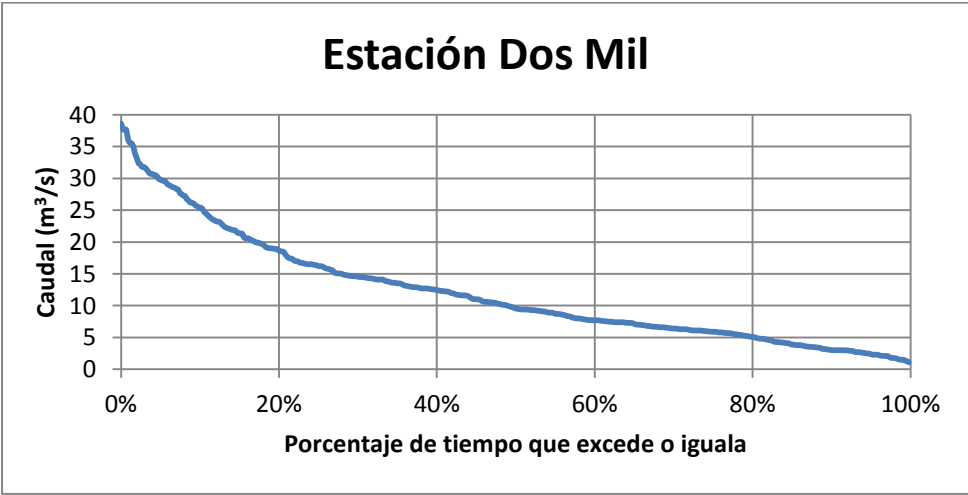
En primer lugar, se presentan las curvas de duración de caudales de las estaciones de estudio:



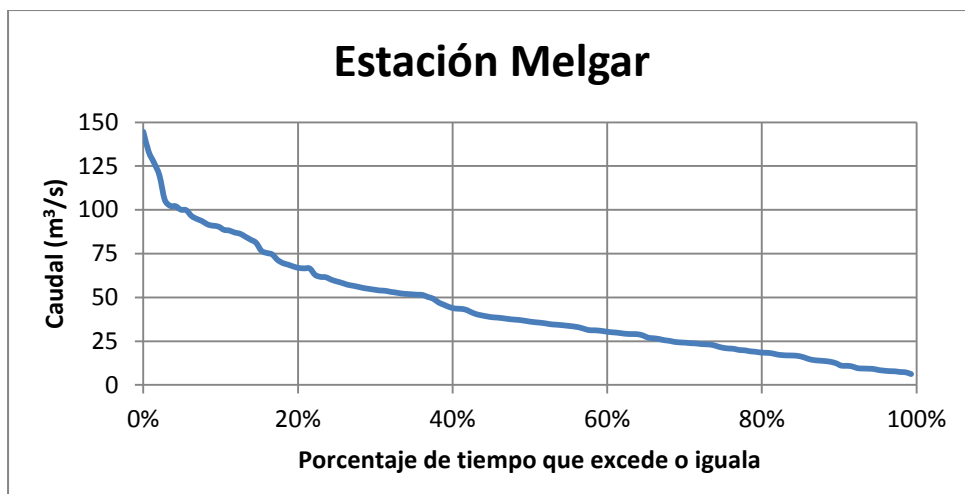
Gráfica 95. Curva de duración de caudales Estación El Profundo



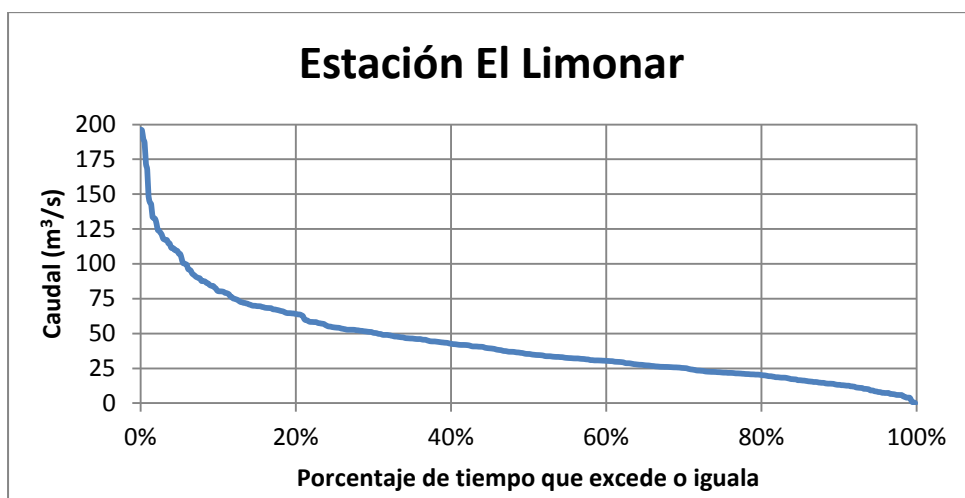
Gráfica 96. Curva de duración de caudales Estación El Profundo



Gráfica 97. Curva de duración de caudales Estación Dos Mil



Gráfica 98. Curva de duración de caudales Estación Melgar



Gráfica 99. Curva de duración de caudales Estación El Limonar

En la sección Anexos, se pueden revisar los caudales correspondientes a los porcentajes de igualación o excedencia cada 10%. Ahora, se realizó la integración de estas curvas de duración y se obtuvieron los siguientes caudales mensuales promedio multianuales:

Tabla 51. Caudales mensuales promedio multianuales hallados

Estación	Q (m³/s)
El Profundo	19.3390
La Playa	26.4552
Dos Mil	12.0468
Melgar	43.9884
El Limonar	43.1090

En cuanto a la información de oferta y demanda, esta se presentó en la sección Metodología. Finalmente, los valores de HDI, DBO, porcentaje de área de la cuenca con vegetación natural y poblaciones actuales y futuras de los municipios de Cabrera y Melgar, se presentan a continuación:

Tabla 52. Parámetros requeridos para cálculo de índices de sostenibilidad de la cuenca y Falkenmark

Parámetro		Valor
HDI total		0.755
DBO (mg/L)		65.22
Población	Melgar 2015	36047
	Cabrera 2015	4598
	Melgar 2020	37523
	Cabrera 2020	4388
Porcentaje de área con cobertura natural		46.0656%

7.5. Evaluación de índices de escasez bajo escenarios actuales

A continuación se presentan los valores de índices obtenidos después de llevar a cabo el procedimiento descrito en Metodología. Los valores empleados para el cálculo y la clasificación que se da al resultado también se presentan:

Tabla 53. Valor Índice Uso Agua para totalidad de cuenca y clasificación, condiciones actuales

Oferta Disponible (Mm ³)	Seco	568	
	Medio	1284	
Demanda total (Mm ³)		82.93	
IUA total	Seco	0.1460	Moderado
	Medio	0.06459	Bajo

Tabla 54. Valores Índice Uso Agua por municipio y clasificación, año medio, condiciones actuales

Oferta Disponible actual medio(Km ³)	Melgar	1095535.13	
	Cabrera	347223.03	
Demanda (Mm ³)	Melgar	2.62	
	Cabrera	0.07	
IUA medio	Melgar	0.002392	Bajo
	Cabrera	0.0002016	Bajo

Tabla 55. Valores Índice Uso Agua por municipio y clasificación, año seco, condiciones actuales

Oferta Disponible actual seco(Km ³)	Melgar	592408.9	
	Cabrera	236657.1	
Demanda (Mm ³)	Melgar	2.62	
	Cabrera	0.07	
IUA seco	Melgar	0.004423	Bajo
	Cabrera	0.0002958	Bajo

Tabla 56. Valores índice Falkenmark por municipio y clasificación, año medio condiciones actuales

Oferta Disponible actual medio(Km ³)	Melgar	1095535.13	
	Cabrera	347223.03	
Población 2015	Melgar	36047	
	Cabrera	4598	
Falkenmark medio actual(m ³ /año-hab)	Melgar	30391.8531	No estresada
	Cabrera	75516.1005	No estresada

Tabla 57. Valores índice Falkenmark por municipio y clasificación, año seco condiciones actuales

Oferta Disponible actual seco(Km ³)	Melgar	592408.9	
	Cabrera	236657.1	
Población 2015	Melgar	36047	
	Cabrera	4598	
Falkenmark seco actual(m ³ /año-hab)	Melgar	16434.3468	No estresada
	Cabrera	51469.5737	No estresada

Tabla 58. Valores asignados a parámetros de presión WSI

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valores posibles	Valor asignado
Hidrología	$\Delta 1$ = Variación en la disponibilidad per cápita de la cuenca en los últimos 5 años (m ³ /persona/año)	$\Delta 1 < -10\%$	0,25	0.5
		$-10\% < \Delta 1 < 0\%$	0,5	
		$0\% < \Delta 1 < 10\%$	0,75	
		$10\% < \Delta 1$	1	
	$\Delta 2$ = Variación en la DBO5 de la cuenca en los últimos 5 años	$\Delta 2 > 10\%$	0,25	0.5
		$0 < \Delta 2 < 10\%$	0,5	
		$-10\% < \Delta 2 < 0\%$	0,75	
		$\Delta 2 < -10\%$	1	
Ambiental	EPI de la cuenca (Rural y urbana)	EPI>10%	0,25	0.5
		$10\% < \text{EPI} < 5\%$	0,5	
		$5\% < \text{EPI} < 0\%$	0,75	
		EPI < 0%	1	
Vida/Humano	Variación en el HDI en los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25	0.5
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5	
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75	
		$10\% < \Delta$	1	
Política	Variación en el HDI en educación en los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25	0.5
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5	
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75	
		$10\% < \Delta$	1	

Tabla 59. Valores asignados a parámetros de estado WSI

Indicador	Parámetros de estado	Nivel	Valor	Valor asignado
Hidrología	Disponibilidad per cápita (WA) de la cuenca (m ³ /persona/año)	WA < 1700	0,25	1
		1700 < WA < 3400	0,5	
		3400 < WA < 5100	0,75	
		5100 < WA	1	
	DBO5 promedio de la cuenca (mg/L)	DBO5 > 10	0,25	0.5
		10 < DBO5 < 5	0,5	
		5 < DBO5 < 3	0,75	
		DBO5 < 3	1	
Ambiental	% del área de la cuenca con vegetación natural (AV)	0 < AV < 10	0,25	1
		10 < AV < 25	0,5	
		25 < AV < 40	0,75	
		40 < AV	1	
Vida/Humano	HDI para la cuenca (dando peso de acuerdo a la población del país)	HDI < 0.6	0,25	0.75
		0.6 < HDI < 0.75	0,5	
		0.75 < Δ < 0.9	0,75	
		0.9 < HDI	1	
Política	Capacidad institucional de la cuenca en manejo de recursos hídricos (WRM)	Pobre	0,25	0.5
		Media	0,5	
		Buena	0,75	
		Excelente	1	

Tabla 60. Valores asignados a parámetros de respuesta WSI

Indicador	Parámetros de respuesta	Nivel	Valor	Valor asignado
Hidrología	Mejora en la eficiencia del uso del agua (últimos 5 años)	Pobre	0,25	0.25
		Media	0,5	
		Buena	0,75	
		Excelente	1	
	Mejora en tratamiento de alcantarillado/disposición (últimos 5 años)	Pobre	0,25	0.25
		Media	0,5	
		Buena	0,75	
		Excelente	1	
Ambiental	Evolución en conservación de la cuenca (áreas protegidas) en últimos 5 años	Δ < -10%	0,25	0.5
		-10% < Δ < 0%	0,5	
		0% < Δ < 10%	0,75	
		10% < Δ	1	
Vida/Humano	Evolución del HDI de la cuenca e los últimos 5 años	Δ < -10%	0,25	0.5
		-10% < Δ < 0%	0,5	
		0% < Δ < 10%	0,75	
		10% < Δ	1	
Política	Evolución de los gastos en WRM de la cuenca en los últimos 5 años	Δ < -10%	0,25	0.5
		-10% < Δ < 0%	0,5	
		0% < Δ < 10%	0,75	
		10% < Δ	1	

Tabla 61. Valores de indicadores e índice de sostenibilidad de la cuenca, condiciones actuales, año seco y medio

Indicador	Valor
<i>H</i>	0.4583
<i>A</i>	0.6667
<i>L</i>	0.5833
<i>P</i>	0.5
<i>WSI</i>	0.5521

De acuerdo con las anteriores tablas puede notarse:

- Los índices que evalúan, únicamente, disponibilidad del recurso, Falkenmark y Uso del Agua, muestran que la cuenca del Sumapaz no presenta problemas de déficit de agua para ninguno de los años considerados, medio o seco.
- Cuando se incluye dentro de la evaluación de los índices aspectos relativos a calidad, gestión, ambiente y sociedad, como es el caso del índice de sostenibilidad de la cuenca, se tiene que la clasificación de la cuenca deja de ser buena y pasa a ser media. Este efecto se ve influenciado, especialmente por valores bajos en el indicador de hidrología donde, las mejoras a los sistemas de alcantarillado e implementación de medidas de uso eficiente del agua resultan igualmente importantes que aspectos relacionados con disponibilidad per cápita del recurso.
- Vale la pena mencionar, que el nivel de desarrollo de la población dentro del área de la cuenca, el porcentaje de la misma con cobertura natural, el nivel de inversión estatal y la capacidad de gestión de las instituciones de control de cuenca afectan el resultado del índice de sostenibilidad de la cuenca.

7.6. Evaluación de índices de escasez bajo escenarios de crecimiento poblacional y variabilidad climática

De acuerdo con los escenarios descritos anteriormente en Metodología, a continuación se presentan los índices obtenidos para escenarios de crecimiento poblacional, variabilidad climática y condiciones de deterioro de ambiental y de gestión de la cuenca:

Tabla 62. Valor Índice Uso Agua para totalidad de cuenca y clasificación, escenario planteado

Oferta Disponible 2020(Mm ³)	Seco	340.8	
	Medio	770.4	
Demanda total (Mm ³)		87.0765	
IUA total 2020	Seco	0.2555	Alto
	Medio	0.1130	Moderado

Tabla 63. Valores Índice Uso Agua por municipio y clasificación, año medio, escenario planteado

Oferta Disponible medio 2020(Km ³)	Melgar	657321.0780	
	Cabrera	208333.8180	
Demanda 2020 (Mm ³)	Melgar	2.7273	
	Cabrera	0.1922	
IUA medio 2020	Melgar	0.0041	Bajo
	Cabrera	0.0009	Bajo

Tabla 64. Valores Índice Uso Agua por municipio y clasificación, año seco, escenario planteado

Oferta Disponible seco 2020(Km ³)	Melgar	355445.34	
	Cabrera	141994.26	
Demanda 2020 (Mm ³)	Melgar	2.7273	
	Cabrera	0.1922	
IUA seco 2020	Melgar	0.007673	Bajo
	Cabrera	0.001354	Bajo

Tabla 65. Valores índice Falkenmark por municipio y clasificación, año medio escenario planteado

Oferta Disponible medio 2020(Km ³)	Melgar	657321.0780	
	Cabrera	208333.8180	
Población 2020	Melgar	37523	
	Cabrera	4388	
Falkenmark medio 2020 (m ³ /año-hab)	Melgar	17517.8178	No estresada
	Cabrera	47478.08067	No estresada

Tabla 66. Valores índice Falkenmark por municipio y clasificación, año seco escenario planteado

Oferta Disponible seco 2020(Km ³)	Melgar	355445.34	
	Cabrera	141994.26	
Población 2020	Melgar	37523	
	Cabrera	4388	
Falkenmark medio 2020 (m ³ /año-hab)	Melgar	9472.7325	No estresada
	Cabrera	32359.6764	No estresada

Tabla 67. Valores asignados a parámetros de presión WSI escenario planteado

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor	Valor asignado
Hidrología	$\Delta 1$ = Variación en la disponibilidad per cápita de la cuenca en los últimos 5 años (m3/persona/año)	$\Delta 1 < -10\%$	0,25	0.5
		$-10\% < \Delta 1 < 0\%$	0,5	
		$0\% < \Delta 1 < 10\%$	0,75	
		$10\% < \Delta 1$	1	
	$\Delta 2$ = Variación en la DBO5 de la cuenca en los últimos 5 años	$\Delta 2 > 10\%$	0,25	0.25
		$0 < \Delta 2 < 10\%$	0,5	
		$-10\% < \Delta 2 < 0\%$	0,75	
		$\Delta 2 < -10\%$	1	
Ambiental	EPI de la cuenca (Rural y urbana)	$EPI > 10\%$	0,25	0.25
		$10\% < EPI < 5\%$	0,5	
		$5\% < EPI < 0\%$	0,75	
		$EPI < 0\%$	1	
Vida/Humano	Variación en el HDI en los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25	0.5
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5	
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75	
		$10\% < \Delta$	1	
Política	Variación en el HDI en educación en los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25	0.5
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5	
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75	
		$10\% < \Delta$	1	

Tabla 68. Valores asignados a parámetros de estado WSI escenario planteado

Indicador	Parámetros de estado	Nivel	Valor	Valor asignado
Hidrología	Disponibilidad per cápita (WA) de la cuenca (m ³ /persona/año)	WA < 1700	0,25	1
		1700 < WA < 3400	0,5	
		3400 < WA < 5100	0,75	
		5100 < WA	1	
	DBO5 promedio de la cuenca (mg/L)	DBO5 > 10	0,25	0.25
		10 < DBO5 < 5	0,5	
		5 < DBO5 < 3	0,75	
		DBO5 < 3	1	
Ambiental	% del área de la cuenca con vegetación natural (AV)	0 < AV < 10	0,25	0.5
		10 < AV < 25	0,5	
		25 < AV < 40	0,75	
		40 < AV	1	
Vida/Humano	HDI para la cuenca (dando peso de acuerdo a la población del país)	HDI < 0.6	0,25	0.75
		0.6 < HDI < 0.75	0,5	
		0.75 < HDI < 0.9	0,75	
		0.9 < HDI	1	
Política	Capacidad institucional de la cuenca en manejo de recursos hídricos (WRM)	Pobre	0,25	0.25
		Media	0,5	
		Buena	0,75	
		Excelente	1	

Tabla 69. Valores asignados a parámetros de estado WSI escenario planteado

Indicador	Parámetros de respuesta	Nivel	Valor	Valor asignado
Hidrología	Mejora en la eficiencia del uso del agua (últimos 5 años)	Pobre	0,25	0.25
		Media	0,5	
		Buena	0,75	
		Excelente	1	
	Mejora en tratamiento de alcantarillado/disposición (últimos 5 años)	Pobre	0,25	0.25
		Media	0,5	
		Buena	0,75	
		Excelente	1	
Ambiental	Evolución en conservación de la cuenca (áreas protegidas) en últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25	0.5
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5	
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75	
		$10\% < \Delta$	1	
Vida/Humano	Evolución del HDI de la cuenca e los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25	0.5
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5	
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75	
		$10\% < \Delta$	1	
Política	Evolución de los gastos en WRM de la cuenca en los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25	0.25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5	
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75	
		$10\% < \Delta$	1	

Tabla 70. Valores de indicadores e índice de sostenibilidad de la cuenca, escenario planteado, año seco y medio

Indicador	Valor
<i>H</i>	0.4167
<i>A</i>	0.4167
<i>L</i>	0.5833
<i>P</i>	0.3333
<i>WSI</i>	0.4375

De acuerdo con los valores encontrados en este caso puede decirse:

- Se observó un cambio en los valores obtenidos en los índices de uso del agua y Falkenmark. En el caso del índice de uso del agua obtenido para toda la cuenca se pasa de una clasificación de escasez moderada a alta mientras que no se presentan cambios para los valores de este índice en los municipios. El índice de Falkenmark, por otro lado, no sufre cambios en la clasificación. Lo anterior implica que, la sensibilidad de los índices que sólo consideran cantidad es mínima frente a efectos de variabilidad climática y crecimiento poblacional. Se recomendaría entonces verificar la población y reducción en la oferta que generaría situaciones de escasez importante en la cuenca de estudio.
- Se presenta una reducción significativa en el valor del índice de sostenibilidad de la cuenca (aproximadamente del 20.6% respecto al valor obtenido inicialmente). Este hecho implica que, los aspectos de gestión de cuenca, calidad del agua en la corriente, protección de áreas en la cuenca e inversión sobre la misma generan efectos importantes en las condiciones de escasez que puedan llegar a presentarse de acuerdo con este índice. La decisión de los pesos que se asignen a cada parámetro en el cálculo de cada indicador resulta de la definición de prioridades y se constituye como una resolución, primordialmente, política.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

A continuación se presentan las principales conclusiones que pudieron extraerse después de la realización de este trabajo. Igualmente, se presentan recomendaciones para el perfeccionamiento del presente o realización de trabajos futuros en el tema.

- Para todas las estaciones pluviométricas y climatológicas analizadas se tiene un régimen hidrológico bimodal con picos invernales entre los meses de Marzo y Mayo y Octubre y Diciembre.
- Respecto a las series de caudales, puede notarse que se presenta un comportamiento similar al régimen de precipitación, con un leve rezago en el primer pico del año, en especial, en las estaciones El Profundo, La Playa y Dos Mil. En las estaciones antes mencionadas, el primer pico tiende a desplazarse un mes pasando a presentarse entre Abril y Junio.
- Es posible notar que para los mismos registros de precipitación los índices de sequía evaluados generan resultados diversos; sin embargo, se encuentran periodos que se repiten para todos, o la mayoría, de los mismos.
- En general, los índices analizados son consistentes en la identificación de eventos de sequía. Igualmente, en las estaciones con series de tiempo más cortas, los índices obtenidos presentan mayor relación entre sí.
- Se presenta una tendencia del índice de porcentaje de normalidad a catalogar un mayor número de eventos como sequías frente a otros índices analizados. Lo anterior puede deberse, a que este índice responde a ligeros cambios en la precipitación lo cuales toman más tiempo en ser evidenciados por otros índices.
- Índices, como el PHDI, muestran eventos de sequía de duración más prolongada que los identificados por medio de otros índices (por ejemplo porcentaje de normalidad). Esto último podría ser causado por el hecho de que el PHDI identifica, en general, sequías hidrológicas que, como se mencionó anteriormente, tienden a ser más extendidas y responder más lentamente a cambios en la precipitación.
- Respecto a la frecuencia de ocurrencia de eventos de sequía en la región estudiada, se puede observar que no existe una tendencia clara que permita suponer que la frecuencia se ha mantenido o variado en el tiempo.
- En las estaciones con registros de precipitación más antiguos (Cabrera y La Playa) se obtuvieron periodos de sequía entre 1964 y 1965. De acuerdo con lo indicado por el IDEAM, en ese intervalo de tiempo se presentó una de las sequías más importantes para la región por lo que se puede decir que los valores obtenidos son consistentes.

- En las estaciones de Ospina Pérez, Carmen de Apicalá, El Salero y Pandi, es posible observar que se obtuvieron índices que indican sequía entre 1972 y 1973; periodo en el que, según el IDEAM, se presentó una sequía extendida en la región.
- En las estaciones Carmen de Apicalá, El Salero, Pandi y Base aérea de Melgar, se obtuvieron valores que indican sequía entre 1976 y 1977 y, según los registros, en ese periodo se tuvo un evento de sequía importante en la zona Andina.
- Puede observarse que, en la mayoría de las estaciones analizadas se obtuvieron periodos secos cerca al año 1997. Este hecho puede deberse a la presencia del fenómeno del Niño; pero, adicionalmente, el IDEAM lo registro como un evento de sequía en la región Andina en el segundo semestre del año.
- La relación que presentan los valores de índices de sequía obtenidos con el registro total e intervalos de 30 años es, predominantemente, lineal. Igualmente, puede notarse que el comportamiento que presenta el SPI es menos variable que el de los índices de Palmer; sin embargo, en todos los casos, los coeficientes de relación obtenidos muestran ser elevados por lo que se considera que esta variabilidad puede ser considerada despreciable.
- El uso del índice de deciles hace que la variabilidad que se presente cuando se realizan las comparaciones con los demás índices aumente. Lo anterior se debe a que los valores discretos de deciles que se asignan contienen un rango amplio de valores de precipitación mientras que, otros índices asignan un único valor a una precipitación disminuyendo la dispersión. Pudo notarse que la relación entre el índice de porcentaje de normalidad y el índice de deciles es lineal y se representó, aproximadamente por una regresión polinomial de segundo orden. Sin embargo, el coeficiente de correlación no resultó lo suficientemente alto para considerar que la relación entre los índices efectivamente exista.
- La relación que se presenta entre los índices de porcentaje de normalidad y estandarizado de precipitación puede ser representada con una función de orden 2 para todas las estaciones evaluadas. Lo anterior, resulta importante si se considera que tanto el índice de porcentaje de normalidad como el índice estandarizado de precipitación resultan relativamente simples de calcular y, ese hecho, los hace los más adecuados para usos operativos.
- Para todos los casos analizados, se presenta una relación clara entre el índice Z y SPI. Esta relación, puede ser representada satisfactoriamente por una función de segundo orden. Finalmente, también se pueden notar relaciones importantes entre el índice de porcentaje de normalidad y Z; así como entre deciles y SPI y deciles y Z.
- No fue posible establecer una relación entre valores obtenidos de SPI y ONI, ni siquiera aplicando rezagos a las series de SPI.
- Las correlaciones que se presentan entre el MEI y los índices evaluados (Palmer) mejoran al realizar el promedio centrado a la izquierda de los índices para dos meses. Igualmente, pudo observarse que la mejor correlación obtenida

correspondió, en dos de los tres casos, a la de PHDI promedio y MEI y, en el caso en cual esta no es la mejor, sí presenta un valor bastante alto. De la misma forma, se aprecian correlaciones altas entre el MEI y el PDSI promedio y bajas entre este y el Z.

- La relación entre SPI hallado con caudales y precipitación no es evidente en todas las estaciones analizadas. Igualmente, pudo notarse que, para la mayoría de estaciones y ventanas temporales, se tiene un mejor ajuste al desplazar las series de caudal un período de análisis. Lo anterior implicaría que los efectos en los caudales, de las series de precipitación, tardan alrededor de un periodo (dependiendo de la ventana temporal que se tome) en hacerse evidentes.
- Los índices de escasez que evalúan, únicamente, disponibilidad del recurso, Falkenmark y Uso del Agua, muestran que la cuenca del Sumapaz no presenta problemas de déficit de agua para ninguno de los años considerados, medio o seco.
- Cuando se incluye dentro de la evaluación de los índices de escasez, aspectos relativos a calidad, gestión, ambiente y sociedad, como es el caso del índice de sostenibilidad de la cuenca, se tiene que la clasificación de la cuenca deja de ser buena y pasa a ser media. Este efecto se ve influenciado, especialmente por valores bajos en el indicador de hidrología donde, las mejoras a los sistemas de alcantarillado e implementación de medidas de uso eficiente del agua resultan igualmente importantes que aspectos relacionados con disponibilidad per cápita del recurso.
- Vale la pena mencionar, que el nivel de desarrollo de la población dentro del área de la cuenca, el porcentaje de la misma con cobertura natural, el nivel de inversión estatal y la capacidad de gestión de las instituciones de control de cuenca afectan el resultado del índice de sostenibilidad de la cuenca.
- Al evaluar el escenario alternativo planteado, se observó un cambio en los valores obtenidos en los índices de uso del agua y Falkenmark. En el caso del índice de uso del agua obtenido para toda la cuenca se pasa de una clasificación de escasez moderada a alta mientras que no se presentan cambios para los valores de este índice en los municipios. El índice de Falkenmark, por otro lado, no sufre cambios en la clasificación. Lo anterior implica que, la sensibilidad de los índices que sólo consideran cantidad es mínima frente a efectos de variabilidad climática y crecimiento poblacional. Se recomendaría entonces verificar la población y reducción en la oferta que generaría situaciones de escasez importante en la cuenca de estudio.
- Se presenta una reducción significativa en el valor del índice de sostenibilidad de la cuenca (aproximadamente del 20.6% respecto al valor obtenido inicialmente) al evaluar las condiciones para el escenario alternativo planteado. Este hecho implica que, los aspectos de gestión de cuenca, calidad del agua en la corriente, protección de áreas en la cuenca e inversión sobre la misma generan efectos importantes en las

condiciones de escasez que puedan llegar a presentarse, de acuerdo con este índice. La decisión de los pesos que se asignen a cada parámetro en el cálculo de cada indicador resulta de la definición de prioridades y se constituye como una resolución, primordialmente, política.

8.2. Recomendaciones

En general, las recomendaciones que pueden hacerse después del desarrollo del presente documento son:

- Resulta recomendable realizar este tipo de ejercicio, tanto de análisis de índices de sequía como de índices de escasez, en las principales cuencas de abastecimiento, de tal forma que se identifiquen amenazas, tanto naturales como antrópicas, que puedan llegar a afectar la disponibilidad de recurso.
- Se recomienda realizar el análisis de índices de escasez en cuencas en las cuales se cuente con mayor información respecto a calidad del agua y desarrollo de la población en la zona con el fin de cuantificar, de forma más exacta, el riesgo de escasez por medio de índices adicionales a los presentados aquí.
- El análisis de comparación de índices de sequía e índices de fenómenos macro climáticos, podría llevarse a cabo utilizando otros de estos últimos y realizando promedios de índices centrados tanto a la derecha como a la izquierda.
- Podría llegar a realizar este mismo tipo de análisis añadiendo la comparación de los valores de índices hallados empleando diversas metodologías de cálculo y/o programas; por ejemplo, índices como SPI o Palmer.
- Realizar un proceso de contraste entre los índices calculados en el presente documento e información evidencial (p.e. información reportada por periódicos y revistas gremiales agrícolas) con el objeto de determinar cuáles de éstos podrían estimar mejor las sequías y condiciones de escasez.

9. Referencias Bibliográficas

- Alley, W. M. (Julio de 1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(7), 1100–1109.
- Assimacopoulos, D. (Marzo de 2004). *Indicators and Indices for decision making in water resources management*. Recuperado el 10 de Abril de 2015, de Water Strategy Man Project: <http://environ.chemeng.ntua.gr/WSM/Newsletters/Issue4/Indicators.htm>
- Barger, L., & Nyhan, J. (1960). *Climatology at work*. Washington D.C.
- Barrera Escoda, A. (2004). *Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Brown, A., & Matlock, M. D. (Abril de 2011). A Review of Water Scarcity Indices and Methodologies. *White Paper*(106).
- Chaves, H. M., & Alipaz, S. (Mayo de 2007). An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index. *Water Resources Management*, 21(5), 883-895.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima . (2010). *Informe integral de avance del Plan de Acción, primer semestre del año 2010*. Ibagué: CORTOLIMA.
- Costa, C., Domínguez, E., Rivera, H., & Vanegas, R. (Noviembre de 2005). El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Revista de Ingeniería*(22), 104-111.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (s.f.). *Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020*. Bogotá: DANE.
- FAO. (s.f.). *ETc bajo condiciones de estrés hídrico*. Recuperado el 30 de Mayo de 2015, de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/x0490s/x0490s03.pdf>
- Gleick, P. (1993). Water and Conflict: Fresh Water Resources and International Security. *International Security*, 18(1), 79-112.
- Gumbel, E. (Marzo de 1963). Statistical forecast of droughts. (T. & Francis, Ed.) *Hydrological Sciences Journal*, 5-23.
- Guttman, N. B. (Febrero de 1998). Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 113–121.
- Heaps, C., Kemp-Benedict, E., & Raskin, P. (1998). *Conventional Worlds: Technical Description of Bending the Curve Scenarios*. Global Scenario Group, Stockholm Environmental Institute. Stockholm: PoleStar.
- Hurtado Moreno, G., & Cadena, M. C. (Marzo de 2002). Aplicación de índices de sequía en Colombia. *Meteorología Colombiana*(5), 131-137.
- IDEAM. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá: IDEAM.

- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010 (ENA 2010)*. Bogotá.
- Iglesias, A. G., Cancelliere, A., Cubillo, F., & Wilhite, D. (Edits.). (2009). *Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems: Drought Management and Policy Development in the Mediterranean*. Springer.
- Indiana State Department of Agriculture. (s.f.). *IN.gov*. Recuperado el 6 de Marzo de 2015, de Review of available drought indices : http://www.in.gov/dnr/files/ws-Final_droughtindices.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2000). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras de Departamento del Tolima*. Bogotá D.C.: IGAC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología. (2000). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras de Departamento de Cundinamarca*. Bogotá D.C.: IGAC.
- Jacobi, J., Perrone, D., Lyons Duncan, L., & Hornberger, G. (2013). A tool for calculating the Palmer drought indices. *Water Resources Research*, 49, 6086–6089.
- Kalbermatten, J., Julius, D., Gunnerson, C., & Mara, D. (1982). *Appropriate sanitation alternatives : a planning and design manual*. Banco Mundial.
- Karl, T. R., & Knight, R. W. (1985). *Atlas of monthly Palmer hydrological drought indices (1931-1983) for the contiguous United States*. Asheville: National Climatic Data Center.
- Meigh, J. R., McKenzie, A. A., & Sene, K. J. (Abril de 1999). A Grid-Based Approach to Water Scarcity Estimates for Eastern and Southern Africa. *Water Resources Management*, 13(2), 85-115.
- Meulenert, Á. (2006). *Condiciones de sequía y precipitaciones en América del Sur durante el período 2004 al 2006*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara, Instituto de Astronomía y Meteorología. Recuperado el 10 de Marzo de 2015, de <http://www.sapoisa.com/Informe%20de%20sequias.pdf>
- Mishra, A., & Singh, V. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hidrology*(391), 202-216.
- National Drought Mitigation Center. (s.f.). *Comparison of Major Drought Indices: Percent of Normal*. Recuperado el 6 de Marzo de 2015, de <http://drought.unl.edu/Planning/Monitoring/ComparisonofIndicesIntro/PercentofNormal.aspx>
- National Drought Mitigation Center. (s.f.). *Program to Calculate Standardized Precipitation Index*. Recuperado el 10 de Abril de 2015, de <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>
- National Drought Mitigation Center. (s.f.). *What is Drought?* Recuperado el 6 de Marzo de 2015, de [drought.unl.edu: http://drought.unl.edu/DroughtBasics/WhatIsDrought.aspx](http://drought.unl.edu/DroughtBasics/WhatIsDrought.aspx)
- North Carolina State University. (s.f.). *State Climate Office of North Carolina*. Recuperado el 6 de Marzo de 2015, de Climate Division Data: <http://www.nc-climate.ncsu.edu/climate/climdiv.php>

- Palmer, W. (1965). Meteorologic Drought. *US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper*(45), 58.
- Panu, U., & Sharma, T. (Agosto de 2002). Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*(47), 19-30.
- Puerto Rodríguez, S. P., & Pimentel Suárez, A. (2006). *Determinación de índices y planteamiento de objetivos de calidad del agua para las cuencas de segundo orden de la jurisdicción de la CAR- Cundinamarca*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Rijsberman, F. R. (2004). Water Scarcity: Fact or Fiction? "New directions for a diverse planet" *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*. Brisbane.
- Rivera, J., & Penalba, O. (2015). El Niño/La Niña events as a tool for regional drought monitoring in Southern South America. En Andreu (Ed.), *Drought: Research and Science-Policy Interfacing* (págs. 293-299). Londres: Taylor & Francis Group.
- Romero Carrascal, M. O., & Uribe Calad, A. F. (2012). *Estrategia de Desarrollo Rural con enfoque territorial Área de Desarrollo Rural del Sumapaz*. Bogotá: Instituto Colombiano de Desarrollo Rural INCODER.
- Schmidt, G., & Benítez-Sanz, C. (26 de Agosto de 2013). *Global Water Forum*. Recuperado el 31 de Marzo de 2015, de How to distinguish water scarcity and drought in EU water policy?: <http://www.globalwaterforum.org/2013/08/26/how-to-distinguish-water-scarcity-and-drought-in-eu-water-policy/>
- Schneider, S. (1996). *Encyclopaedia of Climate and Weather*. New York: Oxford University Press.
- Secretaría General de la Organización de las Naciones Unidas. (1994). United Nations Convention to Combat Drought and Desertification in Countries Experiencing Serious Droughts and/or Desertification, Particularly in Africa. París.
- Shafer, B. A., & E., D. L. (1982). Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. *Proceedings of the 50th Annual Western Snow Conference*. Reno: Western Snow Conference.
- Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2004). *Taking into Account Environmental Water Requirements in Global-scale Water Resources Assessments*. Colombo: International Water Manegment Institute.
- UN Food and Agriculture Organization. (1983). Guidelines: Land evaluation for Rainfed Agriculture. *FAO Soils Bulletin*, 52.
- Vicente-Serrano, S., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J., López-Moreno, J., Azorín-Molina, C., . . . Sánchez-Lorenzo, A. (2012). Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. *Cambio climático. Extremos e impactos. 8º Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología (AEC)* (págs. 679-689). Salamanca: Asociación Española de Climatología.
- Vorosmarty, C. J., Douglas, E. M., Green, P. A., & Revenga, C. (Mayo de 2005). Geospatial Indicators of Emerging Water Stress: An Application to Africa. *AMBIO*, 34(3), 230-236.

- White, C. (7 de Mayo de 2012). *Understanding water scarcity: Definitions and measurements*. Obtenido de Global Water Forum: <http://www.globalwaterforum.org/2012/05/07/understanding-water-scarcity-definitions-and-measurements/>
- World Meteorological Organization. (1983). *Guide to Climatological Practices*. WMO.
- World Meteorological Organization. (1986). *Report on Drought and Countries Affected by Drought During 1974–1985*. Ginebra: WMO.
- World Meteorological Organization. (1992). International Conference on Water and the Environment. *The Dublin statement and record of the Conference*. Genova: WMO.
- World Meteorological Organization. (s.f.). *Climate Data and Data Related Products*. Recuperado el 1 de Junio de 2015, de http://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate_data_and_products.php

10. Anexos

Anexo 1. *Tabla curva de duración de caudales estación El Profundo*

Caudal (m ³ /s)	% Tiempo que es excedido o igualado
1.5838	99.8485%
4.9813	90%
8.3146	80%
11.0180	70%
13.8660	60%
16.6400	50%
20.1780	40%
24.1750	30%
29.4400	20%
36.4730	10%
75.5200	0%

Anexo 2. *Tabla curva de duración de caudales estación La Playa*

Caudal (m ³ /s)	% Tiempo que es excedido o igualado
2.9358	99.8485%
7.9326	90%
12.2088	80%
16.0670	70%
19.8540	60%
23.8950	50%
27.8820	40%
32.8000	30%
38.1740	20%
48.4150	10%
101.5000	0%

Anexo 3. *Tabla curva de duración de caudales estación Dos Mil*

Caudal (m ³ /s)	% Tiempo que es excedido o igualado
1.0987	99.7807%
3.0000	90.1316%
5.0758	80.0439%
6.4000	70.1754%
7.7000	60.0877%
9.5535	50.0000%
12.4281	40.1316%
14.5300	30.0439%
18.5681	20.1754%
25.4000	10.0877%
38.6000	0.0000%

Anexo 4. *Tabla curva de duración de caudales estación Melgar*

Caudal (m³/s)	% Tiempo que es excedido o igualado
6.2060	99.3056%
11.0151	90.2778%
18.5058	79.8611%
24.1346	70.1389%
30.1669	60.4167%
36.1800	50.0000%
43.6840	40.2778%
54.4233	29.8611%
66.8090	20.1389%
88.6263	10.4167%
144.6000	0.0000%

Anexo 5. *Tabla curva de duración de caudales estación El Limonar*

Caudal (m³/s)	% Tiempo que es excedido o igualado
0.0000	99.8299%
13.1253	90.1361%
20.0801	80.1020%
25.1861	70.0680%
30.3300	60.0340%
35.3100	50.0000%
42.4964	40.1361%
50.4011	30.1020%
63.9641	20.0680%
80.3401	10.0340%
196.3000	0.0000%