



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**Análisis detallado de metodologías para definición de índices de sequía y
planteamiento de procedimientos para la calibración de escalas de
gravedad de las mismas: estudio en 2 cuencas de Colombia**

Tesis
Maestría en Ingeniería Civil
Manejo sostenible de recursos hídricos e hidroinformática

Por: Laura Patricia Torres Rojas
Asesor: Mario Díaz-Granados Ortiz

Bogotá D.C., Junio de 2017

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. JUSTIFICACIÓN.....	18
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	19
4. OBJETIVOS	20
4.1. Objetivo general	20
4.2.1. Objetivos específicos	20
5. ESTADO DEL ARTE	21
5.1. Definiciones de sequía	21
5.2. Metodologías de cálculo de índices	21
5.2.1. Índice de porcentaje de normalidad (PN).....	22
5.2.2. Índice estandarizado de precipitación (SPI)	22
5.2.3. Índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI)	24
5.2.4. Índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI)	25
5.2.5. Índice de anomalía de humedad de Palmer (Z)	26
5.2.6. Índice de reconocimiento de sequía (RDI).....	26
5.2.7. Índice de sequía de caudales (SDI).....	27
5.2.8. Índice de deciles de precipitación (DI)	28
5.3. Identificación y características principales de eventos de sequía.....	28
5.4. Comportamiento histórico de la sequía en Colombia	29
5.4.1. Región andina.....	29
5.4.2. Región caribe	29
5.4.3. Región pacífica.....	30
5.4.4. Región Orinoquía-Amazonía	30
5.5. Aproximaciones metodológicas al estudio de sequías	30
5.5.1. Análisis de variabilidad temporal de eventos de sequía.....	30
5.5.2. Curvas Severidad-Área-Frecuencia y Severidad-Duración-Frecuencia.....	31
5.5.3. Uso de índices de condición de vegetación	33
5.6. Software empleado	36
5.6.1. SPI.....	36
5.6.2. Matlab Palmer Drought Indices Calculator	36
5.6.3. TREND.....	37
5.6.4. CEEMDAN.....	38
5.6.5. Otros softwares.....	38
5.7. Casos de estudio	39
5.7.1. Criterios de selección.....	39
5.7.2. Cuenca río Sumapaz	41
5.7.3. Cuenca río Lebrija	42
5.7.6. Información disponible	42
6. METODOLOGÍA.....	44
6.1. Actividades preliminares.....	44
6.2. Análisis detallado de metodologías para el cálculo de índices de sequía	46
6.3. Procedimiento para calibración de escalas de gravedad de series de índices de sequía estudiados	48
7. RESULTADOS	56
7.1. Actividades preliminares.....	56
7.1.1. Análisis de consistencia información hidro meteorológica	56
7.1.2. Series de índices de sequía obtenidas	72
7.2. Análisis detallado de metodologías para el cálculo de índices de sequía	85
7.2.1. Evaluación de variabilidad temporal series de magnitudes	85
7.2.2. Correlaciones cruzadas: índices sequía vs. Índices fenómenos macro climáticos	88
7.2.3. Series de severidad de eventos	92
7.2.4. Comparación entre series de índices de sequía.....	94
7.3. Procedimientos para calibración de escalas de gravedad de series de índices de sequía estudiados...	111

7.3.1. Curvas SDF puntuales	111
7.3.2. Curvas SDF regionales	114
7.3.3. Identificación de eventos de sequía a estudiar.....	151
7.3.4. Determinación de características regionales de eventos de estudio	161
7.3.5. Verificación porcentaje área afectada por eventos analizados: Sumapaz.....	192
7.3.6. Series mensuales de NDVI.....	198
7.3.7. Corrección series AVHRR.....	200
7.3.8. Comparación de series de intensidades y series de NDVI	203
7.3.9. Comparación de series de NDVI y variación en rendimiento de cultivos	234
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	237
8.1. Conclusiones	237
8.1.1. Conclusiones específicas.....	237
8.1.2. Conclusiones generales.....	241
8.2. Recomendaciones	241
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	243
10. ANEXOS	252

Índice de ecuaciones

Ecuación 1	23
Ecuación 2	23
Ecuación 3	23
Ecuación 4	23
Ecuación 5	23
Ecuación 6	26
Ecuación 7	26
Ecuación 8	46
Ecuación 9	54

Índice de figuras

Figura 1. Características eventos de sequía.....	29
Figura 2. Conversión análisis de frecuencia a curvas SDF	33
Figura 3. Interfaz programa SPI.....	36
Figura 4. Interfaz Calculadora índices de Palmer.....	37
Figura 5. Resultados generados CEEMDAN	38
Figura 6. Delimitación área de interés, índices de vegetación MODIS	43
Figura 7. Modelo desarrollado para construcción de curvas SDF regionales	49
Figura 8. Modelo para corte y extracción de valor media, NDVI AVHRR.....	52
Figura 9. Modelo extracción subdataset, corte y extracción de valor medio, NDVI MODIS	53
Figura 10. Correlogramas comparación índices, Pandi.....	95
Figura 11. Correlogramas comparación SDI y SPI, El Profundo	97
Figura 12. Gráficos de dispersión DI vs. PN.....	98
Figura 13. Gráficos de dispersión DI vs. SPI1	101
Figura 14. Gráficos de dispersión SPI1 vs. PN	103
Figura 15. Gráficos de dispersión SPI1 vs. Z	105
Figura 16. Gráficos de dispersión PN vs. Z	106
Figura 17. Gráficos de dispersión SPI6 vs. PDSI.....	106
Figura 18. Gráficos de dispersión SPI6 vs. RDI.....	107
Figura 19. Gráficos de dispersión PDSI vs. RDI.....	107
Figura 20. Gráficos de dispersión SPI9 vs. PHDI	108
Figura 21. Gráficos de dispersión SDI vs. SPI9	108

Índice de gráficas

Gráfica 1. Doble masa precipitación, Base aérea Melgar.....	56
Gráfica 2. Doble masa precipitación, ITUC.....	56

Gráfica 3. Doble masa precipitación, Pandi	56
Gráfica 4. Doble masa precipitación, Peñas blancas.....	56
Gráfica 5. Doble masa precipitación, El salero	57
Gráfica 6. Doble masa precipitación, Carmen de Apicalá	57
Gráfica 7. Doble masa precipitación, Hda La Granja	57
Gráfica 8. Doble masa precipitación, La playa.....	57
Gráfica 9. Doble masa precipitación, Ospina Pérez.....	57
Gráfica 10. Doble masa precipitación, Batán	57
Gráfica 11. Doble masa precipitación, El pinar.....	57
Gráfica 12. Doble masa precipitación, El Tulcán (1).....	57
Gráfica 13. Doble masa precipitación, El Tulcán (2).....	58
Gráfica 14. Doble masa precipitación, San Juan	58
Gráfica 15. Doble masa precipitación, Quebrada Negra.....	58
Gráfica 16. Doble masa precipitación, ITA Valsalice	58
Gráfica 17. Doble masa precipitación, Nilo	58
Gráfica 18. Doble masa precipitación, Nuñez.....	58
Gráfica 19. Doble masa caudal, Melgar.....	59
Gráfica 20. Doble masa caudal, La Playa	59
Gráfica 21. Doble masa caudal, El limonar.....	59
Gráfica 22. Doble masa caudal, Dos mil.....	59
Gráfica 23. Doble masa temperatura, Peñas blancas	59
Gráfica 24. Doble masa temperatura, Base aérea Melgar	59
Gráfica 25. Doble masa temperatura, ITA Valsalice	59
Gráfica 26. Doble masa precipitación, Magara	63
Gráfica 27. Doble masa precipitación, Campohermoso.....	63
Gráfica 28. Doble masa precipitación, Provincia PM.....	63
Gráfica 29. Doble masa precipitación, La norma	63
Gráfica 30. Doble masa precipitación, Papayal.....	63
Gráfica 31. Doble masa precipitación, Hda Palmeras.....	63
Gráfica 32. Doble masa precipitación, San Rafael	64
Gráfica 33. Doble masa precipitación, San Ignacio.....	64
Gráfica 34. Doble masa precipitación, La urbina	64
Gráfica 35. Doble masa precipitación, Sabana de Torres.....	64
Gráfica 36. Doble masa precipitación, Provincia CO	64
Gráfica 37. Doble masa precipitación, Vivero Suratá.....	64
Gráfica 38. Doble masa precipitación, Llano grande.....	64
Gráfica 39. Doble masa precipitación, Esc. Agrícola Cachira	64
Gráfica 40. Doble masa precipitación, Cachirí CO	65
Gráfica 41. Doble masa precipitación, El Libano.....	65
Gráfica 42. Doble masa precipitación, Matanza.....	65
Gráfica 43. Doble masa precipitación, Vetas	65
Gráfica 44. Doble masa precipitación, Limoncito	65
Gráfica 45. Doble masa precipitación, El picacho.....	65
Gráfica 46. Doble masa precipitación, Matajira	65
Gráfica 47. Doble masa precipitación, Portachuelo.....	65
Gráfica 48. Doble masa precipitación, La Galvicia	66
Gráfica 49. Doble masa precipitación, El naranjo	66
Gráfica 50. Doble masa precipitación, Vetas-El pozo	66
Gráfica 51. Doble masa precipitación, San Alberto.....	66
Gráfica 52. Doble masa precipitación, El caobo	66
Gráfica 53. Doble masa precipitación, La dorada.....	66
Gráfica 54. Doble masa precipitación, La cooperativa	66
Gráfica 55. Doble masa precipitación, La vega.....	66
Gráfica 56. Doble masa precipitación, El pantano	67

Gráfica 57. Doble masa precipitación, Barranca-Lebrija.....	67
Gráfica 58. Doble masa precipitación, Los planes	67
Gráfica 59. Doble masa precipitación, Planta eléctrica.....	67
Gráfica 60. Doble masa precipitación, Tona.....	67
Gráfica 61. Doble masa precipitación, Esc. agropecuaria	67
Gráfica 62. Doble masa precipitación, Cachimí.....	67
Gráfica 63. Doble masa precipitación, La laguna.....	67
Gráfica 64. Doble masa precipitación, Palo gordo	68
Gráfica 65. Doble masa precipitación, Llano de palmas.....	68
Gráfica 66. Doble masa precipitación, Palmas.....	68
Gráfica 67. Serie PN, Base aérea Melgar.....	72
Gráfica 68. Serie DI, Base aérea Melgar.....	72
Gráfica 69. Serie SPI1, Base aérea Melgar	72
Gráfica 70. Serie SPI3, Base aérea Melgar	72
Gráfica 71. Serie SPI6, Base aérea Melgar	72
Gráfica 72. Serie SPI9, Base aérea Melgar	72
Gráfica 73. Serie Z, Base aérea Melgar	73
Gráfica 74. Serie PDSI, Base aérea Melgar	73
Gráfica 75. Serie PHDI, Base aérea Melgar.....	73
Gráfica 76. Serie RDI, Base aérea Melgar	73
Gráfica 77. Serie PN, Pandi	73
Gráfica 78. Serie DI, Pandi	73
Gráfica 79. Serie SPI1, Pandi.....	73
Gráfica 80. Serie SPI3, Pandi.....	73
Gráfica 81. Serie SPI6, Pandi.....	74
Gráfica 82. Serie SPI9, Pandi.....	74
Gráfica 83. Serie Z, Pandi.....	74
Gráfica 84. Serie PDSI, Pandi.....	74
Gráfica 85. Serie PHDI, Pandi	74
Gráfica 86. Serie RDI, Pandi.....	74
Gráfica 87. Serie PN, Peñas blancas CO.....	74
Gráfica 88. Serie DI, Peñas blancas CO	74
Gráfica 89. Serie SPI1, Peñas blancas CO	75
Gráfica 90. Serie SPI3, Peñas blancas CO	75
Gráfica 91. Serie SPI6, Peñas blancas CO	75
Gráfica 92. Serie SPI9, Peñas blancas CO	75
Gráfica 93. Serie Z, Peñas blancas CO	75
Gráfica 94. Serie PDSI, Peñas blancas CO	75
Gráfica 95. Serie PHDI, Peñas blancas CO.....	75
Gráfica 96. Serie RDI, Peñas blancas CO.....	75
Gráfica 97. Serie PN, ITA Valsalice.....	76
Gráfica 98. Serie DI, ITA Valsalice	76
Gráfica 99. Serie SPI1, ITA Valsalice	76
Gráfica 100. Serie SPI3, ITA Valsalice	76
Gráfica 101. Serie SPI6, ITA Valsalice	76
Gráfica 102. Serie SPI9, ITA Valsalice	76
Gráfica 103. Serie Z, ITA Valsalice	76
Gráfica 104. Serie PDSI, ITA Valsalice	76
Gráfica 105. Serie PHDI, ITA Valsalice.....	77
Gráfica 106. Serie RDI, ITA Valsalice	77
Gráfica 107. Serie SDI, El profundo.....	77
Gráfica 108. Serie SDI, Melgar.....	77
Gráfica 109. Serie SDI, La playa.....	77
Gráfica 110. Serie SDI, Limonar.....	77

Gráfica 111. Serie SDI, Dos mil.....	77
Gráfica 112. Serie PN, Provincia.....	78
Gráfica 113. Serie SPI3, Provincia.....	78
Gráfica 114. Serie SPI1, Provincia.....	78
Gráfica 115. Serie SPI9, Provincia.....	78
Gráfica 116. Serie SPI6, Provincia.....	78
Gráfica 117. Serie PDSI, Provincia.....	78
Gráfica 118. Serie Z, Provincia.....	78
Gráfica 119. Serie RDI, Provincia.....	78
Gráfica 120. Serie PHDI, Provincia.....	79
Gráfica 121. Serie PN, Vivero Surata.....	79
Gráfica 122. Serie SPI3, Vivero Surata.....	79
Gráfica 123. Serie SPI1, Vivero Surata.....	79
Gráfica 124. Serie SPI9, Vivero Surata.....	79
Gráfica 125. Serie SPI6, Vivero Surata.....	79
Gráfica 126. Serie PDSI, Vivero Surata.....	79
Gráfica 127. Serie Z, Vivero Surata.....	80
Gráfica 128. Serie RDI, Vivero Surata.....	80
Gráfica 129. Serie PHDI, Vivero Surata.....	80
Gráfica 130. Serie PN, Llano grande.....	80
Gráfica 131. Serie SPI3, Llano grande.....	80
Gráfica 132. Serie SPI1, Llano grande.....	80
Gráfica 133. Serie SPI9, Llano grande.....	80
Gráfica 134. Serie SPI6, Llano grande.....	81
Gráfica 135. Serie PDSI, Llano grande.....	81
Gráfica 136. Serie Z, Llano grande.....	81
Gráfica 137. Serie RDI, Llano grande.....	81
Gráfica 138. Serie PHDI, Llano grande.....	81
Gráfica 139. Serie PN, Esc. agr. Cachira.....	81
Gráfica 140. Serie SPI3, Esc. agr. Cachira.....	81
Gráfica 141. Serie SPI1, Esc. agr. Cachira.....	82
Gráfica 142. Serie SPI9, Esc. agr. Cachira.....	82
Gráfica 143. Serie SPI6, Esc. agr. Cachira.....	82
Gráfica 144. Serie PDSI, Esc. agr. Cachira.....	82
Gráfica 145. Serie Z, Esc. agr. Cachira.....	82
Gráfica 146. Serie RDI, Esc. agr. Cachira.....	82
Gráfica 147. Serie PHDI, Esc. agr. Cachira.....	82
Gráfica 148. Serie PN, Cachirí.....	83
Gráfica 149. Serie SPI3, Cachirí.....	83
Gráfica 150. Serie SPI1, Cachirí.....	83
Gráfica 151. Serie SPI9, Cachirí.....	83
Gráfica 152. Serie SPI6, Cachirí.....	83
Gráfica 153. Serie PDSI, Cachirí.....	83
Gráfica 154. Serie Z, Cachirí.....	83
Gráfica 155. Serie RDI, Cachirí.....	83
Gráfica 156. Serie PHDI, Cachirí.....	84
Gráfica 157. Serie SDI, La Urbina.....	84
Gráfica 158. Serie SDI, Café Madrid.....	84
Gráfica 159. Serie SDI, Angosturas.....	84
Gráfica 160. Serie SDI, San Rafael.....	84
Gráfica 161. Correlaciones cruzadas PN/NAO, Pandi.....	88
Gráfica 162. Correlaciones cruzadas PDSI/NAO, Pandi.....	88
Gráfica 163. Correlaciones cruzadas PHDI/NAO, Pandi.....	89
Gráfica 164. Correlaciones cruzadas SOI/RDI, Peñas blancas.....	90

Gráfica 165. Correlaciones cruzadas SOI/PHDI, Peñas blancas	90
Gráfica 166. Correlaciones cruzadas SOI/PDSI, Peñas blancas	90
Gráfica 167. Correlaciones cruzadas SOI/Z, Peñas blancas.....	90
Gráfica 168. Correlaciones cruzadas SOI/SPI1,Peñas blancas.....	90
Gráfica 169. Correlaciones cruzadas SOI/DI, Peñas blancas	90
Gráfica 170. Correlaciones cruzadas SOI/PN, Peñas blancas	91
Gráfica 171. Correlaciones cruzadas SOI/SST 3.4 anomalía	91
Gráfica 172. Severidad PN, Base aérea Melgar	92
Gráfica 173. Severidad PN, Pandi	92
Gráfica 174. Severidad PN, Peñas blancas.....	92
Gráfica 175. Severidad PN, ITA Valsalice	92
Gráfica 176. Severidad DI, Base aérea Melgar	92
Gráfica 177. Severidad DI, Pandi	92
Gráfica 178. Severidad DI, Peñas blancas	93
Gráfica 179. Severidad DI, ITA Valsalice	93
Gráfica 180. Severidad PN, Provincia	93
Gráfica 181. Severidad PN, Vivero Suratá.....	93
Gráfica 182. Severidad PN, Llano grande.....	93
Gráfica 183. Severidad PN, Esc. Agr. Cachira.....	93
Gráfica 184. Severidad PN, Cachirí.....	93
Gráfica 185. Severidad SPI1, Provincia.....	93
Gráfica 186. Severidad SPI1, Vivero Suratá.....	94
Gráfica 187. Severidad SPI1, Llano grande	94
Gráfica 188. Severidad SPI1, Esc. Agr. Cachira	94
Gráfica 189. Severidad SPI1 Cachirí.....	94
Gráfica 190. Análisis mensual, relación SPI1 vs. PN, Pandi.....	110
Gráfica 191. Curva SDF, PN, Base aérea Melgar.....	111
Gráfica 192. Curva SDF, PN, Pandi	111
Gráfica 193. Curva SDF, PN, Peñas blancas.....	112
Gráfica 194. Curva SDF, PN, ITA Valsalice	112
Gráfica 195. Curva SDF, PN, El salero	112
Gráfica 196. Curva SDF, PN, Carmen de Apicalá	112
Gráfica 197. Curva SDF, PN, Hda La Granja	112
Gráfica 198. Curva SDF, PN, La playa.....	112
Gráfica 199. Curva SDF, PN, Ospina Pérez.....	112
Gráfica 200. Curva SDF, PN, Cabrera.....	112
Gráfica 201. Curva SDF, PN, Batán.....	113
Gráfica 202. Curva SDF, PN, Pinar.....	113
Gráfica 203. Curva SDF, PN, Tulcán	113
Gráfica 204. Curva SDF, PN, San Juan	113
Gráfica 205. Curva SDF, PN, Qda Negra	113
Gráfica 206. Curva SDF, PN, Nilo	113
Gráfica 207. Curva SDF, PN, Nuñez.....	113
Gráfica 208. Curva SDF, PN, Tibacuy	113
Gráfica 209. Curva SDF, PN, ITUC.....	114
Gráfica 210. Curva SDF regional, PN, Sumapaz	129
Gráfica 211. Curva SDF regional, SPI1, Sumapaz.....	129
Gráfica 212. Curva SDF regional, SPI3, Sumapaz.....	129
Gráfica 213. Curva SDF regional, SPI6, Sumapaz.....	130
Gráfica 214. Curva SDF regional, SPI9, Sumapaz.....	130
Gráfica 215. Curva SDF regional, Z, Sumapaz	130
Gráfica 216. Curva SDF regional, PDSI, Sumapaz	131
Gráfica 217. Curva SDF regional, PHDI, Sumapaz	131
Gráfica 218. Curva SDF regional, RDI, Sumapaz.....	131

Gráfica 219. Curva SDF regional, SDI, Sumapaz	132
Gráfica 220. Curva SDF regional, PN, Lebrija	146
Gráfica 221. Curva SDF regional, SPI1, Lebrija	146
Gráfica 222. Curva SDF regional, SPI3, Lebrija	146
Gráfica 223. Curva SDF regional, SPI6, Lebrija	147
Gráfica 224. Curva SDF regional, SPI9, Lebrija	147
Gráfica 225. Curva SDF regional, Z, Lebrija	147
Gráfica 226. Curva SDF regional, PDSI, Lebrija	148
Gráfica 227. Curva SDF regional, PHDI, Lebrija	148
Gráfica 228. Curva SDF regional, RDI, Lebrija	148
Gráfica 229. Curva SDF regional, SDI, Lebrija	149
Gráfica 230. Serie severidades y duraciones regionales, PN, Sumapaz	162
Gráfica 231. Serie severidades y duraciones regionales, SPI1, Sumapaz	162
Gráfica 232. Serie severidades y duraciones regionales, SPI3, Sumapaz	162
Gráfica 233. Serie severidades y duraciones regionales, Z, Sumapaz	162
Gráfica 234. Serie severidades y duraciones regionales, SPI6, Sumapaz	163
Gráfica 235. Serie severidades y duraciones regionales, PDSI, Sumapaz	163
Gráfica 236. Serie severidades y duraciones regionales, RDI, Sumapaz	163
Gráfica 237. Serie severidades y duraciones regionales, SPI6, Sumapaz	164
Gráfica 238. Serie severidades y duraciones regionales, PDSI, Sumapaz	164
Gráfica 239. Serie severidades y duraciones regionales, RDI, Sumapaz	164
Gráfica 240. Serie severidades y duraciones regionales, PN, Lebrija	165
Gráfica 241. Serie severidades y duraciones regionales, SPI1, Lebrija	165
Gráfica 242. Serie severidades y duraciones regionales, SPI3, Lebrija	165
Gráfica 243. Serie severidades y duraciones regionales, Z, Lebrija	165
Gráfica 244. Serie severidades y duraciones regionales, SPI6, Lebrija	166
Gráfica 245. Serie severidades y duraciones regionales, PDSI, Lebrija	166
Gráfica 246. Serie severidades y duraciones regionales, RDI, Lebrija	166
Gráfica 247. Serie severidades y duraciones regionales, SPI9, Lebrija	167
Gráfica 248. Serie severidades y duraciones regionales, PHDI, Lebrija	167
Gráfica 249. Serie severidades y duraciones regionales, SDI, Lebrija	167
Gráfica 250. Serie intensidades regionales, PN, Sumapaz	168
Gráfica 251. Serie intensidades regionales, SPI1, Sumapaz	168
Gráfica 252. Serie intensidades regionales, SPI3, Sumapaz	168
Gráfica 253. Serie intensidades regionales, Z, Sumapaz	168
Gráfica 254. Serie intensidades regionales, SPI6, Sumapaz	169
Gráfica 255. Serie intensidades regionales, PDSI, Sumapaz	169
Gráfica 256. Serie intensidades regionales, RDI, Sumapaz	169
Gráfica 257. Serie intensidades regionales, SPI6, Sumapaz	170
Gráfica 258. Serie intensidades regionales, PDSI, Sumapaz	170
Gráfica 259. Serie intensidades regionales, RDI, Sumapaz	170
Gráfica 260. Serie intensidades regionales, PN, Lebrija	171
Gráfica 261. Serie intensidades regionales, SPI1, Lebrija	171
Gráfica 262. Serie intensidades regionales, SPI3, Lebrija	171
Gráfica 263. Serie intensidades regionales, Z, Lebrija	171
Gráfica 264. Serie intensidades regionales, SPI6, Lebrija	172
Gráfica 265. Serie intensidades regionales, PDSI, Lebrija	172
Gráfica 266. Serie intensidades regionales, RDI, Lebrija	172
Gráfica 267. Serie intensidades regionales, SPI9, Lebrija	173
Gráfica 268. Serie intensidades regionales, PHDI, Lebrija	173
Gráfica 269. Serie intensidades regionales, SDI, Lebrija	173
Gráfica 270. Eventos regionales PN Sumapaz, duraciones de 1 a 2 meses	174
Gráfica 271. Eventos regionales PN Sumapaz, duraciones de 2 a 4.5 meses	175
Gráfica 272. Eventos regionales SPI1 Sumapaz, duraciones de 1 a 2 meses	175

Gráfica 273. Eventos regionales SPI1 Sumapaz, duraciones de 2 a 7.5 meses	176
Gráfica 274. Eventos regionales SPI3 Sumapaz.....	176
Gráfica 275. Eventos regionales SPI6 Sumapaz.....	177
Gráfica 276. Eventos regionales SPI9 Sumapaz.....	177
Gráfica 277. Eventos regionales Z Sumapaz, duraciones de 1 a 3 meses	178
Gráfica 278. Eventos regionales Z Sumapaz, duraciones de 3 a 7 meses	178
Gráfica 279. Eventos regionales PDSI Sumapaz.....	179
Gráfica 280. Eventos regionales PHDI Sumapaz	179
Gráfica 281. Eventos regionales RDI Sumapaz	180
Gráfica 282. Eventos regionales SDI Sumapaz.....	180
Gráfica 283. Eventos regionales PN Lebrija, duraciones de 1 a 2 meses.....	181
Gráfica 284. Eventos regionales PN Lebrija, duraciones de 2 a 3 meses.....	181
Gráfica 285. Eventos regionales PN Lebrija, duraciones de 3 a 6 meses.....	182
Gráfica 286. Eventos regionales SPI1 Lebrija, duraciones de 1 a 2 meses	182
Gráfica 287. Eventos regionales SPI1 Lebrija, duraciones de 2 a 3.5 meses	183
Gráfica 288. Eventos regionales SPI1 Lebrija, duraciones de 3.5 a 5.5 meses.....	183
Gráfica 289. Eventos regionales SPI3 Lebrija.....	184
Gráfica 290. Eventos regionales SPI6 Lebrija.....	184
Gráfica 291. Eventos regionales SPI6 Lebrija.....	185
Gráfica 292. Eventos regionales Z Lebrija, duraciones de 1 a 2.5 meses	185
Gráfica 293. Eventos regionales Z Lebrija, duraciones de 2.5 a 5.5 meses.....	186
Gráfica 294. Eventos regionales PDSI Lebrija.....	186
Gráfica 295. Eventos regionales PHDI Lebrija	187
Gráfica 296. Eventos regionales RDI Lebrija	187
Gráfica 297. Eventos regionales SDI Lebrija.....	188
Gráfica 298. Comparación PN, Sumapaz.....	190
Gráfica 299. Comparación SPI1, Sumapaz.....	191
Gráfica 300. Comparación SPI3, Sumapaz.....	191
Gráfica 301. Comparación SPI6, Sumapaz	191
Gráfica 302. Comparación SPI9, Sumapaz	191
Gráfica 303. Comparación Z, Sumapaz	191
Gráfica 304. Comparación PDSI, Sumapaz	192
Gráfica 305. Comparación PHDI, Sumapaz.....	192
Gráfica 306. Comparación RDI, Sumapaz.....	192
Gráfica 307. Curvas Severidad-Área, PN, Sumapaz.....	193
Gráfica 308. Curvas Severidad-Área, SPI1, Sumapaz.....	194
Gráfica 309. Curvas Severidad-Área, SPI3, Sumapaz.....	194
Gráfica 310. Curvas Severidad-Área, SPI6, Sumapaz.....	195
Gráfica 311. Curvas Severidad-Área, SPI9, Sumapaz.....	195
Gráfica 312. Curvas Severidad-Área, Z, Sumapaz	196
Gráfica 313. Curvas Severidad-Área, PDSI, Sumapaz	196
Gráfica 314. Curvas Severidad-Área, PHDI, Sumapaz.....	197
Gráfica 315. Curvas Severidad-Área, RDI, Sumapaz.....	197
Gráfica 316. Series mensuales NDVI, cuenca Sumapaz.....	198
Gráfica 317. Series mensuales NDVI, cuenca Lebrija.....	198
Gráfica 318. Doble masa series NDVI, Sumapaz.....	199
Gráfica 319. Doble masa series NDVI, Lebrija.....	199
Gráfica 320. Comparativo original, MODIS vs. AVHRR, Sumapaz.....	201
Gráfica 321. Comparativo original, MODIS vs. AVHRR, Lebrija.....	201
Gráfica 322. Comparativo corregido, MODIS vs. AVHRR, Sumapaz	201
Gráfica 323. Comparativo corregido, MODIS vs. AVHRR, Lebrija	202
Gráfica 324. Doble masa series NDVI corregidas, Sumapaz	202
Gráfica 325. Doble masa series NDVI corregidas, Lebrija	202
Gráfica 326. Series de NDVI regionales para cuencas Sumapaz y Lebrija	203

Gráfica 327. DMI, NDVI Sumapaz.....	204
Gráfica 328. DMI, NDVI Lebrija.....	204
Gráfica 329. DMI, PN Sumapaz.....	205
Gráfica 330. DMI, PN Lebrija.....	205
Gráfica 331. DMI, SPI1 Sumapaz.....	206
Gráfica 332. DMI, SPI1 Lebrija.....	206
Gráfica 333. DMI, SPI3 Sumapaz.....	207
Gráfica 334. DMI, SPI3 Lebrija.....	207
Gráfica 335. DMI, SPI6 Sumapaz.....	208
Gráfica 336. DMI, SPI6 Lebrija.....	208
Gráfica 337. DMI, SPI9 Sumapaz.....	209
Gráfica 338. DMI, SPI9 Lebrija.....	209
Gráfica 339. DMI, Z Sumapaz.....	210
Gráfica 340. DMI, Z Lebrija.....	210
Gráfica 341. DMI, PDSI Sumapaz.....	211
Gráfica 342. DMI, PDSI Lebrija.....	211
Gráfica 343. DMI, PHDI Sumapaz.....	212
Gráfica 344. DMI, PHDI Lebrija.....	212
Gráfica 345. DMI, RDI Sumapaz.....	213
Gráfica 346. DMI, RDI Lebrija.....	213
Gráfica 347. DMI, SDI Sumapaz.....	214
Gráfica 348. DMI, SDI Lebrija.....	214
Gráfica 349. Comparación Modos 6, PN, Sumapaz.....	220
Gráfica 350. Comparación Modos 6, SPI1, Sumapaz.....	220
Gráfica 351. Comparación Modos 6, SPI3, Sumapaz.....	220
Gráfica 352. Comparación Modos 6, SPI6, Sumapaz.....	220
Gráfica 353. Comparación Modos 6, SPI9, Sumapaz.....	220
Gráfica 354. Comparación Modos 6, Z, Sumapaz.....	220
Gráfica 355. Comparación Modos 9, Z, Sumapaz.....	221
Gráfica 356. Comparación Modos 6, PDSI, Sumapaz.....	221
Gráfica 357. Comparación Modos 6, PHDI, Sumapaz.....	221
Gráfica 358. Comparación Modos 6, RDI, Sumapaz.....	221
Gráfica 359. Comparación Modos 9, RDI, Sumapaz.....	221
Gráfica 360. Comparación Modos 6, SDI, Sumapaz.....	221
Gráfica 361. Comparación Modos 8, PN, Lebrija.....	221
Gráfica 362. Comparación Modos 9, PN, Lebrija.....	221
Gráfica 363. Comparación Modos 6, SPI1, Lebrija.....	222
Gráfica 364. Comparación Modos 8, SPI1, Lebrija.....	222
Gráfica 365. Comparación Modos 6, SPI3, Lebrija.....	222
Gráfica 366. Comparación Modos 8, SPI3, Lebrija.....	222
Gráfica 367. Comparación Modos 9, SPI3, Lebrija.....	222
Gráfica 368. Comparación Modos 6, SPI6, Lebrija.....	222
Gráfica 369. Comparación Modos 6, SPI9, Lebrija.....	222
Gráfica 370. Comparación Modos 7, PHDI, Lebrija.....	222
Gráfica 371. Comparación Modos 6, RDI, Lebrija.....	223
Gráfica 372. Comparación Modos 9 y 10, SDI, Lebrija.....	223
Gráfica 373. Comparación variación rendimiento vs. Modo NDVI Sumapaz.....	235
Gráfica 374. Comparación variación rendimiento vs. Modo NDVI Lebrija.....	235
Gráfica 51. Histograma caudal, La playa.....	263

Índice de mapas

Mapa 1. Distribución espacial de precipitación e isoyetas, cuenca Sumapaz.....	62
Mapa 2. Distribución espacial de precipitación e isoyetas, cuenca Lebrija.....	71
Mapa 3. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Sumapaz, Tr=2 años.....	115

Mapa 4. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Sumapaz, Tr=3.3 años	115
Mapa 5. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Sumapaz, Tr=5 años	116
Mapa 6. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Sumapaz, Tr=10 años	116
Mapa 7. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Sumapaz, Tr=20 años	116
Mapa 8. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Sumapaz, Tr=50 años	116
Mapa 9. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Sumapaz, Tr=2 años.....	117
Mapa 10. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Sumapaz, Tr=3.3 años	117
Mapa 11. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Sumapaz, Tr=5 años	117
Mapa 12. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Sumapaz, Tr=10 años	117
Mapa 13. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Sumapaz, Tr=20 años	118
Mapa 14. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Sumapaz, Tr=50 años	118
Mapa 15. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Sumapaz, Tr=2 años.....	118
Mapa 16. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Sumapaz, Tr=3.3 años	118
Mapa 17. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Sumapaz, Tr=5 años	119
Mapa 18. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Sumapaz, Tr=10 años	119
Mapa 19. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Sumapaz, Tr=20 años	119
Mapa 20. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Sumapaz, Tr=50 años	119
Mapa 21. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Sumapaz, Tr=2 años	120
Mapa 22. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Sumapaz, Tr=3.3 años	120
Mapa 23. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Sumapaz, Tr=5 años	120
Mapa 24. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Sumapaz, Tr=10 años	120
Mapa 25. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Sumapaz, Tr=20 años	121
Mapa 26. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Sumapaz, Tr=50 años	121
Mapa 27. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Sumapaz, Tr=2 años.....	121
Mapa 28. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Sumapaz, Tr=3.3 años	121
Mapa 29. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Sumapaz, Tr=5 años	122
Mapa 30. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Sumapaz, Tr=10 años	122
Mapa 31. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Sumapaz, Tr=20 años	122
Mapa 32. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Sumapaz, Tr=50 años	122
Mapa 33. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Sumapaz, Tr=2 años	123
Mapa 34. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Sumapaz, Tr=3.3 años	123
Mapa 35. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Sumapaz, Tr=5 años	123
Mapa 36. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Sumapaz, Tr=10 años	123
Mapa 37. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Sumapaz, Tr=20 años	124
Mapa 38. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Sumapaz, Tr=50 años	124
Mapa 39. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Sumapaz PDSI, Tr=2 años.....	124
Mapa 40. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Sumapaz PDSI, Tr=3.3 años	124
Mapa 41. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Sumapaz PDSI, Tr=5 años	125
Mapa 42. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Sumapaz PDSI, Tr=10 años	125
Mapa 43. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Sumapaz PDSI, Tr=20 años	125
Mapa 44. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Sumapaz PDSI, Tr=50 años	125
Mapa 45. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Sumapaz PHDI, Tr=2 años	126
Mapa 46. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Sumapaz PHDI, Tr=3.3 años	126
Mapa 47. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Sumapaz PHDI, Tr=5 años	126
Mapa 48. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Sumapaz PHDI, Tr=10 años.....	126
Mapa 49. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Sumapaz PHDI, Tr=20 años.....	127
Mapa 50. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Sumapaz PHDI, Tr=50 años.....	127
Mapa 51. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Sumapaz RDI, Tr=2 años	127
Mapa 52. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Sumapaz RDI, Tr=3.3 años	127
Mapa 53. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Sumapaz RDI, Tr=5 años	128
Mapa 54. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Sumapaz RDI, Tr=10 años	128
Mapa 55. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Sumapaz RDI, Tr=20 años	128
Mapa 56. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Sumapaz RDI, Tr=50 años	128
Mapa 57. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Lebrija, Tr=2 años	132

Mapa 58. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Lebrija, Tr=3.3 años	132
Mapa 59. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Lebrija, Tr=5 años	133
Mapa 60. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Lebrija, Tr=10 años	133
Mapa 61. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Lebrija, Tr=20 años	133
Mapa 62. Interpolación espacial Severidad PN, cuenca Lebrija, Tr=50 años	133
Mapa 63. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Lebrija, Tr=2 años.....	134
Mapa 64. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Lebrija, Tr=3.3 años.....	134
Mapa 65. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Lebrija, Tr=5 años.....	134
Mapa 66. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Lebrija, Tr=10 años.....	134
Mapa 67. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Lebrija, Tr=20 años.....	135
Mapa 68. Interpolación espacial Severidad SPI1, cuenca Lebrija, Tr=50 años.....	135
Mapa 69. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Lebrija, Tr=2 años.....	135
Mapa 70. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Lebrija, Tr=3.3 años.....	135
Mapa 71. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Lebrija, Tr=5 años.....	136
Mapa 72. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Lebrija, Tr=10 años.....	136
Mapa 73. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Lebrija, Tr=20 años.....	136
Mapa 74. Interpolación espacial Severidad SPI3, cuenca Lebrija, Tr=50 años.....	136
Mapa 75. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Lebrija, Tr=2 años.....	137
Mapa 76. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Lebrija, Tr=3.3 años.....	137
Mapa 77. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Lebrija, Tr=5 años.....	137
Mapa 78. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Lebrija, Tr=10 años.....	137
Mapa 79. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Lebrija, Tr=20 años.....	138
Mapa 80. Interpolación espacial Severidad SPI6, cuenca Lebrija, Tr=50 años.....	138
Mapa 81. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Lebrija, Tr=2 años.....	138
Mapa 82. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Lebrija, Tr=3.3 años.....	138
Mapa 83. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Lebrija, Tr=5 años.....	139
Mapa 84. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Lebrija, Tr=10 años.....	139
Mapa 85. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Lebrija, Tr=20 años.....	139
Mapa 86. Interpolación espacial Severidad SPI9, cuenca Lebrija, Tr=50 años.....	139
Mapa 87. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Lebrija, Tr=2 años.....	140
Mapa 88. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Lebrija, Tr=3.3 años.....	140
Mapa 89. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Lebrija, Tr=5 años.....	140
Mapa 90. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Lebrija, Tr=10 años.....	140
Mapa 91. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Lebrija, Tr=20 años.....	141
Mapa 92. Interpolación espacial Severidad Z, cuenca Lebrija, Tr=50 años.....	141
Mapa 93. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Lebrija PDSI, Tr=2 años.....	141
Mapa 94. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Lebrija PDSI, Tr=3.3 años.....	141
Mapa 95. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Lebrija PDSI, Tr=5 años.....	142
Mapa 96. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Lebrija PDSI, Tr=10 años.....	142
Mapa 97. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Lebrija PDSI, Tr=20 años.....	142
Mapa 98. Interpolación espacial Severidad PDSI, cuenca Lebrija PDSI, Tr=50 años.....	142
Mapa 99. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Lebrija PHDI, Tr=2 años	143
Mapa 100. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Lebrija PHDI, Tr=3.3 años.....	143
Mapa 101. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Lebrija PHDI, Tr=5 años.....	143
Mapa 102. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Lebrija PHDI, Tr=10 años.....	143
Mapa 103. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Lebrija PHDI, Tr=20 años.....	144
Mapa 104. Interpolación espacial Severidad PHDI, cuenca Lebrija PHDI, Tr=50 años.....	144
Mapa 105. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Lebrija RDI, Tr=2 años	144
Mapa 106. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Lebrija RDI, Tr=3.3 años	144
Mapa 107. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Lebrija RDI, Tr=5 años	145
Mapa 108. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Lebrija RDI, Tr=10 años	145
Mapa 109. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Lebrija RDI, Tr=20 años	145
Mapa 110. Interpolación espacial Severidad RDI, cuenca Lebrija RDI, Tr=50 años	145

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de gravedad de sequías para SPI	23
Tabla 2. Clasificación de gravedad de sequías para PDSI	25
Tabla 3. Clasificación de gravedad de sequías para RDI _{st}	27
Tabla 4. Clasificación de gravedad de sequías para DI.....	28
Tabla 5. Valores de agua disponible total para estaciones climatológicas, cuencas Sumapaz y Lebrija	46
Tabla 6. Estaciones hidrométricas comparadas con estaciones pluviométricas y/o climatológicas	48
Tabla 7. Estadísticos básicos series de precipitación, cuenca Sumapaz.....	60
Tabla 8. Estadísticos básicos series de temperatura, cuenca Sumapaz	60
Tabla 9. Estadísticos básicos series de caudal, cuenca Sumapaz.....	60
Tabla 10. Estadísticos básicos series de precipitación, cuenca Lebrija.....	69
Tabla 11. Estadísticos básicos series de temperatura, cuenca Lebrija.....	69
Tabla 12. Estadísticos básicos series de caudales, cuenca Lebrija.....	69
Tabla 13. Resultados pruebas TREND magnitudes en 9 meses, Base aérea Melgar	85
Tabla 14. Resultados pruebas TREND magnitudes en 12 meses, Base aérea Melgar	85
Tabla 15. Resultados pruebas TREND magnitudes en 9 meses, Pandi.....	85
Tabla 16. Resultados pruebas TREND magnitudes en 12 meses, Pandi.....	86
Tabla 17. Resultados pruebas TREND magnitudes en 9 meses, Peñas blancas CO.....	86
Tabla 18. Resultados pruebas TREND magnitudes en 12 meses, Peñas blancas CO	86
Tabla 19. Resultados pruebas TREND magnitudes en 9 meses, ITA Valsalice	86
Tabla 20. Resultados pruebas TREND magnitudes en 12 meses, ITA Valsalice	86
Tabla 21. Series de magnitudes, estaciones y escalas temporales prueba de Mann-Kendall modificada.....	87
Tabla 22. Eventos de sequía identificados, PN, cuenca Sumapaz	152
Tabla 23. Eventos de sequía identificados, SPI1, cuenca Sumapaz	153
Tabla 24. Eventos de sequía identificados, SPI3, cuenca Sumapaz.....	154
Tabla 25. Eventos de sequía identificados, SPI6, cuenca Sumapaz.....	154
Tabla 26. Eventos de sequía identificados, SPI9, cuenca Sumapaz.....	154
Tabla 27. Eventos de sequía identificados, Z, cuenca Sumapaz	155
Tabla 28. Eventos de sequía identificados, PDSI, cuenca Sumapaz.....	155
Tabla 29. Eventos de sequía identificados, PHDI, cuenca Sumapaz	155
Tabla 30. Eventos de sequía identificados, RDI, cuenca Sumapaz.....	156
Tabla 31. Eventos de sequía identificados, SDI, cuenca Sumapaz	156
Tabla 32. Eventos de sequía identificados, PN, cuenca Lebrija	157
Tabla 33. Eventos de sequía identificados, SPI1, cuenca Lebrija.....	158
Tabla 34. Eventos de sequía identificados, SPI3, cuenca Lebrija.....	159
Tabla 35. Eventos de sequía identificados, SPI6, cuenca Lebrija.....	159
Tabla 36. Eventos de sequía identificados, SPI9, cuenca Lebrija.....	159
Tabla 37. Eventos de sequía identificados, Z, cuenca Lebrija.....	160
Tabla 38. Eventos de sequía identificados, PDSI, cuenca Lebrija.....	160
Tabla 39. Eventos de sequía identificados, PHDI, cuenca Lebrija	161
Tabla 40. Eventos de sequía identificados, RDI, cuenca Lebrija.....	161
Tabla 41. Eventos de sequía identificados, SDI, cuenca Lebrija	161
Tabla 42. Parámetros corrección AVHRR Sumapaz	200
Tabla 43. Parámetros corrección AVHRR Lebrija	200
Tabla 44. Correlaciones entre modos, PN Sumapaz	215
Tabla 45. Correlaciones entre modos, SPI1 Sumapaz	215
Tabla 46. Correlaciones entre modos, SPI3 Sumapaz	215
Tabla 47. Correlaciones entre modos, SPI6 Sumapaz	216
Tabla 48. Correlaciones entre modos, SPI9 Sumapaz	216
Tabla 49. Correlaciones entre modos, Z Sumapaz	216
Tabla 50. Correlaciones entre modos, PDSI Sumapaz.....	216
Tabla 51. Correlaciones entre modos, PHDI Sumapaz	217
Tabla 52. Correlaciones entre modos, RDI Sumapaz	217
Tabla 53. Correlaciones entre modos, SDI Sumapaz.....	217

Tabla 54. Correlaciones entre modos, PN Lebrija.....	217
Tabla 55. Correlaciones entre modos, SPI1 Lebrija	218
Tabla 56. Correlaciones entre modos, SPI3 Lebrija	218
Tabla 57. Correlaciones entre modos, SPI6 Lebrija	218
Tabla 58. Correlaciones entre modos, SPI9 Lebrija	218
Tabla 59. Correlaciones entre modos, Z Lebrija	219
Tabla 60. Correlaciones entre modos, PDSI Lebrija.....	219
Tabla 61. Correlaciones entre modos, PHDI Lebrija	219
Tabla 62. Correlaciones entre modos, RDI Lebrija	219
Tabla 63. Correlaciones entre modos, SDI Lebrija.....	220
Tabla 64. Correlaciones entre modos con rezago, PN Sumapaz.....	224
Tabla 65. Correlaciones entre modos con rezago, SPI1 Sumapaz	224
Tabla 66. Correlaciones entre modos con rezago, SPI3 Sumapaz	225
Tabla 67. Correlaciones entre modos con rezago, SPI6 Sumapaz	225
Tabla 68. Correlaciones entre modos con rezago, SPI9 Sumapaz	226
Tabla 69. Correlaciones entre modos con rezago, Z Sumapaz	226
Tabla 70. Correlaciones entre modos con rezago, PDSI Sumapaz	227
Tabla 71. Correlaciones entre modos con rezago, PHDI Sumapaz.....	227
Tabla 72. Correlaciones entre modos con rezago, RDI Sumapaz.....	228
Tabla 73. Correlaciones entre modos con rezago, SDI Sumapaz	228
Tabla 74. Correlaciones entre modos con rezago, PN Lebrija	229
Tabla 75. Correlaciones entre modos con rezago, SPI1 Lebrija	229
Tabla 76. Correlaciones entre modos con rezago, SPI3 Lebrija	230
Tabla 77. Correlaciones entre modos con rezago, SPI6 Lebrija	230
Tabla 78. Correlaciones entre modos con rezago, SPI9 Lebrija	231
Tabla 79. Correlaciones entre modos con rezago, Z Lebrija	231
Tabla 80. Correlaciones entre modos con rezago, PDSI Lebrija	232
Tabla 81. Correlaciones entre modos con rezago, PHDI Lebrija	232
Tabla 82. Correlaciones entre modos con rezago, RDI Lebrija	233
Tabla 83. Correlaciones entre modos con rezago, SDI Lebrija	233
Tabla 84. Variación porcentual rendimientos Tolima, Cundinamarca y cuenca Sumapaz.....	234
Tabla 85. Variación porcentual rendimientos César, Norte de Santander y Santander	234

Índice de anexos

Anexo 1. Información hidro-meteorológica disponible, cuenca Sumapaz.....	252
Anexo 2. Información hidro-meteorológica disponible, cuenca Lebrija	253
Anexo 3. Mapa ubicación estaciones pluviométricas cuenca río Sumapaz	254
Anexo 4. Mapa ubicación estaciones climatológicas e hidrométricas cuenca río Sumapaz.....	255
Anexo 5. Mapa ubicación estaciones pluviométricas cuenca río Lebrija.....	256
Anexo 6. Mapa ubicación estaciones climatológicas e hidrométricas cuenca río Lebrija.....	257
Anexo 7. Código para cálculo de magnitudes	258
Anexo 8. Mapa de cobertura del suelo, cuenca Sumapaz	259
Anexo 9. Histogramas precipitación, temperatura y caudales, cuenca Sumapaz.....	260
Anexo 10. Histogramas precipitación, temperatura y caudales, cuenca Lebrija.....	263
Anexo 11. Series magnitudes, estación Base aérea Melgar.....	270
Anexo 12. Series magnitudes, estación ITA Valsalice	272
Anexo 13. Series magnitudes, estación Pandi	274
Anexo 14. Series magnitudes, estación Peñas blancas CO	276
Anexo 15. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Base aérea Melgar	278
Anexo 16. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Pandi	280
Anexo 17. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Peñas blancas CO	282
Anexo 18. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos ITA Valsalice	283
Anexo 19. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos El salero	284
Anexo 20. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos ITUC	285
Anexo 21. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Nuñez.....	286

Anexo 22. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Nilo.....	286
Anexo 23. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Quebrada Negra.....	287
Anexo 24. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos San Juan	287
Anexo 25. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Tulcán	288
Anexo 26. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Pinar.....	288
Anexo 27. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Batán.....	289
Anexo 28. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Cabrera.....	289
Anexo 29. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Ospina Pérez.....	291
Anexo 30. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos La Playa PM.....	291
Anexo 31. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Hda La Granja	292
Anexo 32. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Carmen de Apicalá	293
Anexo 33. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Melgar.....	294
Anexo 34. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos La Playa HM	295
Anexo 35. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos El limonar.....	296
Anexo 36. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos Dos mil.....	297
Anexo 37. Resultados análisis de correlación índices macro climáticos El profundo	298
Anexo 38. Correlogramas comparación índices, Base aérea Melgar	298
Anexo 39. Correlogramas comparación índices, Peñas Blancas	300
Anexo 40. Correlogramas comparación índices, ITA Valsalce.....	302
Anexo 41. Correlogramas comparación índices, El salero.....	304
Anexo 42. Correlogramas comparación índices, ITUC	304
Anexo 43. Correlogramas comparación índices, Nuñez	304
Anexo 44. Correlogramas comparación índices, Nilo	305
Anexo 45. Correlogramas comparación índices, Qda Negra.....	305
Anexo 46. Correlogramas comparación índices, San Juan	305
Anexo 47. Correlogramas comparación índices, Tulcán.....	305
Anexo 48. Correlogramas comparación índices, Pinar	306
Anexo 49. Correlogramas comparación índices, Batán	306
Anexo 50. Correlogramas comparación índices, Cabrera	306
Anexo 51. Correlogramas comparación índices, Ospina Pérez	306
Anexo 52. Correlogramas comparación índices, La Playa PM	307
Anexo 53. Correlogramas comparación índices, Hda La Granja.....	307
Anexo 54. Correlogramas comparación índices, Carmen de Apicalá.....	307
Anexo 55. Correlogramas comparación SDI y SPI, Melgar.....	308
Anexo 56. Correlogramas comparación SDI y SPI, La Playa HM	309
Anexo 57. Correlogramas comparación SDI y SPI, Limonar	311
Anexo 58. Correlogramas comparación SDI y SPI, Dos mil	312
Anexo 59. Curvas SDF puntuales, cuenca Sumapaz	314
Anexo 60. Curvas SDF series de PN, cuenca Lebrija.....	325
Anexo 61. Curvas SDF series de SPI1, cuenca Lebrija	328
Anexo 62. Curvas SDF series de SPI3, cuenca Lebrija	331
Anexo 63. Curvas SDF series de SPI6, cuenca Lebrija	333
Anexo 64. Curvas SDF series de Z, cuenca Lebrija	336
Anexo 65. Curvas SDF series de PDSI, cuenca Lebrija	337
Anexo 66. Curvas SDF series de PHDI, cuenca Lebrija.....	337
Anexo 67. Curvas SDF series de RDI, cuenca Lebrija	337
Anexo 68. Curvas SDF series de SDI, cuenca Lebrija.....	338

1. INTRODUCCIÓN

La sequía es una de las amenazas más graves y complejas que afectan a la humanidad. De acuerdo con Ross y Lott (2003) los grandes eventos de sequía experimentados en los Estados Unidos causaron el 42% de las pérdidas monetarias relacionadas con el clima durante el período 1980 - 2003. En 1995, la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de ese mismo país (FEMA) estimaba que las pérdidas anuales generadas por este fenómeno variaban entre seis mil y ocho mil millones de dólares; más que las relacionadas cualquier otro desastre causado por el clima en ese momento. Sin ir muy lejos, la sequía que se presentó a finales de 2015 en Colombia (producto del fenómeno del Niño), llevó a la pérdida del 80% de la cosecha de frijol en los departamentos de Santander y Nariño (Arias , 2015; Caracol Radio, 2016), al incremento del 154% de los costos operacionales de la generadora ISAGEN (Redacción Negocios y Economía, 2016), a pérdidas cercanas al billón de pesos en el sector ganadero (RCN Radio, 2016) y a racionamiento de agua en casi 150 municipios del país (Betancur, 2015).

Como resultado de los impactos mayores de las sequías, se han llevado a cabo esfuerzos muy importantes para desarrollar herramientas de monitoreo mejoradas con el fin de proveer a los tomadores de decisiones con información precisa y cuasi en tiempo real, que requieren para la planificación, mitigación y generación de planes de respuesta ante estos eventos. Sin embargo, el monitoreo de sequías resulta desafiante por la gran variabilidad, tanto espacial como temporal, que exhiben las mismas. Igualmente, el término ‘sequía’ carece de una única definición técnica porque en general, se describe en función de los impactos que genera sobre diferentes sectores (agricultura, recursos hídricos, ecología, economía, etc.). Teniendo en cuenta lo anterior, no es posible utilizar un único método para caracterizar y controlar adecuadamente el avance de una sequía (Brown *et al.*, 2008).

Como se mencionó antes, la clasificación usual de sequías se determina a partir de sus impactos particulares sobre diferentes sectores; de esta forma, se tienen los siguientes tipos de sequías (Mishra & Singh, 2010):

1. **Sequía meteorológica:** Se define como la falta de precipitación sobre una región determinada en un período de tiempo dado.
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.
3. **Sequía agrícola:** En general, se refiere a un periodo con disminuciones 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
4. **Sequía socioeconómica:** 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 un déficit del recurso causado por condiciones climáticas.

Adicionalmente, las sequías pueden ser clasificadas en función de las condiciones climáticas de la zona en la cual se presentan; así se obtiene (IDEAM, 2010):

1. **Sequía permanente:** Se presenta en zonas áridas donde no existe una época de lluvias bien definida para satisfacer las necesidades de agua de ciertos cultivos.
2. **Sequía estacional:** En general, se presenta en regiones tropicales. Consiste en la ocurrencia de temporadas secas bien definidas que anteceden a periodos de lluvia. Puede decirse que son sequías esperables que se presentan todos los años, por los patrones de circulación atmosférica.
3. **Sequía contingente:** Es la ausencia de abastecimiento hídrico en una época en la que, normalmente, éste es abundante. De esta forma, este tipo de sequía es la más seria, siendo causada por la variabilidad en el comportamiento climático de las lluvias en una región. Puede ocurrir a lo largo de periodos prolongados durante los cuales se considera que la lluvia es menor a lo normal.
4. **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 desecamiento del suelo y disminución en ritmo de crecimiento de las plantas llevando, en último término, a bajas en los rendimientos de los cultivos.

Por lo general, la sequía se cuantifica y estudia a partir de los llamados índices de sequía. Estos índices no son más que indicadores indirectos, basados en información climática (comúnmente precipitación y temperatura), que permiten llevar a cabo una evaluación objetiva y cuantitativa de la gravedad de los eventos (Vicente-Serrano et al., 2012). Existen dos tipos principales de índices: aquellos que se fundamentan únicamente en el análisis de precipitación, llamados índices de lluvia, y aquellos que utilizan varios parámetros climáticos y/o se basan en el desarrollo de un balance hídrico en el suelo (Hurtado & Cadena, 2002). Las escalas de clasificación de gravedad para estos indicadores (rangos de valores de índices que determinan la importancia del evento de sequía) fueron definidas por los autores de los mismos de forma arbitraria.

Dado lo anterior, la presente tesis pretende desarrollar un análisis detallado de metodologías de cálculo de índices de sequía (consistencia entre los mismos, determinación de aquellos más apropiados para el caso de Colombia, relación con fenómenos macroclimáticos, etc.) así como un proceso de calibración de las escalas de clasificación de gravedad de los mismos. Para esto último, se pretende utilizar parámetros que representen de forma aproximada las características particulares de una cuenca de estudio.

2. JUSTIFICACIÓN

Las sequías, a diferencia de las inundaciones, son fenómenos climáticos que han sido poco estudiados en Colombia. Dentro de los esfuerzos que se han realizado para caracterizar estos eventos en el país se encuentran:

- *Implementación de índices climáticos para la evaluación de sequía en la costa caribe colombiana bajo escenarios de variabilidad climática* (Hernández & Sanabria, 2016). En este estudio, se aplicaron las metodologías de cálculo de los índices estandarizados de precipitación (SPI), de severidad de sequía de Palmer (PDSI) y de aridez (IA) a la región caribe de Colombia. Las series de índices obtenidas fueron relacionadas estadísticamente con el índice oceánico del Niño (ONI).
- *Análisis detallado de conceptualización de sequías y metodologías para definición de índices de escasez: Caso Cuenca Río Sumapaz* (Torres, 2015). En este documento, se presenta la aplicación, de manera independiente, de diferentes metodologías para definición de índices de sequía y escasez, en la cuenca de río Sumapaz. Igualmente, se considera la influencia que dentro del cálculo de los mismos puede llegar a tener la longitud de registros de precipitación y su relación con índices del ENSO.
- *Teleconexiones y eventos extremos de sequía en áreas protegidas del norte de Colombia* (Cuadrado & Blanco, 2015). En este estudio se analizó la conexión entre eventos de sequía registrados en el norte de Colombia entre 1978 y 2010 y la circulación a gran escala utilizando el índice Niño 3,4 y el índice Atlántico Tropical del Norte (ATN).
- *Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua-Colombia* (Loaiza, Carvajal, & Baquero, 2015). Este estudio determinó los periodos de sequía que se presentaron en la cuenca del río Dagua y la intensidad de los mismos; aplicando el índice estandarizado de precipitación a las series registradas en diferentes estaciones. De forma preliminar, se relacionaron los eventos más intensos de sequía con años Niño.
- *Evaluación del comportamiento de las sequías en el norte de Sudamérica utilizando mallas de precipitación y temperatura* (García & Rodríguez, 2014). En este documento se intenta determinar el comportamiento, tanto en espacio como en tiempo, de los eventos de sequía en el Norte de Sudamérica aplicando metodologías de cálculo de índices basadas en información satelital de precipitación y temperatura.
- *Estudio nacional del agua* (IDEAM, 2014). El IDEAM analiza la incidencia histórica de eventos de sequía en el país utilizando el índice estandarizado de precipitación para diferentes escalas temporales. Igualmente, discrimina la ocurrencia de eventos por área hidrográfica y los correlaciona, de forma preliminar, con fases secas del ENSO (Niño) a partir del ONI.
- *Aplicación de índices de sequía en Colombia* (Hurtado & Cadena, 2002). Se compararon índices de sequía basados en lluvia y basados en balance hídrico en el suelo, para la región caribe de Colombia.

A pesar de que los trabajos presentados anteriormente resultan valiosos para el entendimiento de la sequía en el país, ninguno de ellos (exceptuando el ENA) trata de caracterizar la variabilidad espacial de estos eventos en el territorio colombiano, ni de identificar las metodologías de

cuantificación más apropiadas para el caso del país. Adicionalmente, dentro de los análisis realizados, no se consideran todas las zonas de importancia agropecuaria nacional (como la región central o los Santanderes) sino únicamente la región caribe. Lo anterior es una deficiencia importante dado que los eventos de sequía tienen una enorme incidencia en los costos asociados a la agricultura y ganadería y deberían ser estudiados de forma detallada en áreas donde dichas actividades se desarrollan en forma extensiva.

Por otro lado, resulta importante conocer el efecto que los eventos de sequía pueden tener en cuencas de abastecimiento importantes para el país (analizando dicha importancia en términos de número de municipios servidos, tamaño de los mismos, porcentaje de uso del agua a nivel nacional asociado, etc.). Lo anterior, con el fin de proveer a las autoridades nacionales, departamentales y municipales con información precisa de magnitud y frecuencia, de las amenazas de sequía en los territorios.

Igualmente, el poder asignar a un valor, obtenido como índice de sequía, una clasificación de gravedad de la misma es una de las herramientas más útiles en términos de planificación a nivel de cuenca y/o unidad territorial (departamento, municipio, etc.). Sin embargo, las características propias de cada zona hacen que sea difícil plantear una clasificación general, aun cuando las metodologías de cálculo de índices contemplen la estandarización de los parámetros climáticos que utilizan (no es lo mismo que la precipitación esté por debajo de la media o valor esperado en la costa caribe a que lo esté en Antioquia o el eje cafetero porque existen diferencias en suelos, vegetación, características de la precipitación, interacciones con aguas subterráneas, intensidad y tipo de explotación agrícola, poblaciones servidas por fuentes superficiales, etc.).

Finalmente, el hecho de que las metodologías de cálculo de índices planteen escalas de clasificación de gravedad de sequías arbitrarias, basadas más en el criterio de los autores que en algún fundamento científico sumado a que cada cuenca y/o zona hidrográfica es diferente, llevaría a pensar que los valores de índices que determinan la intensidad de un evento de sequía deben ser específicos para cada área que se esté estudiando. Así, si fuera posible comparar los resultados de las diferentes metodologías con información evidencial (p.e. series de índices de condición de la vegetación, series de indicadores de precios de productos agrícolas, etc.) podría lograrse establecer rangos de valores de índices que correspondieran efectivamente a eventos de sequía en el área de estudio.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

La pregunta de investigación que, de acuerdo con las secciones anteriores, se pretende resolver con esta investigación es:

¿Cómo analizar de forma detallada la sequía en Colombia y cómo establecer la gravedad de eventos, utilizando diferentes metodologías de cálculo de índices así como parámetros que representen, de forma aproximada, las características particulares de cada cuenca?

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Analizar de forma detallada las metodologías de cuantificación de sequías en Colombia y plantear procedimientos útiles en la calibración de clasificaciones de gravedad de las mismas utilizando parámetros que representen, de forma aproximada, las características particulares de dos (2) cuencas de estudio.

4.21. Objetivos específicos

- Seleccionar de las metodologías existentes, para la definición de índices de sequía, aquellas que se considere representen mejor el comportamiento del fenómeno en el territorio colombiano y que sean lo suficientemente representativas de los tipos de sequía de que busca estudiar.
- Analizar la consistencia en la identificación de eventos de sequía al utilizar las metodologías de cálculo de índices seleccionadas, para las dos cuencas de estudio.
- Plantear un procedimiento de análisis regional de sequías.
- Identificar tendencias espaciales y temporales en el comportamiento de la sequía en cada uno de los casos de estudio seleccionados.
- Establecer parámetros que representen de forma aproximada las características de cada una de las cuencas de estudio y que se relacionen, en alguna medida, con eventos de sequía en las mismas.

5. ESTADO DEL ARTE

5.1. Definiciones de sequía

Algunas de las definiciones comúnmente empleadas para explicar el concepto de sequía se presentan a continuación:

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 (1992), 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.
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 (2005), define sequía como la ausencia de abastecimiento hídrico en una región durante un periodo prolongado de tiempo.

De acuerdo con las definiciones presentadas, sería posible generalizar el concepto de sequía como una deficiencia prolongada y anormal de disponibilidad de agua. Dicha definición será la que se considerará como válida de este punto en adelante porque es lo suficientemente general para lograr dos propósitos:

1. Dejar de lado los impactos de la sequía en diferentes sectores.
2. Dejar abierto el concepto utilizando el término ‘disponibilidad de agua’ que no se relaciona directamente con precipitación, caudales, humedad en el suelo, etc.

Es necesario decir que los términos ‘prolongada’ y ‘anormal’ (incluidos dentro de la definición planteada) deben ser estudiados cuidadosa y objetivamente, de tal forma que no se presenten sesgos en la identificación de eventos por la definición de los mismos.

5.2. Metodologías de cálculo de índices

En general, todas las metodologías de cálculo de índices existentes emplean registros de precipitación, de forma independiente o combinada con otros parámetros meteorológicos. Así, índices como el de Palmer (1965), Marcovitch (1930) o de humedad del cultivo (1968) utilizan una combinación entre precipitación y temperatura. Otros índices, como el de Keetch-Bryam, (1968), emplean además humedad del suelo mientras que otros, como el índice estandarizado de precipitación

(1993), sólo tienen en cuenta la precipitación. A continuación, se presentan algunos de los índices más comúnmente empleados junto con sus ventajas y limitaciones.

5.2.1. Índice de porcentaje de normalidad (PN)

Consiste en una formulación estadística simple en la que se divide la precipitación real para el período de análisis de un sitio específico, en la precipitación normal (que en general se entiende como la media de un registro de mínimo 30 años). De esta forma, se entiende que la precipitación ‘normal’ para una ubicación específica consiste en un valor del índice del 100%. No se cuenta con registro del primer uso de esta metodología en la descripción de anomalías de precipitación (National Drought Mitigation Center, s.f.; WMO & GWP, 2016).

Dentro de las principales características de este índice se encuentran su facilidad de cálculo y el hecho de que permite comparar cualquier periodo de tiempo (diario, semanal, mensual, multimensual y anual) para cualquier ubicación. Igualmente, requiere series de precipitación en la escala temporal a la cual se esté calculando y de al menos 30 años de longitud, para la definición del valor normal (WMO & GWP, 2016).

Puede decirse que la principal ventaja que presenta esta metodología es la facilidad del cálculo, lo que permite estimar rápidamente y con estadísticas simples un valor del índice. En cuanto a las desventajas del método se tiene en primer lugar el hecho de que generalmente la media de la precipitación no coincide con la mediana de la distribución de la misma. Lo anterior se presenta porque, como se puede inferir, la precipitación en escalas mensuales o estacionales no presenta una distribución normal y el uso comparativo del porcentaje de normalidad implica que sí lo tiene. En segundo lugar, dada la variabilidad temporal y espacial de los registros de precipitación, no hay forma de determinar la frecuencia de las variaciones respecto a la condición normal, ni de comparar diferentes ubicaciones. Esto último complica el establecimiento de una relación entre las variaciones respecto al valor normal, y los impactos que generan las mismas y, por ende, dificulta el planteamiento de planes de manejo y mitigación de sequías (National Drought Mitigation Center, s.f.; WMO & GWP, 2016).

5.2.2. Índice estandarizado de precipitación (SPI)

Esta metodología de cálculo es el resultado del trabajo realizado en 1992 por McKee *et al.* en la Universidad de Colorado. En 2009, la Organización Meteorológica Mundial (WMO) recomendó su uso como el principal índice meteorológico que los países deberían emplear para monitorear y controlar las condiciones de sequía. Una de sus principales características es que puede ser calculado para diversas escalas temporales y espaciales empleando, únicamente, series históricas de precipitación (WMO & GWP, 2016).

La forma de cálculo de este índice se basa en el análisis de las series de precipitación en períodos relativamente largos (la WMO recomienda periodos de 30 años, pero pueden usarse registros más cortos). La serie original se ajusta a una distribución de probabilidad Gamma, Log-Normal o de otro tipo, que posteriormente se normaliza (media en 0 y varianza de 1) generando la serie del índice. El valor del índice muestra el número de desviaciones estándar que el valor de precipitación medido se aleja de la mediana. Así, valores positivos indican lluvias mayores a la mediana y valores negativos lluvias menores a la misma (Hurtado Moreno & Cadena, 2002).

Thom (1958) encontró que la distribución gamma se ajustaba bien a las series de tiempo de precipitación. La función de densidad de probabilidad para la distribución se presenta a continuación:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-x/\beta} \quad \text{para } x > 0 \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde a es el parámetro de forma, β el parámetro de escala, x el valor de precipitación y $\Gamma(a)$ es la función gamma. Los dos parámetros de la función anterior deben ser estimados para cada estación y cada escala de tiempo de análisis. Al utilizar el método de máxima verosimilitud para estimar los parámetros se obtiene:

$$a = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{a} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde n es el número de observaciones. Los parámetros resultantes son utilizados para hallar la probabilidad acumulada de un evento observado de precipitación para un mes y escala temporal dados para la ubicación en cuestión. Debido a que la distribución gamma no está definida para $x=0$ y la distribución de precipitaciones puede contener este valor, la probabilidad acumulada puede expresarse como:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde q representa la probabilidad de precipitación cero y $G(x)$ es la probabilidad acumulada de la función gamma incompleta. Si se tiene un número m de ceros en la serie de precipitación, entonces q puede estimarse como m/n . Finalmente, la probabilidad acumulada $H(x)$ es transformada en la variable estándar normal aleatoria z con media de cero y varianza de 1, que es en último término el valor del SPI (Tigkas *et al.*, 2013).

La escala de clasificación de gravedad de los eventos no ha variado desde que se planteó el índice y es la que se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de gravedad de sequías para SPI

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

Fuente: McKee et al., 1993

La principal ventaja del índice es que puede ser calculado utilizando únicamente información de precipitación haciendo fácil su uso operativo. Por otro lado, el SPI es aplicable a todos los regímenes climáticos permitiendo, al mismo tiempo, hacer comparaciones entre ellos. Igualmente, la

metodología puede ser aplicada a series con información incompleta, siendo esto una ventaja para zonas con información pobre o falta de registros largos y cohesivos. Finalmente, la posibilidad de calcular el índice para diferentes escalas temporales permite que pueda ser usado en diversas aplicaciones (WMO & GWP, 2016).

Respecto a las debilidades de la metodología se tiene, en primer lugar, el hecho de que solo considera series de precipitación como entradas. Lo anterior, hace que no se tenga en cuenta el componente de temperatura que es importante en el balance hídrico y uso de agua en una región (WMO & GWP, 2016). En segundo lugar, la longitud del registro empleado en el cálculo del índice tiene algún impacto en los valores obtenidos. En general, se ha observado que los resultados de series de índices son consistentes para diferentes longitudes de registro siempre y cuando los mismos se ajusten a distribuciones similares (Torres, 2015; Wu *et al.*, 2005); sin embargo, si las distribuciones son distintas se tienden a presentar discrepancias importantes. En tercer lugar, cuando se calcula el índice para escalas temporales grandes (mayores a 24 meses) el ajuste de una distribución puede estar sesgado por el uso de series de tiempo muy cortas (Mishra & Singh, 2010). Finalmente, como se mencionó en secciones anteriores, los rangos de la clasificación de gravedad del índice fueron propuestos de forma arbitraria por los autores. McKee *et al.* (1993) indican “La intensidad de la sequía se define arbitrariamente para valores del SPI con las siguientes categorías” (p. 18).

5.2.3. Índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI)

Metodología basada en un estudio original de Palmer (1965) para las regiones agrícolas de Iowa y Kansas en Estados Unidos. Se basa en un balance hídrico seriado e intenta cuantificar el suministro de humedad que ofrece el suelo. Fue uno de los primeros intentos para identificar eventos de sequía utilizando, además de precipitación, registros de temperatura y durante muchos años, fue el único índice operacional utilizado en el mundo (Torres, 2015; WMO & GWP, 2016).

El cálculo se lleva a cabo utilizando series mensuales de precipitación y temperatura, así como la capacidad de retención de agua del suelo para el sitio de estudio. El balance hídrico tiene en cuenta la humedad recibida (precipitación) así como aquella almacenada en el suelo, considerando las posibles pérdidas que puede causar la influencia de la temperatura. De acuerdo con lo anterior, el modelo de balance hídrico considera dos capas de suelo: la capa más superficial, o zona radicular (S_s), 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 (L_s) 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 (S_u). Algunas generalidades del modelo son (Hurtado Moreno & Cadena, 2002; WMO & GWP, 2016):

- La capa S_s contiene una pulgada de agua útil a capacidad de campo, en función de la profundidad considerada y las características del suelo.
- Se asume que no hay recarga de la zona radicular hasta que la capa S_s sea llenada a capacidad de campo. El resto de agua del perfil es almacenada por la capa S_u 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).

El índice se calcula entonces a partir de una expresión empírica derivada por Palmer a la que se llega después de pasar por varios pasos intermedios. De acuerdo con los valores de índices

obtenidos, Palmer (1965) planteó la clasificación de gravedad de eventos que se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de gravedad de sequías para PDSI

Valor	Clasificación	Valor	Clasificación
> 4.0	Extremadamente húmedo	-0.49 a -0.9	Sequía incipiente
3.0 a 3.9	Muy húmedo	-1.0 a -1.9	Sequía reducida
2.0 a 2.9	Moderadamente húmedo	-2.0 a -2.9	Sequía moderada
1.0 a 1.9	Ligeramente húmedo	-3.0 a -3.9	Sequía severa
0.5 a 0.9	Húmedo incipiente	< -4.0	Sequía extrema
-0.4 a 0.4	Normal		

Fuente: Palmer, 1965

Respecto a las ventajas que se pueden identificar para esta metodología se tiene principalmente, que ha sido utilizada ampliamente alrededor del mundo y que el código para el cálculo del índice está disponible fácilmente. Igualmente, dado su uso generalizado, es posible encontrar en la literatura científica, diversos estudios relacionados con el PDSI. Finalmente, el hecho de que se utilice información del suelo y una metodología de balance hídrico hace que el índice sea bastante robusto en la identificación de eventos de sequía (especialmente de tipo agrícola, aunque en la literatura se pueden encontrar aplicaciones a otros tipos) (WMO & GWP, 2016).

Las desventajas de su utilización incluyen la dificultad de contar con registros cronológicos completos (tanto de precipitación como de temperatura) y el rezago entre las series de parámetros climáticos y la serie del índice obtenida. Respecto a esto último, se tiene que el PDSI tiene una escala temporal de aproximadamente 9 meses lo que lleva a un rezago en la identificación de condiciones de sequía (causado por la simplificación del componente de humedad del suelo en los cálculos). Lo anterior puede ser un inconveniente cuando se intenta identificar un evento de sequía que se está desarrollando rápidamente. Por otro lado, aunque no se considerará en este estudio, el PDSI tiene problemas estacionales dado que la metodología no maneja ni precipitación congelada ('Frozen precipitation' del inglés original) ni suelos congelados (WMO & GWP, 2016). Por último, al igual que en el caso del SPI, la escala de clasificación de gravedad de los eventos fue definida de forma arbitraria por Palmer (1965): "En tanto las ecuaciones proveen una medida de la sequedad, las siguientes categorías fueron definidas más o menos arbitrariamente y son las presentadas en la tabla 11" (p. 28).

5.2.4. Índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI)

Desarrollado a partir del índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) con el objetivo de cuantificar la sequedad a largo plazo que puede afectar los almacenamientos de agua, los caudales de las corrientes y los niveles de aguas subterráneas; es decir, los efectos a largo plazo de las sequías hidrológicas. 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 (Indiana State Department of Agriculture, s.f.; WMO & GWP, 2016; North Carolina State University, s.f.). La escala de clasificación de este índice es igual a la presentada para el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) en la Tabla 2.

En cuanto a las ventajas que presenta esta metodología se tiene principalmente que permite considerar la totalidad del sistema de agua dado que su aproximación es de balance hídrico. Por otro lado, las desventajas o limitaciones son entre otras el hecho de que su interpretación es más compleja que la del PDSI (porque responde más lentamente a condiciones de sequía que éste) además de que no incluye dentro del cálculo la influencia humana como decisiones de manejo del recurso ni irrigación (WMO & GWP, 2016, Indiana State Department of Agriculture, s.f.).

5.2.5. Índice de anomalía de humedad de Palmer (Z)

El Índice de anomalía de humedad de Palmer (Z) es un producto intermedio en el cálculo del Índice Severidad de Sequía de Palmer definitivo (PDSI). El índice Z responde a variaciones de las condiciones en el corto plazo mejor que el PDSI y, típicamente, su cálculo se hace para escalas temporales mucho menores permitiendo la identificación de sequías de rápido desarrollo. Al igual que los dos índices de Palmer antes presentados, la escala de clasificación de gravedad es la presentada en la Tabla 2; sin embargo, el índice Z en general presenta un rango de variación menor que el PDSI y el PHDI tendiendo a oscilar entre -2.75 y 3.5 (WMO & GWP, 2016; North Carolina State University, s.f.).

Las ventajas y desventajas de esta metodología de cálculo de índice son las mismas que las del PDSI, pero adicionalmente, se puede añadir como desventaja el hecho de que, dada su sensibilidad a variaciones en el corto plazo, el índice Z tiende a presentar oscilaciones bruscas en su comportamiento (Hurtado Moreno & Cadena, 2002).

5.2.6. Índice de reconocimiento de sequía (RDI)

Esta metodología de cálculo de índice fue desarrollada con el objetivo de cuantificar el déficit de agua de una forma más precisa, utilizando una especie de balance entre las entradas y salidas de un sistema determinado (Tsakiris & Vangelis, 2005; Tsakiris *et al.*, 2007). De esta forma, el cálculo del índice se basa en la utilización de precipitación acumulada (medida) y evapotranspiración potencial (calculada). Aunque se podría suponer que el método de cálculo de la evapotranspiración potencial podría llegar a afectar el resultado del índice, se ha encontrado que parece no tener influencia alguna en los valores obtenidos (Vangelis *et al.*, 2013).

El valor inicial del índice (a_k) se puede calcular para el i -ésimo año en una base temporal de k meses como sigue:

$$a_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde P_{ij} y PET_{ij} son la precipitación y evapotranspiración potencial del j -ésimo mes del i -ésimo año. Se ha encontrado que los valores de a_k se ajustan adecuadamente a las distribuciones gamma y Log-normal para diferentes ubicaciones y escalas temporales donde se ha ensayado la metodología (Tigkas, 2008; Tsakiris *et al.*, 2008). Tomando la distribución Log-normal como aplicable, puede estimarse el valor estandarizado del índice (similar al cálculo del SPI) utilizando la siguiente ecuación:

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad \text{Ecuación 7}$$

En donde $y^{(i)}$ es el logaritmo natural de $a_k^{(i)}$, $\bar{y}$ es la media aritmética y $\hat{\sigma}_y$ es la desviación estándar. Para el caso donde la distribución gamma sea aplicable, el $RDI_{st}^{(i)}$ puede calcularse ajustando la función de densidad de probabilidad gamma a la distribución de frecuencias de $a_k^{(i)}$ (Tsakiris *et al.*, 2008; Tigkas, 2008). Para períodos de referencia cortos (p.e. mensuales o trimestrales) que pueden incluir valores de precipitación acumulada de cero para el período, puede estimarse el $RDI_{st}^{(i)}$ basándose en una función de distribución compuesta acumulativa que incluye la probabilidad de precipitación igual a cero y la probabilidad acumulada gamma (Tigkas *et al.*, 2013).

Valores positivos del índice estandarizado muestran periodos húmedos mientras que los negativos periodos secos, comparados con las condiciones normales del área de estudio. La categorización de gravedad de eventos de sequía, planteada por los autores se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de gravedad de sequías para RDI_{st}

Valor	Clasificación
<-2.0	Extremadamente seco
-1.5 a -1.99	Muy seco
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-0.5 a -0.99	Levemente seco

Fuente: Tsakiris & Vangelis, 2005

Dentro de las principales ventajas del empleo de este índice se tiene, en primer lugar, que el uso de la evapotranspiración potencial genera una mejor representación del balance hídrico total en una determinada región (mejor que la que da el SPI). En segundo lugar, el índice puede estimarse para diferentes pasos de tiempo y, finalmente, toda la matemática requerida para su cálculo puede encontrarse fácilmente en la literatura. Respecto a sus desventajas se tienen dos principalmente. La primera es el hecho de que el cálculo de la evapotranspiración potencial se lleva a cabo únicamente a partir de temperatura y esto puede llevar a errores en la estimación. La segunda, es que su reacción en escalas mensuales puede no ser tan rápida como se requiere para identificar sequías de desarrollo rápido (WMO & GWP, 2016).

5.2.7. Índice de sequía de caudales (SDI)

Este índice fue desarrollado por Nalbantis & Tsakiris (2008) utilizando la metodología y cálculos del SPI como base. La metodología emplea valores mensuales de caudales, así como los métodos de normalización asociados con el SPI para calcular los valores del índice. Dado que su salida es similar a la obtenida al emplear el SPI, permite analizar tanto periodos secos como húmedos, así como establecer la gravedad de los eventos (WMO & GWP, 2016). La escala de clasificación de gravedad, adoptada por los autores, es la misma planteada por McKee *et al.* (1993) para el SPI.

Las ventajas de la utilización de este índice son las mismas identificadas para el SPI: el código para su cálculo ampliamente difundido, el uso de información incompleta está permitido (aunque a mayor longitud del registro de caudales los resultados son más precisos), permite análisis de varias escalas temporales y permite la identificación de periodos secos y húmedos. Finalmente, la mayor debilidad que posee este índice es que utiliza un único parámetro (caudales) y no toma en cuenta decisiones de manejo sobre el mismo (WMO & GWP, 2016).

5.2.8. Índice de deciles de precipitación (DI)

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 y consiste en dividir 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 del registro y el quinto decil corresponde a la mediana de la distribución. Diversas escalas temporales de registros (diarios, semanales, mensuales, estacionales y/o anuales) pueden ser utilizadas para el cálculo, dado que éste es flexible cuando se comparan valores actuales con registros históricos, para cualquier periodo de tiempo.

En general, la clasificación de gravedad de eventos considera 5 rangos (2 deciles por rango) y es la que se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de gravedad de sequías para DI	
Deciles	Clasificación
<i>Deciles 1 y 2: 20% más bajo</i>	Muy por debajo de lo normal
<i>Deciles 3 y 4</i>	Bajo lo normal
<i>Deciles 5 y 6</i>	Cerca de lo normal
<i>Deciles 7 y 8</i>	Sobre lo normal
<i>Deciles 9 y 10: 20% más alto</i>	Muy por encima de lo normal

La principal ventaja del uso de esta metodología es el hecho de que es simple y flexible y utiliza una única variable. Al contar con rangos de clasificación de gravedad bien definidos, se pone en contexto histórico la información y resulta útil tanto para condiciones secas como húmedas. En cuanto a las desventajas, al igual que otras que utilizan únicamente precipitación, no se consideran impactos de parámetros como la temperatura en el desarrollo de los eventos de sequía. Igualmente, para la definición de deciles precisos, se requiere la utilización de un registro climatológico largo que en muchas zonas puede no estar disponible.

5.3. Identificación y características principales de eventos de sequía

Yevjevich (1967) propuso el uso de la teoría de las corridas ('Run theory') para definir las características de una sequía (ver Figura 1). Una corrida se define entonces como la porción del tiempo en la cual el parámetro de identificación de sequía X_t (puede ser cualquiera de los índices antes mencionados) se encuentra por encima o debajo de un valor de truncamiento X_o (si se está por encima del límite es una corrida positiva y si se está por debajo, una corrida negativa).

Por otro lado, la determinación de las características de una sequía es importante para el análisis matemático de la misma. Yevjevich (1967) y Dracup *et al.* (1980) encontraron que un evento de sequía presenta los componentes que se muestran a continuación (ver Figura 1):

- i. Tiempo de inicio de sequía (t_i): Es el inicio del período de reducción en la disponibilidad de agua; es decir, el comienzo del evento de sequía.
- ii. Tiempo de terminación de sequía (t_c): Es el momento en el cual la disponibilidad de agua se incrementa de tal forma que las condiciones de sequía no persisten más.
- iii. Duración de sequía (D_d): Se expresa como años, meses, semanas etc., durante el cual el índice o indicador de sequía se encuentra, de forma continua, por debajo del nivel

crítico. En otras palabras, es el periodo comprendido entre el inicio y terminación de una sequía.

- iv. Severidad de sequía (S_d): Indica la deficiencia acumulada de un parámetro de sequía cuando este se encuentra por debajo del valor de truncamiento (sumatoria de los valores de un determinado índice cuando éste se encuentra por debajo del valor límite, de forma continua a lo largo de la duración del evento de sequía).
- v. Intensidad de sequía (I_d): Es el valor promedio del indicador o índice cuando está debajo del valor crítico. Se calcula simplemente como la severidad de sequía sobre la duración de la misma.

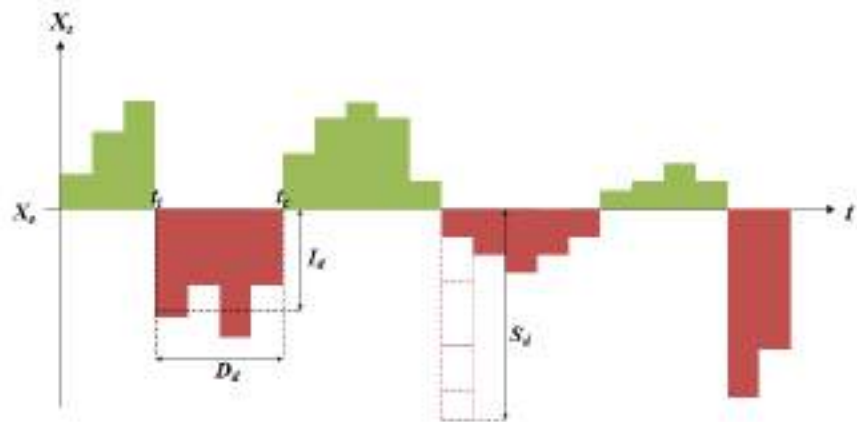


Figura 1. Características eventos de sequía

5.4. Comportamiento histórico de la sequía en Colombia

El índice estandarizado de precipitación (SPI) 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* (IDEAM, 2005) las principales sequias registradas en Colombia, discriminadas por regiones geográficas, han sido:

5.4.1. Región andina

Los periodos con sequías más extendidas se registraron 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).

5.4.2. 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 presentándose cerca de 28 eventos en los cuales se identificaron semestres secos en más del 30% del territorio. Se destacan los siguientes eventos: 1965, 1972-1973, 1976, 1982-1983, 1986, 1991 y 1997.

5.4.3. Región pacífica

La sequía ha afectado menos a esta región que a la región Caribe y su comportamiento 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 en la década de los 80, como 1982-1983, 1985-1986, y en la década de los 90, 1991-1992 y 1997-1998. Vale la pena aclarar que estos eventos, especialmente en la zona del Chocó, no corresponden a sequías agrícolas sino atmosféricas. Así, los almacenamientos de agua en el suelo permanecen adecuados para los cultivos, aun cuando se presenta la mitad de la precipitación normal.

5.4.4. Región Orinoquía-Amazonía

Podría considerarse que esta es la región que ha sido menos afectada por la sequía. De acuerdo con las 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 presentaron períodos secos de distinta intensidad y duración en 1974-1975, 1985-1986, 1991-1992 y 1997-1998.

5.5. Aproximaciones metodológicas al estudio de sequías

5.5.1. Análisis de variabilidad temporal de eventos de sequía

Los importantes impactos ecológicos y socioeconómicos de las sequías han llevado a muchos investigadores a considerar los potenciales efectos que podría llegar a tener el cambio climático en el frecuencia, duración y severidad de estos fenómenos (Rayne & Forest, 2016). A escala global, durante el siglo XXI, se espera que la severidad y frecuencia de las sequías se incrementen tal como indican Dai *et al.* (2004), Burke *et al.* (2006), Sheffield & Wood (2008), Briffa *et al.* (2009) y Dai (2011). En general, el trabajo realizado respecto al tema se localiza en Estados Unidos y ha permitido identificar tendencias temporales crecientes en la intensidad y severidad de eventos de sequía en las regiones oeste y suroeste, y cambios poco claros o despreciables en las demás zonas del país (Rayne & Forest, 2016).

La aproximación más reciente al estudio de tendencias temporales en severidad de eventos de sequía fue la desarrollada por Rayne & Forest (2016). En su estudio, los autores evaluaron la variabilidad de eventos de sequía en periodos inferiores a una década. La variabilidad fue estudiada a partir de series de los índices de Palmer (PDSI, PHDI, Z) para ventanas temporales de tres, cinco y ocho años, en el periodo comprendido entre 1895 y 2016 para la totalidad del país.

Inicialmente, se definió una serie de magnitudes de eventos de sequía como la resta entre el máximo valor del índice y el mínimo valor del mismo, para cada periodo de estudio. Una vez construidas estas series, se llevaron a cabo análisis estadísticos de las mismas. Dentro de estos análisis se incluyeron la prueba no paramétrica de Mann-Kendall, para la identificación de tendencias, y el método no paramétrico de Sen para la cuantificación de la magnitud de la misma (utilizando el ambiente de cálculo estadístico R) (R Core Team, 2012). También se llevaron a cabo regresiones lineales paramétricas y correlaciones no paramétricas de Spearman utilizando los programas Kyplot (Yoshioka, 2002) y R (Rayne & Forest, 2016).

Se encontró que, para la totalidad del territorio de los Estados Unidos, se presentaba una tendencia creciente significativa en la serie anual de severidad hallada para la ventana de análisis de cinco años. En este periodo, el promedio de severidad del PDSI se incrementó en cerca de una unidad,

indicando un aumento significativo en la variabilidad de eventos de sequía en escalas temporales cortas, para los Estados Unidos. Las tendencias encontradas fueron similares en el caso de las series de severidad para PHDI y Z. Como conclusión, se planteó que los patrones de sequía interanuales en los Estados Unidos se están volviendo más extremos y difíciles de predecir y que, esto último, representa un desafío para los esfuerzos de planificación en agricultura y otras actividades relacionadas con el agua (Rayne & Forest, 2016).

5.5.2. Curvas Severidad-Área-Frecuencia y Severidad-Duración-Frecuencia

Numerosos estudios se han llevado a cabo para la caracterización de eventos de sequía y su análisis probabilístico (Dalezios *et al.*, 2001; Paulo & Pereira, 2006; Nalbantis & Tsakiris, 2009; Santos *et al.*, 2011; Lloyd-Hughes, 2012; Todisco *et al.*, 2013). Los análisis de frecuencia son una de las más comunes aplicaciones de la estadística en la hidrología y aquellos llevados a cabo para las ocurrencias de sequías, son importantes porque permiten cuantificar la severidad, duración y frecuencia de los eventos para un área determinada. Para analizar la distribución espacial de sequías futuras, aplicando métodos de análisis estadístico, se han desarrollado herramientas como las curvas severidad-área-frecuencia (SAF), severidad-duración-frecuencia (SDF) y severidad-área-duración (SAD). Las anteriores son instrumentos muy útiles en el entendimiento de las características espacio-temporales de los eventos de sequía (Rahmat *et al.*, 2015).

5.5.5.1. Curvas SAF

Se puede afirmar que una sequía a nivel regional ocurre cuando una fracción significativa del área total de la región estudiada se encuentra bajo condiciones de déficit; en otras palabras, cuando la suma de las áreas afectadas por sequías locales alcanza un cierto valor límite. La frecuencia en la ocurrencia de sequías no puede cubrir completamente el estudio de estos eventos, a menos que se relacione cuantitativamente con otras características como severidad y área (Mishra & Desai, 2005).

Lo anterior, lleva al desarrollo de las curvas Severidad-Área-Frecuencia (SAF) que pueden ser un método útil en la evaluación de sequías en una región. De esta forma, una sequía regional puede ser descrita por su duración, déficit acumulado de agua en el área, intensidad y extensión promedio regional. La derivación de estas curvas se basa en la división de la región de estudio en zonas más pequeñas (celdas) que se van agregando hasta completar el 100% del área. El procedimiento que por lo general se usa para derivarlas se presenta a continuación (Mishra & Desai, 2005; Campos-Aranda, 2013):

1. Se calcula la serie de valores del índice respecto al cual se quiere hallar la curva SAF, para cada una de las celdas en las cuales se dividió el área de estudio. Es importante mencionar que cuando se está trabajando con estaciones en tierra, la información de precipitación de las mismas debe ser interpolada. En general, se recomienda el uso del método IDW que utiliza como peso para la interpolación, el inverso de la distancia a la estación de medición. Vale la pena mencionar que este método está disponible dentro de la caja de herramientas de ArcMAP de Esri (Toolbox, 3D Analyst Tools, Raster Interpolation, IDW).
2. Se obtiene la severidad anual máxima de eventos de sequía (ver sección 5.3 de este documento) para cada celda.
3. Se prueban diferentes distribuciones de probabilidad para severidad de sequía hasta encontrar la mejor distribución para el análisis de frecuencia.

4. Se lleva a cabo el análisis de frecuencia utilizando la distribución de probabilidad seleccionada para la severidad de sequía en cada una de las celdas de la región.
5. Con base en la severidad asociada con cada periodo de retorno analizado, se calculan los valores máximos asociados con áreas crecientes desde la celda con el máximo valor hasta el promedio de todas.

La última parte del procedimiento descrito intenta reproducir el avance natural de las sequías tomando en cuenta, en el cálculo de la severidad para cada área, únicamente los valores máximos de severidad en celdas adyacentes (Campos-Aranda, 2013).

Ejemplos de la construcción de estas curvas para análisis de regiones en el mundo incluyen los trabajos realizados por Campos-Aranda (2013) en el valle de San Luis de Potosí, México y Mishra & Desai (2005) en la cuenca del río Kansabati en India. Para este último caso, Mishra & Singh (2009) evaluaron la variabilidad de estas curvas bajo escenarios de cambio climático. Los resultados de este estudio permitieron concluir que era posible que se presentaran sequías más severas, y de mayor extensión espacial, en el periodo 2001-2050 respecto a las históricamente registradas.

5.5.5.2. Curvas SDF

Como se mencionó antes, la frecuencia de ocurrencia de eventos de sequía puede no cubrir de forma total y suficiente la caracterización de estos fenómenos, a menos que se relacionen cuantitativamente con otros aspectos como severidad y duración. Lo anterior, al igual que en el caso de las curvas SAF, lleva al desarrollo de las relaciones Severidad-Duración-Frecuencia (SDF) (Dalezios *et al.*, 2001).

El procedimiento más simple para la construcción de las curvas SDF se presenta a continuación (Dalezios *et al.*, 2001):

1. Se calcula la serie de valores del índice respecto al cual se quiere hallar la curva SDF, para cada una de las estaciones climatológicas disponibles en el área de estudio.
2. Se identifican los eventos de sequía a partir de las series de índices calculadas en el paso anterior. Es importante mencionar que múltiples eventos por año pueden ser tenidos en cuenta en el análisis SDF.
3. Para cada evento identificado, se hallan los parámetros duración y severidad de acuerdo con las definiciones descritas en la sección 5.3 de este documento.
4. Se construyen series de severidad para cada una de las duraciones identificadas (p.e. series de severidad para duraciones de 3, 4, 6, 9 y 12 meses).
5. Para cada serie de severidad construida se realiza un análisis de frecuencia independiente. En general, se han encontrado buenos ajustes al utilizar las distribuciones GEV, Log-Normal 3 parámetros y Log-Pearson T3.
6. Se construyen las curvas SDF modificando las curvas obtenidas en el análisis de frecuencia, para cada duración, de tal forma que en el eje de las ordenadas se tenga severidad, en el de las abscisas duración y cada curva represente un período de retorno (Ver Figura 2).

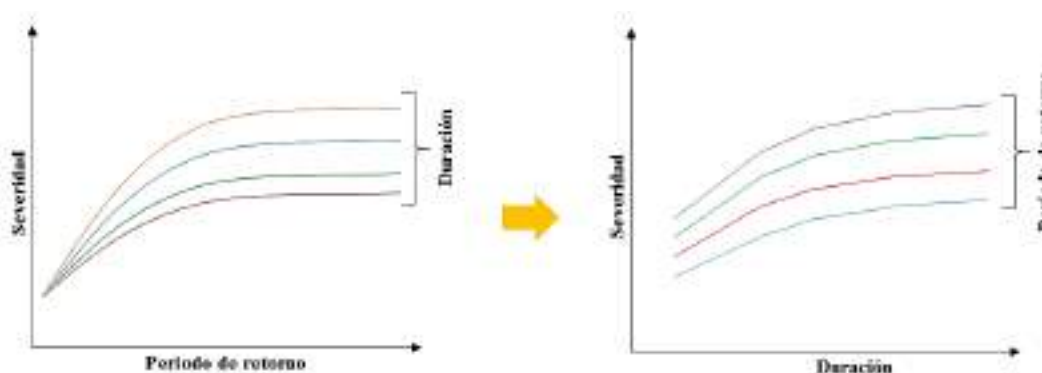


Figura 2. Conversión análisis de frecuencia a curvas SDF

Estudios en los cuales se han construido curvas SDF para diferentes regiones del mundo se presentan a continuación. Dalezios *et al.* (2001) desarrollaron relaciones SDF para eventos de sequía en Grecia utilizando distribuciones de valores extremos y aplicando dichas relaciones en la construcción de mapas de iso-severidad para diferentes períodos de retorno en la región de estudio. Saghafian *et al.* (2003) analizaron sequías en Irán utilizando la teoría de las corridas y con ello, derivaron curvas SDF y mapas de iso-severidad del área analizada. Para las dos anteriores aplicaciones, el método utilizado para derivar las curvas SDF fue el que se presentó antes. En el oeste de la India, Janga Reddy & Ganguli (2012) desarrollaron una aproximación probabilística multivariada, basada en cópulas, para modelar las relaciones SDF de los eventos de sequía (Rahmat *et al.*, 2015). Utilizando este último enfoque, Ganguli & Ganguly (2016) construyeron curvas SDF para establecer tendencias temporales de sequía meteorológicas en Estados Unidos y Masud *et al.* (2015) establecieron la relación para la cuenca del río Saskatchewan en Canadá.

5.5.3. Uso de índices de condición de vegetación

De acuerdo con la información consultada, a pesar de que las metodologías convencionales de cálculo de índices de sequía pueden proveer estimaciones precisas de condiciones puntuales, su nivel de precisión y de detalle espacial son función de la densidad y distribución de la red de estaciones en el área de estudio (Brown *et al.*, 2008). Por otro lado, los índices de crecimiento de vegetación, derivados a partir de información satelital, son uno de los indicadores más importantes para la medición de estrés de la vegetación durante eventos de sequía. Índices relacionados con el verdor de la vegetación, como el índice normalizado de diferencia de vegetación (NDVI), el índice mejorado vegetativo (EVI) o el índice de condición de la vegetación (VCI), se usan con frecuencia para la evaluación de sequías agrícolas (Bajgain *et al.*, 2015).

A pesar de que la información satelital ha probado ser muy útil para detectar anomalías en la condición de la vegetación, la causa específica de las mismas no siempre puede ser determinada únicamente a partir de datos de sensores remotos. Un número importante de eventos naturales (sequías, inundaciones, incendios, plagas, heladas, etc.) y antropogénicos (cambio de uso y cobertura del suelo) pueden causar anomalías similares. De esta forma, aunque los datos de sensores remotos proveen un medio para monitorear los patrones espaciales detallados de la condición de la vegetación, a menudo es difícil distinguir entre el estrés relacionado con sequías y el generado por otras causas, sin contar con información adicional. De esta forma, la integración de información climática de

resolución gruesa (índices de sequía convencionales basados en información de estaciones en tierra) y observaciones de vegetación basadas en satélite, de mejor resolución, provee un enfoque alternativo para monitorear y caracterizar mejor la extensión espacial, intensidad y variabilidad local de los efectos de la sequía (Brown *et al.*, 2008).

Algunos de los estudios en los cuales se han utilizado índices de condición de la vegetación para el monitoreo de diferentes tipos de sequía se presentan a continuación:

- **Nicholson & Farrar** (1994) evaluaron la relación entre la precipitación en 26 estaciones climáticas en Botsuana y el NDVI. Encontraron una relación lineal entre los dos parámetros cuando la precipitación estaba por debajo de la profundidad requerida para alcanzar saturación en el suelo en el sitio de estudio. Una vez se excedía este umbral, el NDVI solo aumentaba ligeramente con precipitaciones adicionales.
- **Kogan** (1997) encontró una fuerte relación entre el VCI y la producción agrícola en Sur América, África, Asia, Norte América y Europa; particularmente, durante periodos críticos de crecimiento de cultivos. Por ejemplo, la relación entre el VCI y la productividad del maíz en algunas regiones de Argentina fue tan alta como 0.92.
- **Unganai & Kogan** (1998) llevaron a cabo un análisis detallado de la relación entre el VCI y el rendimiento en cultivos de maíz en el sur de África. Encontraron que el VCI explicaba entre 46 y 83% de la variación en el rendimiento. Los autores concluyeron que los satélites podían ser usados para detectar, monitorear y mapear sequías agrícolas.
- **Wang *et al.*** (2001) examinaron la relación entre el NDVI y la variabilidad de la precipitación en Kansas. Durante el verano, la correlación era más fuerte cuando la precipitación estaba en promedio por encima de uno o los dos meses anteriores. Además, se encontró que la importancia de la correlación variaba de acuerdo con la cobertura de la tierra.
- **Ji & Peters** (2003) también examinaron la relación entre el NDVI y la precipitación. Específicamente evaluaron el comportamiento del SPI, durante la temporada de crecimiento en las grandes planicies del norte y centro de Estados Unidos, entre 1989 y 2000. Encontraron que el SPI con escala temporal de tres meses era el que estaba más correlacionado con el NDVI y que, por esta razón, éste era el rezago entre la ocurrencia de la precipitación y la respuesta de la vegetación. Se encontró además, que la importancia de las correlaciones variaba tanto espacial como temporalmente y que los valores más altos se presentaron en regiones con bajas capacidades de campo. Los autores concluyeron que mientras que el NDVI es una variable útil para monitorear las condiciones de la vegetación, la naturaleza de la relación entre éste y las condiciones de sequía puede variar de acuerdo con la temporada, las características de la vegetación y tipo de suelo.
- **Wan *et al.*** (2004) evaluaron la posibilidad de utilizar el índice de condición de temperatura de la vegetación (VTCI) basado en MODIS, para monitorear sequías en las grandes planicies de Estados Unidos. Se validó el uso del VTCI utilizando precipitación medida en estaciones en tierra. Las correlaciones más altas fueron de aproximadamente 0.66 y se encontró que el rezago entre la ocurrencia de la precipitación y la respuesta de la vegetación era de aproximadamente 1 mes (significativamente más bajo que el rezago reportado por Wang *et al.* en 2001 y por Ji & Peters en 2003). Sin embargo, en este estudio se reportó que el rezago variaba en función del tipo de vegetación de la zona de estudio.

- **Bayarjargal et al.** (2006) compararon índices basados en estaciones con otros derivados a partir de información satelital, en regiones desérticas y estepas de Mongolia. Se encontró poca coincidencia los resultados obtenidos utilizando los dos métodos y adicionalmente, entre los diferentes índices satelitales evaluados. Lo anterior, llevó a los autores a cuestionar la idoneidad de los índices de vegetación basados en información satelital para monitorear sequías.
- **Vicente-Serrano** (2007) analizó el impacto de la sequía en la vegetación en una región semi-árida de la península ibérica utilizando VCI. Se demostró que la influencia de la sequía en la vegetación, y por lo tanto la respuesta del VCI, varía dependiendo del mes, tipo de cobertura de suelo y clima de la región.
- **Brown et al.** (2008) encontraron que mientras que las observaciones de vegetación basadas en satélite son útiles, las causas del estrés no siempre pueden ser determinadas. Se introdujo una nueva metodología de monitoreo de sequía que integraba índices hallados a partir de información en estaciones e información de cobertura de la tierra y suelos, para producir un índice híbrido (VegDRI). La evaluación inicial de la metodología sobre el centro de Estados Unidos sugirió que el índice se relacionaba bien con condiciones de sequía experimentadas en estaciones climáticas individuales.
- **Quiring & Ganesh** (2010) evaluaron la relación entre el VCI y un número de índices meteorológicos frecuentemente utilizados. En particular, la respuesta del VCI fue comparada con el PDSI, Z, SPI, PN y DI. Se encontró que el VCI está estrechamente relacionado con el SPI para 6 y 9 meses, así como con el PDSI. Lo anterior permitió concluir que, al menos para la región de estudio, el VCI en la temporada de crecimiento respondía a un prolongado estrés hídrico siendo menos sensible a deficiencias de precipitación en el corto plazo.
También se encontró una variabilidad espacial importante en la relación entre el VCI y los índices meteorológicos y cerca del 75% de estas variaciones pudieron ser explicadas utilizando series de variables ambientales. De las variables evaluadas, se encontró que la región climática era la más importante en la naturaleza de la relación entre VCI y el PDSI. Otras variables relevantes fueron el uso del suelo y su cobertura, la cantidad de irrigación y las propiedades del suelo.
Los anteriores resultados permitieron demostrar que el VCI debería ser utilizado con cuidado en el monitoreo de sequías. Lo anterior, dado que el índice no siempre está correlacionado con índices meteorológicos basados en estaciones y puede estar fuertemente influenciado por factores ambientales que varían espacialmente.
- **Bajgain et al.** (2015) derivaron series de índices NDVI, EVI y LSWI a partir del sensor MODIS, con resolución espacial de 500 metros, para el período 2010 - 2013 y compararon su sensibilidad a eventos de sequía en dos praderas de pastos altos de Oklahoma, en Estados Unidos. Como se esperaba, los valores promedio de índices de vegetación se redujeron consistentemente, respecto a condiciones normales, bajo condiciones de sequía.

5.6. Software empleado

5.6.1. SPI

Programa desarrollado por el National Drought Mitigation Center de la Universidad de Nebraska en Lincoln que permite el cálculo del índice estandarizado de precipitación a partir de una serie temporal de este parámetro (National Drought Mitigation Center, s.f.). La interfaz del software se presenta en la Figura 3. En este punto vale la pena mencionar que, dado que el procedimiento de cálculo del índice estandarizado de precipitación es adoptado en la estimación de los índices de reconocimiento de sequías (RDI) y sequía de caudales (SDI), el software puede ser utilizado para el cómputo de series de estos dos últimos.

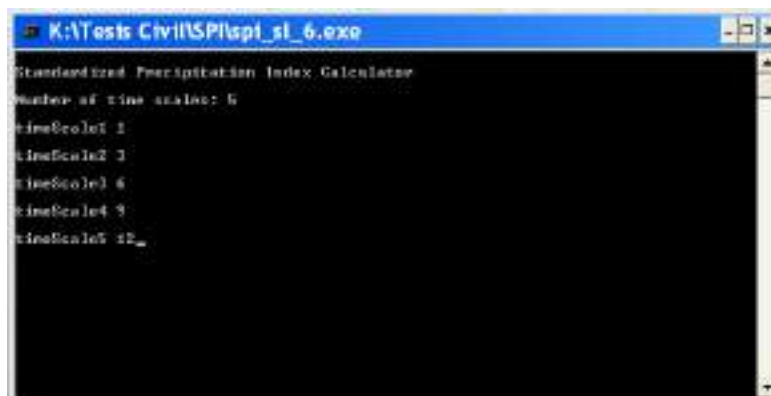


Figura 3. Interfaz programa SPI

El programa se encuentra compilado en C++ y únicamente requiere un archivo de texto como entrada. Dicho archivo debe contener, en columnas independientes y en orden, año, mes y precipitación (o serie del parámetro con base al cual se esté estimando el índice). Consideraciones adicionales para la construcción del archivo de entrada incluyen dejar la primera columna del mismo en blanco e introducir la serie de estudio sin decimales.

Dentro de las ventajas que se tienen en la utilización de esta herramienta se encuentran el hecho de que permite el cálculo del índice para el número de escalas temporales definidas por el usuario, que no requiere continuidad en la serie de entrada ni que el inicio de esta corresponda con un mes determinado y que la construcción del archivo de entrada es sencilla. Respecto a las desventajas, la principal es el hecho de que únicamente realiza el ajuste de la serie a una distribución gamma; sin embargo, como se mencionó anteriormente, investigaciones previas han mostrado que por lo general el ajuste de series de precipitación, precipitación sobre evapotranspiración potencial y caudales tienden a ajustarse adecuadamente a dicha distribución.

Por último y como salida, el programa genera un archivo de texto (.dat) que contiene la serie de índice para las escalas temporales definidas por el usuario en orden.

5.6.2. Matlab Palmer Drought Indices Calculator

Herramienta desarrollada por Jacobi *et al.* (2013). El programa permite estimar el valor de todos los índices de Palmer (PDSI, PHDI y Z) a partir de registros de precipitación y temperatura; adicionalmente, requiere un valor de Agua Disponible Total (AWC) para el suelo de la estación analizada y la latitud de la misma.

La herramienta utiliza el formato *.m* (Matlab) y permite el cálculo de los índices en cualquier escala temporal y espacial. Igualmente, proporciona al usuario la posibilidad de definir qué método emplear para la estimación de valores de evapotranspiración, Thornthwaite o Hamon, y con qué periodo realizar la calibración del mismo. El periodo de calibración utilizado por defecto por el programa es el definido por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) que abarca desde 1931 hasta 1990. Vale la pena mencionar que los registros, tanto de precipitación como de temperatura, deben ser continuos, de más de 10 años, iniciar en enero y encontrarse en unidades de pulgadas y grados Fahrenheit, respectivamente. El AWC también debe expresarse en pulgadas.

Como resultado se genera un archivo con extensión *.dat* que contiene, para cada mes de análisis, valores estimados de evapotranspiración, índice de anomalía de humedad de Palmer (Z), índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) e índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI). La interfaz de la herramienta se presenta en la Figura 4.



Figura 4. Interfaz Calculadora índices de Palmer

5.6.3. TREND

El software fue desarrollado en 2012 por el Centro de Investigación Cooperativa para la Hidrología de Cuencas del gobierno australiano como parte del Programa de Variabilidad Climática (CRC for Catchment Hydrology, 2012). El objeto del programa es facilitar la realización de pruebas estadísticas con el objeto de identificar tendencias, cambios y aleatoriedad en series de tiempo.

TREND incluye 12 pruebas estadísticas relativamente robustas y fáciles de entender dentro de las cuales se encuentran:

1. Para identificación de tendencias
 - 1.1. Prueba de Mann-Kendall
 - 1.2. Prueba de Rho de Spearman.
 - 1.3. Prueba de regresión lineal.
2. Para identificación de saltos en la media
 - 2.1. Prueba de suma acumulada (CUSUM)

- 2.2. Prueba de desviación acumulada
- 2.3. Prueba de verosimilitud de Worsley

Vale la pena mencionar que las pruebas estadísticas realizadas por TREND son válidas, únicamente, si la serie de tiempo analizada no está temporalmente correlacionada. Dado que en la mayoría de escalas temporales menores a un año, las series no cumplen con esta condición, se recomienda no utilizar el software para las mismas. De todas formas, una de las pruebas estadísticas incluidas permite verificar esta característica (prueba de autocorrelación).

5.6.4. CEEMDAN

Herramienta desarrollada por Torres *et al.* (2011), compilada en Matlab, que permite la descomposición de una serie de tiempo en sus funciones modales intrínsecas (IMF) (Díaz-Granados & Camacho, 2014). Este toolbox fue utilizado para dos procesos fundamentales: i) Descomposición de series de magnitudes, cuando las pruebas estadísticas aplicadas a éstas mostraran auto correlación temporal y se requiriera aplicar la prueba de Mann-Kendall modificada y ii) Descomposición de señales de índices de vegetación a nivel regional y de series de intensidad de eventos de sequía (también a nivel regional).

La herramienta requiere como única entrada la serie temporal a descomponer. Dicha serie debe encontrarse almacenada en un vector fila disponible en el Workspace. La herramienta genera como salida una matriz N número de filas y M columnas (siendo N el número de modos en los cuales se descompuso la señal de entrada y M el número de elementos contenidos en la señal temporal de entrada). Entre otras cosas, el uso de este procedimiento lleva a la obtención de señales mucho menos ruidosas que las originales, a la identificación de puntos de la serie temporal donde picos y valles más pronunciados pudieron haberse presentado (modos intermedios) y, en último término, a la identificación de la tendencia a largo plazo de la serie analizada (último modo). Los resultados generados al correr la herramienta pueden ser apreciados en la Figura 5.

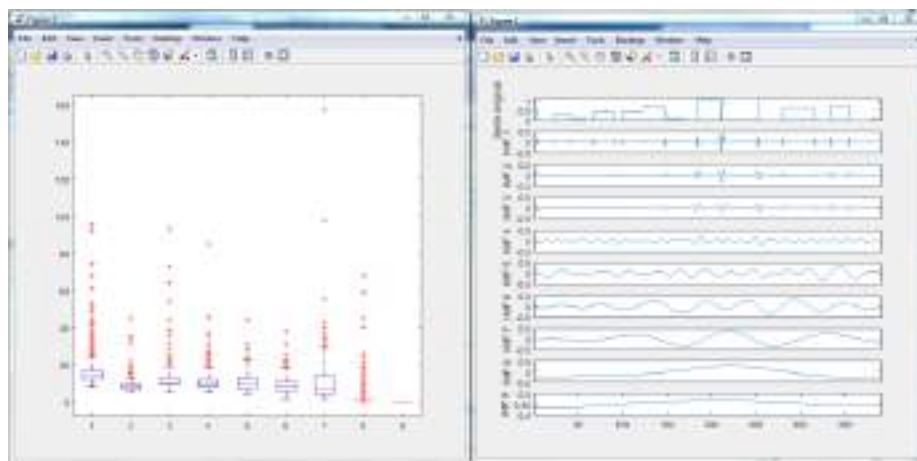


Figura 5. Resultados generados CEEMDAN

5.6.5. Otros softwares

Adicionalmente a los softwares ya mencionados, dentro del desarrollo de la investigación se utilizaron otros entre los cuales es posible mencionar:

- XLSTAT: Se empleó en el análisis de correlaciones cruzadas entre series de índices y series de índices de fenómenos macroclimáticos.
- HYFRAN: Requerido en el ajuste de series de severidad de eventos a distribuciones de probabilidad y su posterior extrapolación para establecer periodos de retorno asociados (análisis de frecuencia).
- ArcMAP: Se utilizó en la interpolación de series de índices de sequía, severidades de eventos y duraciones de los mismos. Igualmente, permitió el corte y manejo de series de índices de condición de vegetación, que fueron ser descargados como rásters.
- Mann-Kendall Modified Toolbox: Desarrollada por Fachiti (2009) esta herramienta compilada en Matlab desarrolla la prueba de Mann-Kendall modificada para considerar auto correlación en series de tiempo. Requiere como entradas un vector columna donde se encuentre almacenada la serie de tiempo a analizar (después de haberle realizado descomposición en funciones modales intrínsecas a la serie original) y el valor de significancia con el que se realizará la prueba.
- MATLAB: Su utilidad consistió en la generación de scripts para la construcción de series de magnitudes de eventos y su posterior análisis de tendencias. Igualmente, se requirió su uso para la generación de series de índices de Palmer, para la descomposición de series de tiempo en sus funciones modales intrínsecas y para la realización de la prueba de Mann-Kendall modificada.

5.7. Casos de estudio

5.7.1. Criterios de selección

El proceso de selección de los casos de estudio se llevó a cabo basándose en lo registrado por el IDEAM en el Estudio Nacional del Agua 2014. De esta forma, se buscó identificar aquellas cuencas que por su ubicación (área y zona hidrográfica), demanda de recurso (tanto para actividades agropecuarias como para consumo humano), tamaño de municipios servidos y vulnerabilidad por limitaciones en disponibilidad de agua, pudieran llegar a ser susceptibles a afectaciones importantes por eventos de sequía. Así, la metodología utilizada para la definición de las cuencas de interés es la que se presenta a continuación:

1. Revisión de uso del agua para áreas hidrográficas definidas por el IDEAM e identificación de zonas hidrográficas donde se concentra el mismo.
 - 1.1. *Área hidrográfica Caribe*: El uso de agua representa el 16.23% del total del país y está concentrado en las zonas del Sinú (6% del uso del país con 1,654 millones de metros cúbicos al año) y Caribe litoral (1391 millones de metros cúbicos al año).
 - 1.2. *Área hidrográfica Magdalena-Cauca*: El uso de agua en esta zona representa el 67% del volumen total demandado en el país. Las mayores presiones por uso se presentan en las zonas del Alto Magdalena (23% del uso del país con 6,792 millones de metros cúbicos al año), Cauca (11.58% del total del país) y Medio Magdalena (9,91% del total del país).
 - 1.3. *Área hidrográfica Orinoco*: Demanda el 11.99% del agua total del país siendo Meta la zona más demandante (9.32% del total del país).

- 1.4. *Área hidrográfica Amazonas:* Participa con menos del 1% del agua usada en el país. El uso se concentra en las zonas de Putumayo (60 millones de metros cúbicos), Caquetá (54.7 millones de metros cúbicos) y Apaporis (9.032 millones de metros cúbicos).
- 1.5. *Área hidrográfica Pacífico:* Utiliza el 4,24% del total del país concentrándose en las zonas de Patía (600 millones de metros cúbicos), San Juan (539 millones de metros cúbicos) y Tapaje-Dagua-Directos (102.2 millones de metros cúbicos).
2. Determinación de zonas hidrográficas con huellas hídricas agrícolas mayores (se presentan en orden).
 - 2.1. *Área hidrográfica Caribe:* Caribe litoral, Catatumbo y Sinú.
 - 2.2. *Área hidrográfica Magdalena-Cauca:* Alto Magdalena, Cauca y Medio Magdalena.
 - 2.3. *Área hidrográfica Orinoco:* Meta, Guaviare y Casanare
 - 2.4. *Área hidrográfica Amazonas:* Caquetá, Putumayo y Caguán.
 - 2.5. *Área hidrográfica Pacífico:* Patía, Tapaje-Dagua-Directos y San Juan.
3. Análisis de índice de uso de agua (IUA) para sub-zonas hidrográficas. Se consideraron como posibles casos de estudio aquellas cuencas en las cuales el IUA mostró una clasificación crítica o muy alta, para año seco y que, además se encontraran dentro de las zonas hidrográficas críticas identificadas en los dos pasos anteriores.
 - 3.1. *Área hidrográfica Caribe*
 - 3.1.1. Caribe litoral: Ríos Mulatos y Canalete.
 - 3.1.2. Sinú: Bajo Sinú.
 - 3.1.3. Catatumbo: Río Pamplonita
 - 3.1.4. Guajira: Río Ranchería
 - 3.2. *Área hidrográfica Magdalena-Cauca*
 - 3.2.1. Alto Magdalena: Ríos Neiva, Prado, Sumapaz y Bogotá.
 - 3.2.2. Cauca: Ríos Palo y Cali
 - 3.2.3. Medio Magdalena: Ríos La Miel, Nare y Lebrija
 - 3.3. *Área hidrográfica Orinoco*
 - 3.3.1. Meta: Ríos Guavio y Garagoa
 - 3.4. *Área hidrográfica Amazonas:* Ninguna de las cuencas dentro de las zonas hidrográficas presenta las clasificaciones requeridas en IUA.
 - 3.5. *Área hidrográfica Pacífico*
 - 3.5.1. Patía: Río Mayo.
 - 3.5.2. Tapaje-Dagua-Directos: Ninguna de las cuencas dentro de la zona hidrográfica presenta las clasificaciones requeridas en IUA.
4. Identificación de sub-zonas hidrográficas con mayores huellas hídricas verdes pecuniarias: Se encontró que las 10 sub-zonas donde se concentra la huella hídrica verde son, en orden descendente, Bajo Sinú, Bajo Cararé, Lebrija, Suárez, Bajo San Jorge -La Mojana, Medio Cesar, Ariguaní, Bajo Cesar, Directos Bajo Magdalena y Chimuica (se presentan

subrayadas las sub-zonas que, en el paso 3 fueron identificadas como posibles casos de estudio).

5. Análisis de tamaño, importancia y número de municipios servidos con aguas de opciones consideradas. De esta forma, se redujo el conjunto inicial de cuencas dejando, únicamente, aquellas que surtieran acueductos de municipios importantes y que, además, se encontraran en áreas y zonas hidrográficas que concentraran un porcentaje importante del uso en el país.

5.1. *Río Sumapaz* (Área hidrográfica Magdalena-Cauca, zona hidrográfica Alto Magdalena): Suministra agua a los municipios de Granada, Pandi, San Bernardo, Silvania y Tibacuy en Cundinamarca y al municipio de Melgar en Tolima.

5.2. *Río Lebrija* (Área hidrográfica Magdalena-Cauca, zona hidrográfica Medio Magdalena): Suministra agua a los municipios de Bucaramanga, Puerto Wilches, Sabana de Torres y Rionegro en Santander.

5.3. *Bajo Sinú* (Área hidrográfica Caribe, zona hidrográfica Sinú): Suministra agua a los municipios de Montería, Cereté, Chimá, Momil, Purísima, San Carlos y San Pelayo en Córdoba.

5.4. *Río Pamplonita* (Área hidrográfica Caribe, zona hidrográfica Catatumbo): Suministra agua a los municipios de Cúcuta, Chinacota, Herrán, Los Patios, Pamplona y Villa del Rosario en Norte de Santander.

No se seleccionaron casos de estudio en las áreas de la Orinoquía, Amazonía ni Pacífico dado que en ninguna de éstas, el uso de agua representaba un porcentaje importante del total del país y la vulnerabilidad de las sub-zonas a limitaciones en oferta, incluso para año seco, no era considerable. Adicionalmente, es necesario mencionar que, dada la extensión de la investigación realizada, fue necesario reducir el número de casos de estudio de cuatro (planteados en etapas iniciales) a dos: cuencas ríos Sumapaz y Lebrija.

5.7.2. Cuenca río Sumapaz

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

Como se definió anteriormente, la cuenca del Sumapaz se encuentra dentro de la zona hidrológica del Alto Magdalena y junto con la cuenca del Río Bogotá, contiene el 42% de las cabeceras municipales de la misma, haciéndola una de las más vulnerables a afectaciones en la calidad del agua del país (IDEAM, 2010).

Las temperaturas registradas en la cuenca varían entre 8.6°C (mínima) y 37°C (máxima) siendo la temperatura media de aproximadamente 21.5°C. El régimen de precipitación es bimodal con precipitaciones anuales cercanas a los 1,463 milímetros. Las formaciones vegetales identificadas en el área de la cuenca, de acuerdo con Holdridge, incluyen: Bosque muy húmedo montano, bosque húmedo montano bajo, bosque húmedo muy montano, bosque seco montano bajo, bosque húmedo pre-montano, bosque seco pre-montano y bosque seco tropical (CAR, 2012).

5.7.3. Cuenca río Lebrija

El río Lebrija nace a 3,050msnm en la Mesa de Juan Rodríguez y en su parte inicial es conocido como río de Oro. Como primeros afluentes, el río recibe a los ríos Hato y Frío. A partir de la confluencia con el río Suratá, en los límites del municipio del mismo nombre, el río pasa a tomar el nombre Lebrija. La desembocadura del cauce se da en el río Magdalena, a la altura del municipio de Sabana de Torres (70msnm) (Bohórquez & Palacio, 2008).

La cuenca está conformada por ocho subcuencas: Cachira del Espíritu Santo, Lebrija Medio, Cachira del Sur, Salamaga, Río Negro, Suratá, Río de Oro y Lebrija alto. Las subcuencas cuentan con 25 microcuencas entre las que están Suratá Bajo, Tona, Charta, Suratá Alto, Vetas, Oro Bajo, Frío, Oro Medio, Lato, Oro Alto, Negro Bajo, Santa Cruz, Samacá, La Honda, Angula, Lajas, El Aburrido, Salamaga, Silgara, Cachira, Cahirí Bajo, Playonero y Cachirí Alto (CDMB, 2005). El área de la cuenca es de aproximadamente, 718,417 hectáreas de las cuales 384,428 corresponden al departamento de Santander y las restantes a los de Norte de Santander y César.

De acuerdo con los registros de estaciones climatológicas de la zona, la precipitación media anual en la cuenca varía entre 660 y 2,065 milímetros presentando un régimen bimodal con períodos húmedos en marzo-mayo y septiembre-noviembre y secos en diciembre-febrero y junio-agosto. Respecto a la temperatura, se tienen valores máximos entre marzo y mayo (35°C) y mínimos en noviembre (cerca de 0°C). Finalmente, los tipos de formaciones vegetales en el territorio de la cuenca, de acuerdo con Cuatrecasas, incluyen bosque inferior o basal tropical, bosque sub-andino, bosque andino, bosque alto-andino, sub-páramo y páramo (CDMB, 2004).

5.7.6. Información disponible

La información disponible para el desarrollo de los diferentes procedimientos, en todos los casos de estudio, incluyó:

- Capas de las cuencas de estudio en formato .shp (obtenidas del Sistema de Información Ambiental de Colombia del Ministerio de Ambiente) (IDEAM, 2013)
- Registros hidro-meteorológicos mensuales (todas las estaciones disponibles, incluyendo las fechas de inicio y finalización de los registros, para las dos cuencas de estudio, se presentan en los Anexos 1, y 2; igualmente, mapas de ubicación de estaciones dentro de las cuencas se presentan en los Anexos 3 a 6). Dentro de los parámetros suministrados por el IDEAM se incluyen temperatura promedio y profundidad total de precipitación, así como caudales y niveles medios, máximos y mínimos de las corrientes principales de cada cuenca.

- Estudios Generales de Suelos y zonificación de tierras, departamentos de Tolima, Cundinamarca, Norte de Santander y Santander (IGAC, 2000; IGAC, 2004; IGAC, 2004; IGAC, 2003).
- Índices mensuales de precios al consumidor para Bogotá y Bucaramanga, en el período enero 1983- julio 2016 y para Ibagué en el período diciembre 2009 – julio 2016 (DANE, s.f.)
- Superficies cosechadas, producción y rendimientos anuales históricos para Cundinamarca, Tolima, Norte de Santander y Santander, en el período 1995-2014. Los productos disponibles incluyen: Papa, maíz tradicional y tecnificado, frijol, cebada, arroz seco manual, arroz seco mecanizado, arroz riego, algodón fibra, algodón semilla, ajonjolí, plátano (únicamente disponible para el período 1995-2006), maní, sorgo, cacao, caña de azúcar, caña panela, cocotero, fique, ñame, palma de aceite, tabaco negro, yuca y café. Vale la pena mencionar que no todos los productos mencionados presentan registros para todos los departamentos analizados (dado que la producción tiende a concentrarse en ciertas zonas del país) (DNP, s.f.; Ministerio de Agricultura, s.f.).
- Mapa nacional de cobertura de la tierra, obtenido del Sistema de Información Ambiental de Colombia del Ministerio de Ambiente. (IDEAM, 2013)
- 306 rásters de índice NDVI con resolución de 0.05° (aproximadamente 8 kilómetros) en escala quincenal, en el período comprendido entre el 1 de julio de 1981 y el 31 de diciembre de 2006. Las series de índices se derivaron a partir de registros diarios de reflectancia de la superficie adquiridos por sensores AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) instalados en seis satélites de órbita polar de la NOAA: NOAA 7, 9, 11, 14, 16 y 18 (USGS, s.f.). Dicha información fue consolidada en periodos de 15 días, corregida por calibración, geometría, aerosoles volcánicos y otros efectos no relacionados con cambios en vegetación (Tucker, Pinzón, Brown, 2004; Pinzón & Brown, 2005; Tucker *et al.*, 2005)
- 338 rásters de los índices NDVI con resoluciones espacial de 250 metros y temporal de 16 días, en el período comprendido entre el 4 de julio del 2002 y el 30 de marzo del 2017, para la zona presentada en la Figura 6. Las series de índices se calculan a partir de la reflectancia superficial diaria, bidireccional, corregida por la atmósfera medida por el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite Terra. (NASA, s.f.).



Figura 6. Delimitación área de interés, índices de vegetación MODIS