Revista de Climatología

Vol. 22 (2022): 162-177 ISSN 1578-8768

©Copyright of the authors of the article. Reproduction and diffusion is allowed by any means, provided it is done without economical benefit and respecting its integrity.

Regionalización de patrones de lluvias para periodos multianuales secos y húmedos en el Altiplano Cundiboyacense de Colombia

Douglas A. Gómez-Latorre[1], Gustavo A. Araujo-Carrillo[1], Yanine Rozo Leguizamón[2]

[1] *Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Tibaitatá, Bogotá, Colombia.*
[2] *Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Palmira, Valle del Cauca, Colombia.*

Autor para correspondencia: Douglas A. Gómez-Latorre, andresgomezlatorre@gmail.com

(Recibido: 25-10-2022. Publicado: 30-12-2022.)

Resumen

La lluvia es el fenómeno meteorológico que se presenta con mayor frecuencia, por lo que es uno de los elementos climáticos que mayor variación a nivel espacial y temporal presenta. Con el objetivo de analizar la variabilidad espacial y temporal a lo largo del Altiplano Cundiboyacense, se realizó una regionalización de patrones de lluvia a través del método de Análisis de Componentes Principales (ACP), a partir de series climáticas mensuales de precipitación, provenientes de 21 estaciones meteorológicas de la red hidrometeorológica del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), para un periodo de 30 años, entre 1976 y 2005. Para la realización de este proceso se tomaron datos agregados trimestrales de lluvia en dos periodos climatológicos representativos: temporada seca, donde se presenta el volumen mínimo correspondiente a los meses de diciembre, enero y febrero, y temporada húmeda o de lluvias, donde se presente el volumen máximo, correspondiente a los meses de septiembre, octubre y noviembre. Como resultado se obtuvieron cuatro regiones homogéneas en la temporada seca y tres regiones en la temporada húmeda, lo que confirma una homogeneidad climática característica de la zona.

Palabras clave: *Análisis de Componentes Principales, precipitación, regionalización climática, Altiplano Cundiboyacense.*

Abstract

Rainfall is the meteorological phenomenon that occurs most frequently, so it is one of the climatic elelments that presents the greatest spatial and temporal variation. To analyze the spatial and temporal variability along the Cundiboyacense high plateau, a regionalization of rainfall patterns was carried out through the PCA Principal Component Analysis method, based on monthly climatic series of monthly precipitation, from 21 stations. of the hydrometeorological network of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (Ideam), for a period of 30 years, between 1976 and 2005. To carry out this process, quarterly aggregate rainfall data were taken in two representative climatological periods: dry season, where the minimum volume is presented corresponding to the months of December, January and February, and

the rainy season, where the maximum volume is presented, corresponding to the months of September, October and November. As a result, four homogeneous regions were obtained in the dry season and three regions in the rainy season, which confirms the characteristic climatic homogeneity of the area.

Keywords: *Principal Components Analysis, precipitation, climatic regionalization, Cundiboyacense high plateau.*

1. Introducción

La precipitación es la variable atmosférica de mayor variabilidad espacial y temporal, por ello tiene gran importancia dentro del sistema climático, debido que la gestión del recurso en sectores como el energético y agrícola direcciona su manejo (Strangeways, 2007). En general, el comportamiento de la precipitación a escala global es condicionado por la circulación atmosférica, la cual depende principalmente de la cantidad de radiación solar que incide sobre la tierra; en latitudes tropicales, esta radiación genera alta variabilidad espacial y temporal, sobre todo en cortas distancias de acuerdo con la topografía y otros elementos biofísicos condicionantes como la cobertura terrestre, cercanía a fuentes de humedad que alteran el intercambio energético, las cuales no siempre son fáciles de tener en cuenta (Mesa S. et al., 1997; Poveda, 2004). En tal sentido, los impactos del cambio climático han generado cambios en el comportamiento de las lluvias, en la magnitud del promedio y en la mayor frecuencia e intensidad de tales eventos (Arrieta-Pastrana et al., 2022; IPCC, 2012). En latitudes tropicales, en algunas áreas la precipitación anual sobrepasa los 3.000 mm; un promedio de 1.594 mm entre los 0 y los 20°N y de 1.766 mm entre los 0 a 20°S, siendo la zona con el mayor volumen de lluvias en promedio en el planeta (Strangeways, 2007). Así mismo, la localización geográfica de Colombia a nivel ecuatorial incide para que las lluvias, principalmente de tipo convectivo, propias de latitudes tropicales (Richman & Lamb, 1985), sean frecuentes a lo largo del año, y por efecto de la circulación atmosférica se agrupen en periodos de mayor y menor precipitación, regidos por procesos generadores como la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los anticiclones subtropicales, ondas del este, los ciclones tropicales y las características de mesoescala que modulan la climatología a escala local (Ideam, 2015). En la región Andina de Colombia, se presenta un régimen bimodal (Ideam, 2015; Mesa S. et al., 1997; Poveda, 2004), con dos temporadas secas, entre diciembre y febrero y entre junio y agosto, alternadas con dos temporadas de lluvias entre marzo y mayo, y entre septiembre y noviembre (Ideam, 2015); dichas temporadas suelen ser afectadas por efectos asociados con la variabilidad climática, lo que ocasiona una disminución/aumento de las lluvias, generado principalmente por los fenómenos asociados al ENOS (El Niño/Niña Oscilación del Sur), de manera que durante El Niño, se presentan disminuciones en los volúmenes de precipitación, caso contrario a La Niña, cuando se observan aumentos en los volúmenes de lluvia, especialmente durante el segundo semestre del año (Montealegre, 2009; Pabón & Montealegre, 2017; Poveda, 2004; Poveda et al., 2006).

Para entender los efectos de la variabilidad climática, sobre todo a nivel regional, se han realizado distintos tipos de regionalización de patrones climáticos, especialmente para las lluvias, ya que resulta conveniente dividir espacialmente en áreas cuasi-homogéneas, útiles para aplicaciones relacionadas con el manejo y gestión de los recursos hídricos (Bettolli et al., 2010). En tal sentido, diversos autores optan por emplear métodos de análisis de conglomerados como k-means, funciones empíricas ortogonales (EOF) o análisis de componentes principales (ACP), debido que en estudios climáticos permite la identificación de la variabilidad de la precipitación donde se pueden identificar comportamientos particulares en regiones relativamente homogéneas. Richman & Lamb (1985) analizaron los patrones climáticos de las lluvias de verano en la zona central de

los Estados Unidos para periodos de tres y siete días, estableciendo zonas con mayor variación espacio – temporal para estos periodos. Comrie & Glenn (1998) realizaron una regionalización mediante ACP de la precipitación en el sur - oeste de los Estados Unidos y norte de México, encontrando que los monzones húmedos se encuentran más relacionados con el abultamiento hacia el norte del anticiclón tropical alrededor de las áreas continentales, mientras que el monzón seco se relaciona más con la extensión del anticiclón subtropical adyacente a los océanos con presiones altas ligeramente superiores. Más recientemente, Ilbay-Yupa et al. (2021) realizaron una regionalización de la precipitación, de manera que a partir de un análisis de cluster de tipo k-means se dividió el país en regiones homogéneas basadas en variables de precipitación a escala mensual y anual, y su respectiva localización geográfica. En Colombia, Guzmán et al. (2014) realizó una regionalización según la estacionalidad de la precipitación media, encontrando diecisiete regiones homogéneas similares; sin embargo, no hay un avance sustancial a una mayor escala, donde se pueda comprender la variabilidad espacial y temporal de las lluvias. En tal sentido, este trabajo busca determinar los patrones de lluvias en temporada seca y húmeda o de lluvias en el Altiplano Cundiboyacense a partir de 21 series climáticas de precipitación mensual de la red hidrometeorológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), con el objetivo de contribuir en la comprensión detallada de la climatología de esta región, para que pueda ser base en la planificación de estrategias que reduzcan los impactos negativos de las alteraciones de los periodos de lluvias que frecuentemente afectan la productividad de la región.

2. Metodología

Las principales técnicas utilizadas fueron:

2.1 Área de estudio

El Altiplano Cundiboyacense está localizado sobre la cordillera oriental, región Andina de Colombia; tiene una extensión aproximada de 1.976.600 ha. de las cuales el 60 % pertenece al departamento de Cundinamarca y el 40 % restante al departamento de Boyacá (Figura 1). La región se extiende aproximadamente 320 Km de nororiente a sureste, y 50 Km de este a oeste, abarcando 136 municipios (4°02'02" y 6°05'58" Norte y los 72°41'05" y 74°32'58" Oeste). Tiene una variación altitudinal entre los 460 y 4.240 m.s.n.m, donde se destacan áreas de sabana y en menor medida de paramo. Dentro del Altiplano Cundiboyacense se encuentra ubicada la capital de Colombia (Bogotá D.C.), cuyas actividades económicas principales son la industria y los servicios; el resto de la región se dedica principalmente a actividades de tipo agropecuario, destacando cultivos de hortalizas y papa, así como una intensiva actividad ganadera.

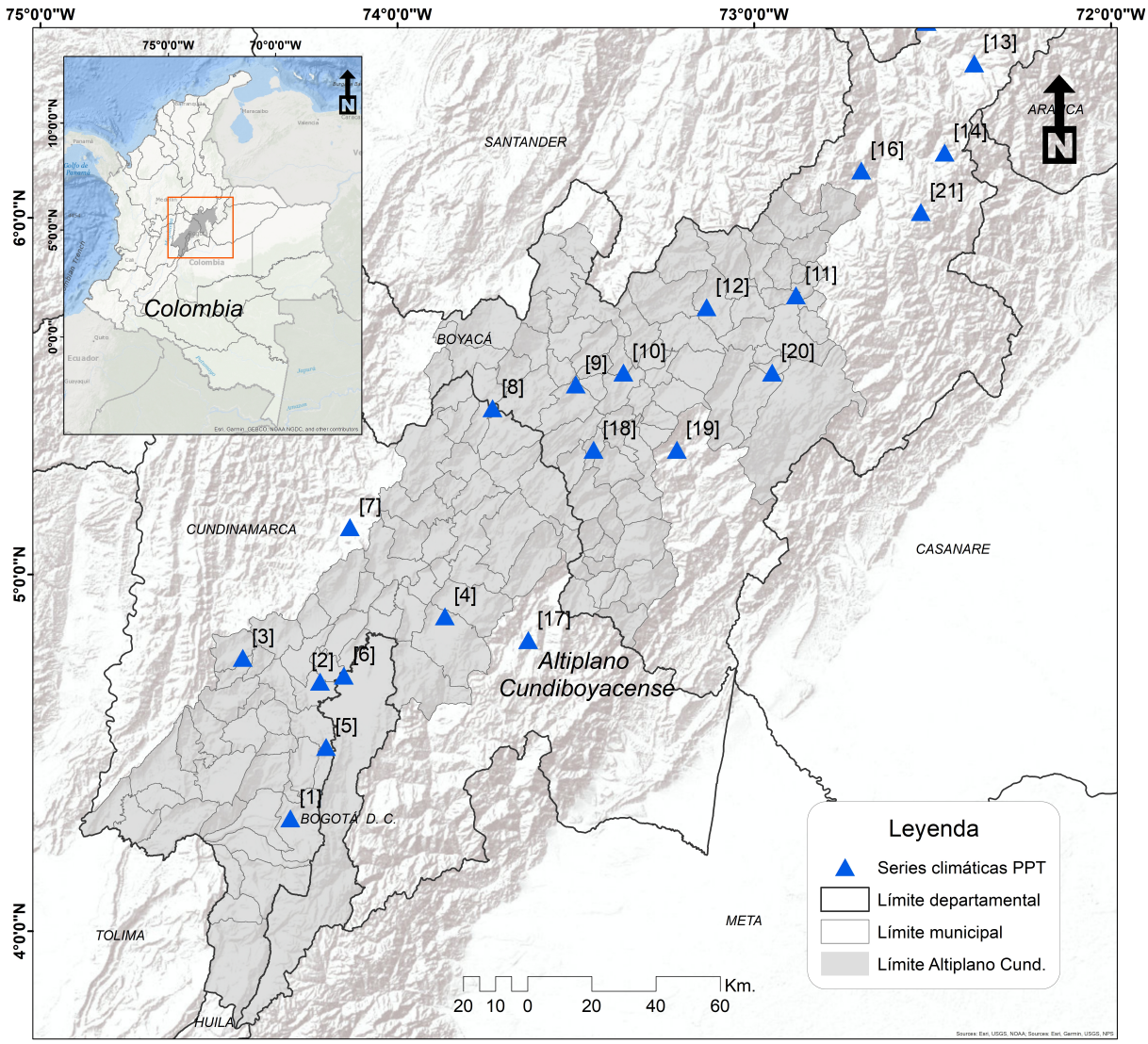

Figura 1: Región del Altiplano Cundiboyacense con localización de las estaciones meteorológicas utilizadas.

2.2 Información utilizada y control de calidad

Se utilizaron 21 series climáticas de precipitación a escala mensual para un periodo de 30 años, entre 1976 y 2005 (Tabla 1), localizadas a lo largo de los departamentos de Cundinamarca y Boyacá haciendo parte de la red hidrometeorológica del Ideam. Las series que presentaron menos del 10 % de datos faltantes, fueron sometidas a un proceso de llenado, realizado a partir del método estadístico de Razón de Valores Normales (Paulhus & Kohler, 1952), que se basa en aprovechar los datos de otras series cercanas, ubicadas en áreas con características fisiográficas y climatológicas que sean representativas del área donde se ubica la serie incompleta. Se seleccionaron dos periodos de análisis correspondientes a una temporada seca y una temporada húmeda o de lluvias. La temporada seca correspondió al trimestre cuya precipitación trimestral fuera la más baja, abarcando los meses de diciembre, enero y febrero (DEF); de la misma forma, la temporada húmeda o de lluvias comprendió los meses de septiembre, octubre y noviembre (SON), dado que la precipitación trimestral corresponde a la de mayor volumen.

[N°]	Estación	Lat.	Long.	Elev.	Mpio.	Depto.	T. Seca [mm]	T. Hum.[mm]
[1]	Pasca	4,317	-74,300	2.256	Pasca	Cund.	170,0	278,3
[2]	Tibaitatá	4,700	-74,217	2.543	Mosquera	Cund.	96,3	210,6
[3]	La Florida	4,767	-74,433	1.915	Anolaima	Cund.	252,2	422,7
[4]	Guasca	4,883	-73,867	2.750	Guasca	Cund.	123,9	215,6
[5]	Granja San Jorge	4,517	-74,200	2.900	Soacha	Cund.	99,0	233,4
[6]	Apto. El Dorado	4,717	-74,150	2.547	Bogotá	Cund.	123,8	259,9
[7]	La Cabrera	5,133	-74,133	2.000	Pacho	Cund.	358,5	510,2
[8]	Isla de Santuario	5,467	-73,733	2.580	Fúquene	Cund.	199,5	381,4
[9]	Villa Carmen	5,533	-73,500	2.600	Samacá	Boy.	116,6	239,7
[10]	UPTC	5,567	-73,367	2.690	Tunja	Boy.	74,2	211,2
[11]	Belencito	5,783	-72,883	2.530	Nobsa	Boy.	110,4	265,4
[12]	Tunguavita	5,750	-73,133	2.470	Paipa	Boy.	120,5	331,6
[13]	Sierra Cocuy	6,433	-72,383	3.716	Guicán	Boy.	113,3	325,2
[14]	Chita	6,183	-72,467	2.888	Chita	Boy.	75,7	303,2
[15]	Chiscas	6,550	-72,517	2.350	Chiscas	Boy.	150,6	450,6
[16]	Sativanorte	6,133	-72,700	2.594	Sativanorte	Boy.	164,1	397,2
[17]	Gachetá	4,817	-73,633	1.752	Gachetá	Cund.	116,8	302,4
[18]	Nuevo Colón	5,350	-73,450	2.438	Nuevo Colón	Boy.	76,3	240,3
[19]	Rondón	5,350	-73,217	2.120	Rondón	Boy.	171,7	531,8
[20]	El Tunel	5,567	-72,950	3.000	Cuítiva	Boy.	72,7	235,4
[21]	El Cardón	6,017	-72,533	3.590	Socotá	Boy.	157,5	578,8

Tabla 1: Localización de estaciones meteorológicas y promedio anual (1986 - 2005) para la temporada seca y la temporada húmeda o de lluvias.

2.3 Prueba de normalidad

Una de las características que pueden presentar las series climáticas de precipitación cuando se realiza un Análisis Exploratorio de Datos (AED) es el sesgo positivo, lo que indica la falta normalidad en la distribución de los datos. Cuando estos son agregados, tal como se encuentran dispuestas las series de precipitación para la temporada seca y para la temporada húmeda o de lluvias, el sesgo positivo no es tan evidente, por ello se optó por aplicar una prueba de normalidad para cada una de las series climáticas, recordando que cada una de estas es considerada como una variable.

2.4 Análisis de componentes principales (ACP)

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es uno de los métodos de análisis estadístico multivariado más utilizado en ciencias atmosféricas, el cual fue introducido de forma teórica por Obukhov (1947), para que posteriormente Lorenz (1956) y Davis (1976) hicieran las primeras aplicaciones prácticas. En tal sentido, se denominó esto como análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (EOF, por su acrónimo ingles), siendo este análogo al ACP (Wilks, 2011). El ACP es una técnica estadística que transforma un conjunto de datos multivariados, que están correlacionados, en un conjunto nuevo de datos no correlacionados mediante la combinación lineal de las variables originales, ello genera un conjunto nuevo de datos que no son correlacionados. Para obtener los componentes principales, primero se debe construir la matriz de covarianza, luego los vectores y valores propios, y finalmente los componentes principales (Wilks, 2011). Por lo general los primeros tres componentes contienen entre el 98 % y el 99 % de la varianza y son suficientes para representar la información contenida en el conjunto de datos (Pohl & van Genderen, 2016). Una de las condiciones que se requiere para realizar el análisis, es que las variables originales deben tener un grado de correlación por lo general, no es necesario el supuesto de normalidad para los datos, aunque si este ocurre, la interpretación de los resultados podría lograr mayor profundidad. Para la realización del ACP se empleó el paquete "FactomineR"de R-Stat V3.8.

2.5 Criterio de corte en el ACP

Existen una multiplicidad de criterios para establecer el número de componentes principales óptimos; para este trabajo solo se tomaron en cuenta los siguientes tres criterios: el primero, que es el mas común de todos, consiste en la revisión del porcentaje acumulado de varianza por los componentes principales, el cual al llegar al 70 %, se considera representativo para la selección del número de componentes. El segundo, denominado Scree Test (Cattell, 2010), se basa en graficar la varianza explicada por cada componente principal en función del orden en que fueron extraídas; una vez realizada la gráfica se procede a identificar el quiebre, señalando así el número componentes (Bettolli et al., 2010); el tercer criterio se conoce como regla de Kaiser (Kaiser, 1958), el cual se basa en tomar los componentes principales con eigenvalores mayores a 1.

2.6 Regionalización

La regionalización permite establecer el número de regiones climáticamente homogéneas que componen el área de estudio. En este trabajo se optó por el método propuesto por Richman & Lamb (1985) y mencionado por Comrie & Glenn (1998), Bettolli et al. (2010), Rodriguez-Puebla et al., (1998), que usa las correlaciones entre cada uno de los componentes principales generados y las variables (series climáticas de precipitación), estableciendo una correlación de r=—0,4— como límite para la delimitación de una regió; en otras palabras, una correlación r por encima de 0,4 permite considerar una región homogénea. La delimitación espacial de las correlaciones entre las variables y los componentes principales se realizaron a través de Inverse Distance Weighted (IDW) (Shepard, 1968); Finalmente, la delimitación de cada una de las regiones climáticamente homogéneas por temporada (temporada seca y temporada húmeda o de lluvias), se realizó a través de la superposición de las áreas con correlación r por encima de 0,4 coincidentes entre los componentes seleccionados.

3. Resultados

3.1 Análisis climatológico

De acuerdo con Ideam (2015), el régimen anual de precipitación del Altiplano Cundiboyacense es de tipo bimodal, alternando dos temporadas secas (diciembre a febrero y junio a agosto), y dos temporadas de lluvias (marzo a mayo y septiembre a noviembre), con promedios anuales que pueden alcanzar los 2.000 mm hacia el noroccidente de la zona. Por otro lado, la marcada influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) genera la condición de bimodalidad en esta zona, por ello entre diciembre y febrero el cinturón nuboso que lo caracteriza se encuentra en el sur del país, provocando que las pocas lluvias que se presentan en el área de estudio obedezcan a sistemas convectivos de origen local; de la misma forma, la ZCIT entre septiembre y noviembre se encuentra ubicada sobre esta zona, aportando la mayor cantidad de humedad que se traduce en alto volumen de lluvias (Mesa S. et al., 1997; Poveda, 2004), esto explica el comportamiento observado en la figura 2, cuyos valores de precipitación pueden llegar a 350 mm en la temporada seca y 500 mm en la temporada húmeda o de lluvias, los cuales en ambos casos se presentan hacia el occidente del Altiplano Cundiboyacense.

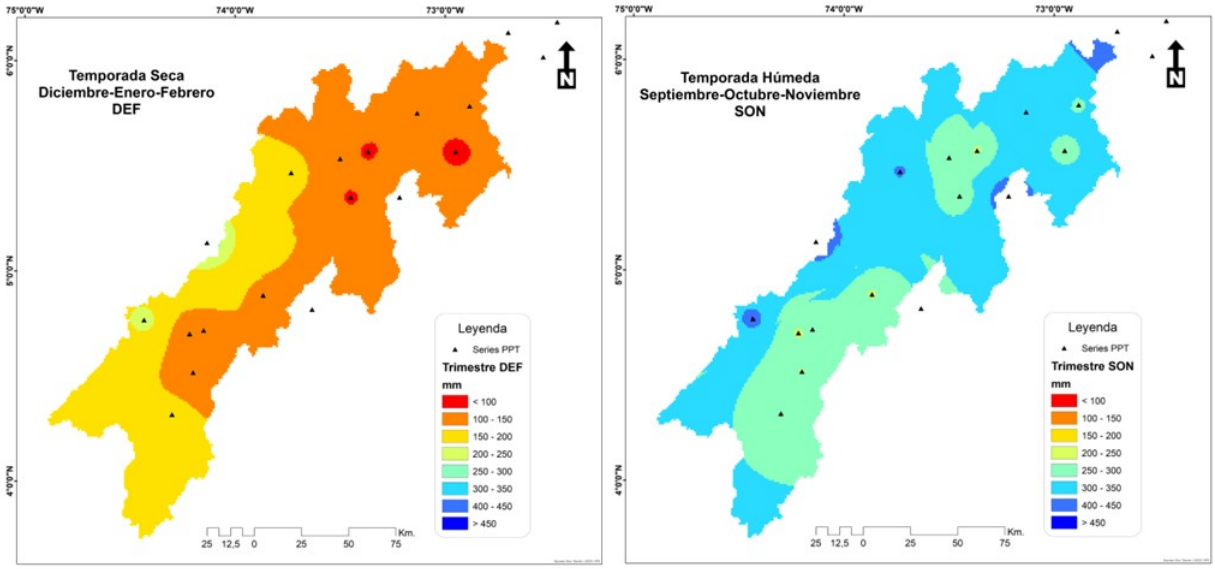

Figura 2: Distribución de la precipitación para temporada seca (Izquierda) y temporada húmeda o de lluvias (Derecha) en el Altiplano Cundiboyacense, Periodo 1986-2005.

3.2 Análisis de Componentes Principales (ACP)

3.2.1 Prueba de normalidad

Como resultado se observó que todas las series climáticas de precipitación no se encuentran distribuidas de forma normal (Test de Kolgomorov-Smirnov a un 95 % de confianza), por lo que fue necesario hacer una transformación de tipo logarítmico (ln) para el análisis de correlación y el ACP.

3.2.2 Análisis de correlación

Las matrices de correlación para la temporada seca (Figura 3) y temporada húmeda o de lluvias (Figura 4) mostraron correlaciones significativas (*** 0,01; ** 0,05; * 0,1), en gran parte de los pares de series climáticas. Sin embargo, cabe destacar que los mayores índices de correlación, por encima de 0,7, se observaron para la temporada seca en: [2] Tibaitatá - [6] Aeropuerto El Dorado (0,72), [2] Tibaitatá - [5] Granja San Jorge (0,77), [5] Granja San Jorge - [14] Chita (0,71), [11] Belencito - [20] El Túnel (0,81), [9] Villa Carmen - [10] UPTC (0,71), [9] Villa Carmen - [12] Tunguavita (0,71) y [11] Belencito - [15] Chiscas (0,74). De la misma forma para la temporada húmeda o de lluvias los mayores índice de correlación fueron: [4] Guasca- [14] Chita (0,81), [5] Granja San Jorge - [10] UPTC (0,75), [9] Villa Carmen - [10] UPTC (0,74), [10] Villa Carmen - [12] Tunguavita (0,70), [10] Villa Carmen - [16] Sativanorte (0,71), [10] Villa Carmen - [18] Nuevo Colón (0,78), [10] Villa Carmen - [20] El Túnel (0,71), [11] Belencito - [12] Tunguavita (0,71), [11] Belencito - [14] Chita (0,71), [11] Belencito - [12] Tunguavita (0,71) y [14] Chita - [20] El Túnel (0,78). Las altas correlaciones, así como la significancia estadística de estas, es explicado por la cercanía entre estas y similitudes en el volumen de lluvias de la región en cada una de las temporadas.

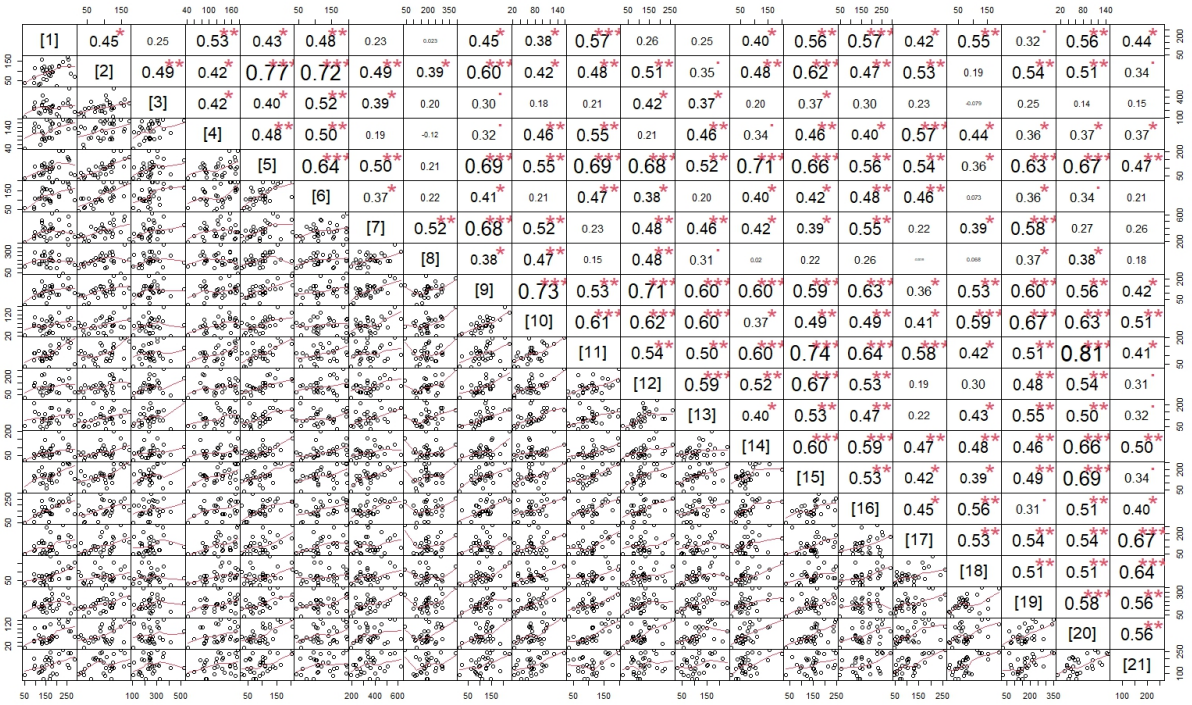

Figura 3: Matriz de correlación para las series climáticas en la temporada seca.

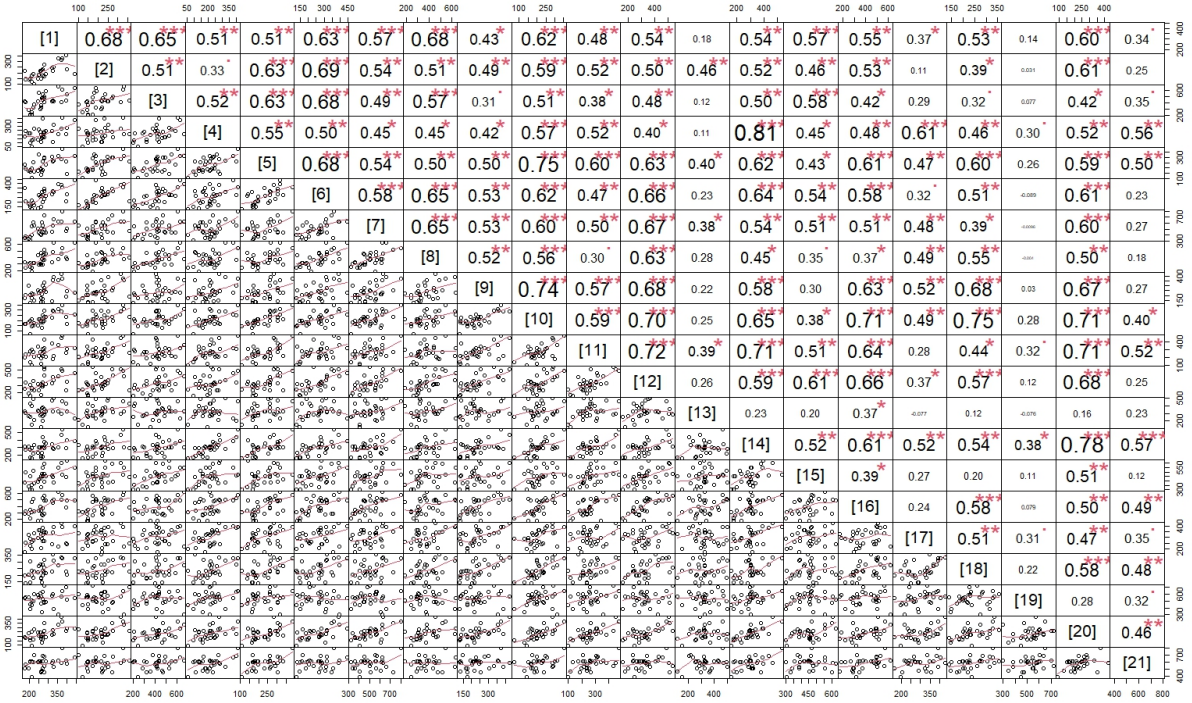

Figura 4: Matriz de correlación para las series climáticas en la temporada húmeda o de lluvias.

3.2.3 Selección del número de componentes

Los resultados del ACP, calculado para 21 componentes en igual de número series climáticas, se

puede observar en la tabla 2. Para la temporada seca, según el porcentaje de la varianza acumulada, son necesarios al menos cuatro componentes para acumular más del 70 % de la varianza. De forma detallada, el porcentaje acumulado por el primer componente fue del 48,1 %, para el segundo fue de 9,7 %, el tercero fue de 8,5 % y el cuarto de 5,3 % para un total de 71,6 %; por otro lado, la regla de Kaiser confirmó la misma cantidad de componentes, con un eigenvalor mayor a la unidad (1,1) en el cuarto componente. En la temporada húmeda o de lluvias, tal como la temporada seca, se necesitaron al menos cuatro componentes para acumular más del 70 % de la varianza; el primer componente acumuló el 50,4 %, mientras el segundo, tercero y cuarto, tan solo el 8,9 %, 6,5 % y 5,9 % respectivamente, para un total de 71,9 %, confirmando el resultado de la regla de Kaiser, cuyo eigenvalor mayor a la unidad (1,2) está en el componente 4.

Cálculo de los Componentes Principales			
Temporada seca	Eigenvalor	% de varianza	% acumulado de varianza
Comp. 1	10,1	48,1	48,1
Comp. 2	2,0	9,7	57,8
Comp. 3	1,7	8,5	66,3
Componente 4	**1,1**	5,3	**71,6**
Comp. 5	0,9	4,7	76,4
...			
Comp. 21	0,01	0,07	100
Temporada húmeda	Eigenvalor	% de varianza	% acumulado de varianza
Comp. 1	10,5	50,4	50,4
Comp. 2	1,8	8,9	59,4
Comp. 3	1,3	6,5	65,9
Componente 4	**1,2**	5,9	**71,9**
Comp. 5	0,9	4,5	76,4
...			
Comp. 21	0,02	0,1	100

Tabla 2: Cálculo de los componentes principales para la temporada seca (arriba) y temporada húmeda o de lluvias (abajo).

Para contrastar lo obtenido por los dos criterios anteriores, se generó la gráfica del Scree Test (Figura 5), mostrando un quiebre pronunciado en el componente 2 para ambas temporadas. Sin embargo, la gráfica de la temporada seca mostró un quiebre pronunciado adicional (no tan fuerte como el anterior) en el componente 3, lo que sugiere considerar otro componente más, no tomando 2 sino 3. Finalmente se optó por tomar como máximo no más de 4 componentes, como lo estableció la regla de Kaiser y el porcentaje acumulado de varianza, así como un mínimo de 3 regiones para la temporada seca y 2 regiones para la temporada húmeda o de lluvias de acuerdo con lo indicado por el Scree Test.

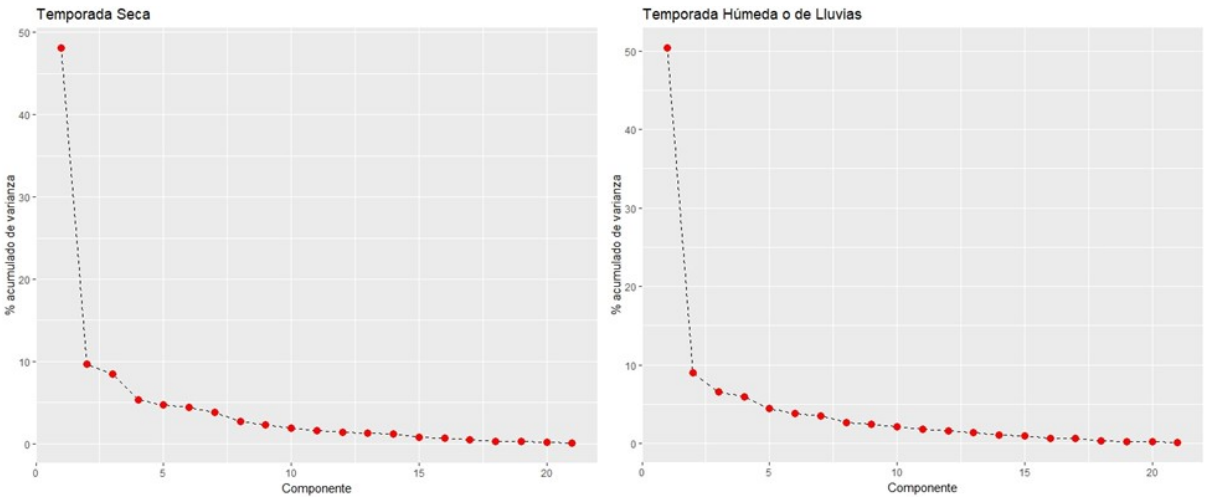

Figura 5: Scree Test para la temporada seca y temporada húmeda o de lluvias.

3.3 Regiones

3.3.1 Interpolación de los componentes

En las figuras 6 y 7 se observa el resultado de la distribución espacial de los valores de correlación entre las series climáticas y los cuatro componentes indicados por el porcentaje acumulado de varianza y la regla de Kaiser para la temporada seca y la temporada húmeda o de lluvias respectivamente. En la temporada seca (Figura 6) se obtuvo como resultado una alta correlación entre las series climáticas y el componente 1 en gran parte del Altiplano Cundiboyacense, esto indica que la variabilidad de las lluvias está representada en su mayoría en este componente. Así mismo, los componentes 2, 3 y 4 agruparon variabilidad representada al occidente, suroccidente y sur del área de estudio. Al igual que en la temporada seca, en la temporada húmeda o de lluvias, gran parte de la variabilidad está representada por el componente 1; sin embargo, los componentes 2, 3 y 4 agruparon la variabilidad de las lluvias hacia el norte y nororiente del Altiplano Cundiboyacense. Tal como se mencionó en la metodología, la delimitación de las regiones homogéneas tomó como criterio el límite de r=—0,4— (Richman & Lamb, 1985), sin embargo Comrie & Glenn (1998) expresan que este valor a pesar de que es conveniente para el establecimiento de los límites no deja de ser un valor netamente arbitrario, por lo que en algunos casos se pueden tomar las isolíneas de r=—0,3— ó r=—0,5—. Como se mencionó en el apartado de metodología, se contempló como límite para la delimitación de las regiones las isolíneas derivadas del proceso de interpolación espacial a través del método de IDW, el cual sólo tiene en cuenta distancias ponderadas, descartando topografía y otros factores que pueden influir en el trazado.

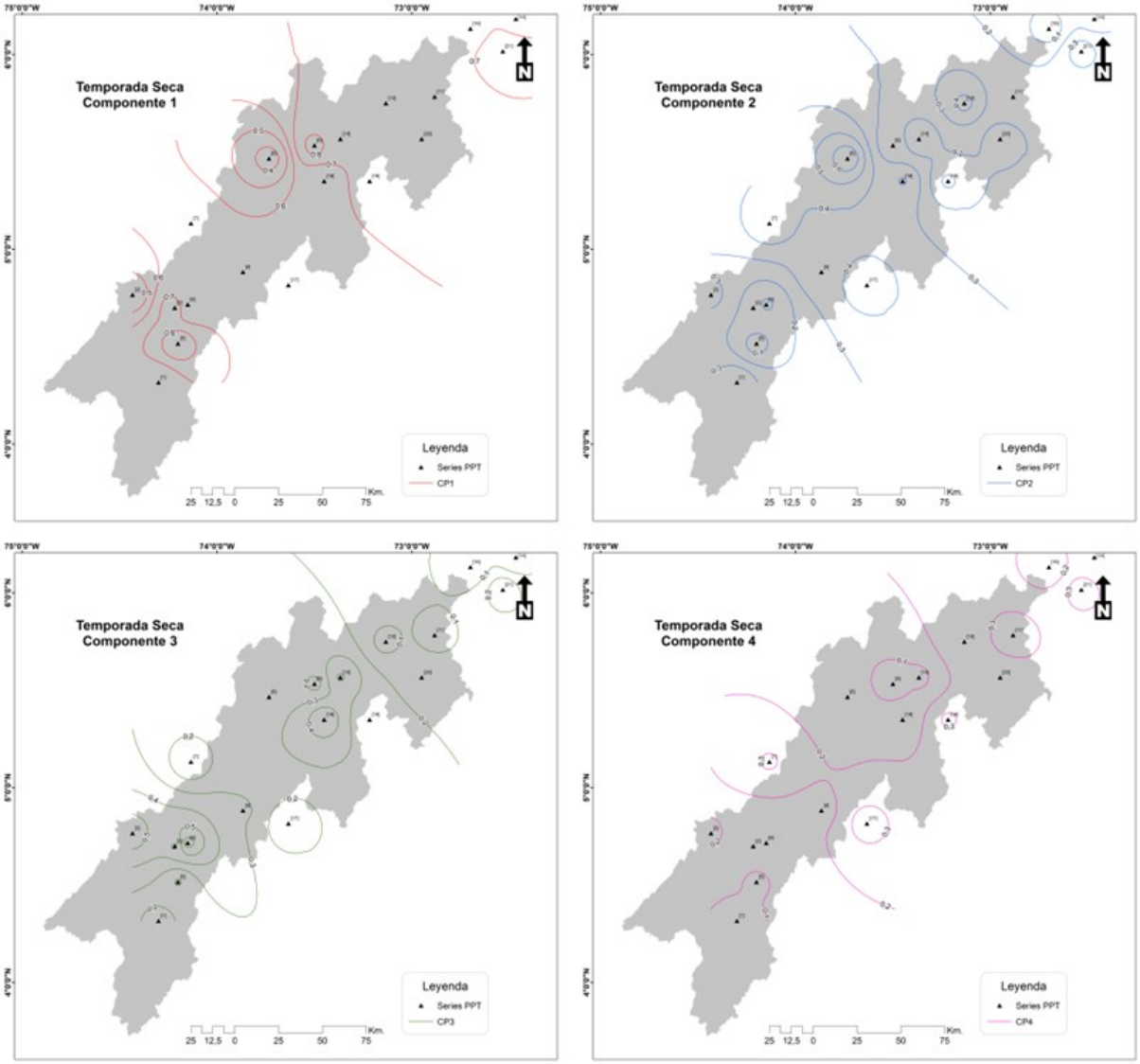

Figura 6: Distribución espacial de los valores de correlación entre las series climáticas y cuatro componentes para la temporada seca.

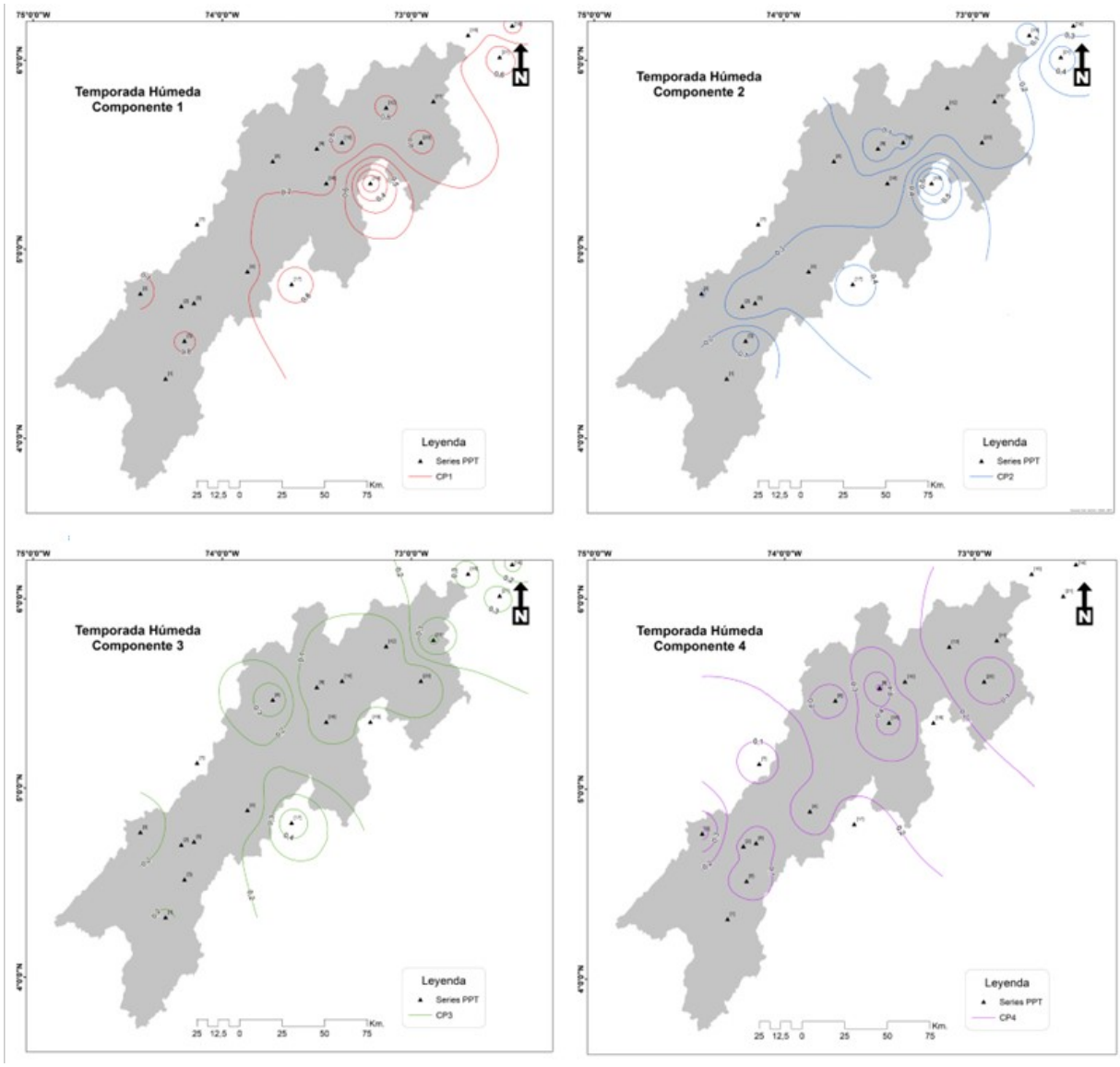

Figura 7: Distribución espacial de los valores de correlación entre las series climáticas y cuatro componentes para la temporada húmeda o de luvias.

3.3.2 Regionalización

Los resultados de la regionalización de los patrones de lluvia para el Altiplano Cundiboyacense en la temporada seca y la temporada húmeda o de lluvias se pueden observar en la figura 8. En la temporada seca, tal como lo indicaron los criterios de porcentaje acumulado de varianza y regla de Kaiser, se obtuvieron cuatro (4) regiones homogéneas, a pesar de lo que indicó el Scree Test con un mínimo de tres (3) regiones. En síntesis la regionalización para la temporada se definió de la siguiente manera: la región 1 abarca el centro y norte del Altiplano Cundiboyacense, ésta región abarca la sabana centro y norte de Bogotá y el valle del río Sugamuxi, con un promedio de 133,6 mm de volumen de lluvia trimestral; la región 2, abarca una porción reducida en el centro occidente del Altiplano, en el límite entre los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, en inmediaciones del valle de Ubaté y Chiquinquirá, con un promedio de 199,2 mm de lluvia trimestral; la región 3 agrupó la mayor extensión de la sabana occidente de Bogotá, en el departamento de Cundinamarca, con un promedio de lluvias trimestral de 157,4 mm; finalmente, la región 4 delimita el sur del Altiplano Cundiboyacense, con 134,5 mm de lluvias en el trimestre.

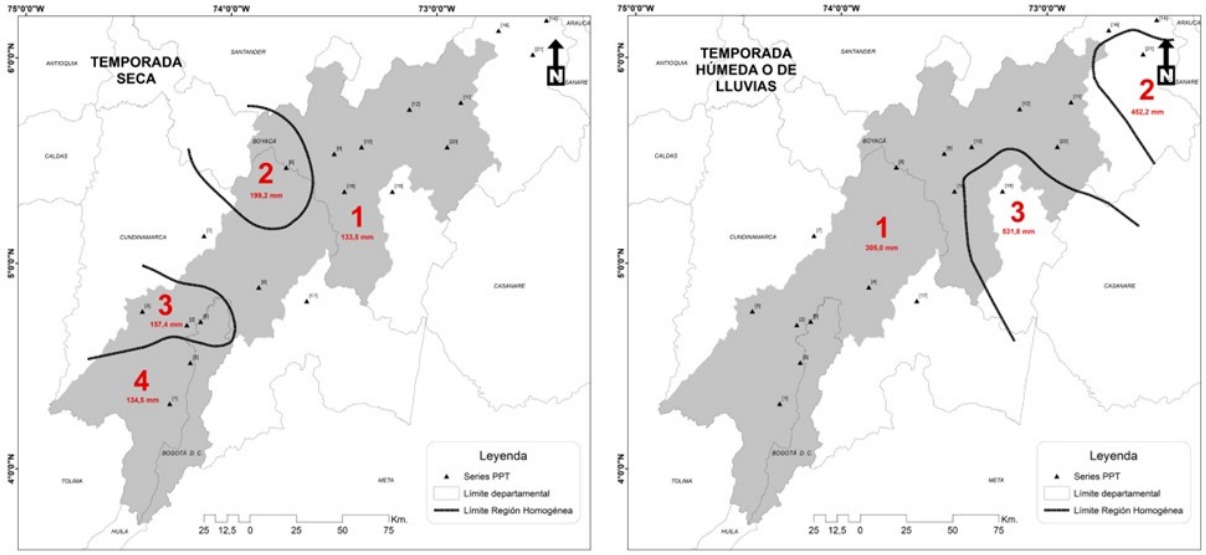

Figura 8: Regionalización de patrones de lluvia a partir del ACP para la temporada seca y temporada húmeda o de lluvias en el Altiplano Cundiboyacense.

Al contrario de la temporada seca, en la temporada húmeda o de lluvias se obtuvieron tres (3) regiones homogéneas, una menos que las indicadas por el porcentaje acumulado de varianza y regla de Kaiser y una más que lo indicado por el Scree Test; sin embargo, tal como lo sugiere Bettolli et al. (2010), los resultados de los criterios, sobre todo del Scree Test, deben ser tomados como un número base componentes, siendo necesario un examen más a fondo de los valores de correlación entre las series climáticas y los componentes. En tal sentido, la regionalización de la temporada húmeda o de lluvias fue delimitada de la siguiente manera: la región 1 abarca casi el área total del Altiplano Cundiboyacense, con un promedio trimestral de 305,0 mm; en el extremo norte, la región 2 abarca el límite del Altiplano Cundiboyacense con la región del departamento de Santander, con un promedio de 452,0 mm trimestrales; finalmente, la región 3 delimita una porción del margen nororiental del Altiplano Cundiboyacense, en límites con el piedemonte llanero, lo que arroja que está región sea la de mayor volumen trimestral de lluvias, con 531,8 mm. Los resultados obtenidos señalan grandes diferencias en el comportamiento de los patrones de lluvia entre cada una de las temporadas, reflejando amplias diferencias en sus límites. Sin embargo, cada regionalización en cada una de las temporadas representa en gran medida la distribución espacial del promedio climatológico; hay que destacar que la región Andina, donde se encuentra localizado el Altiplano Cundiboyacense, es una "isla seca en un mar de lluvia", ya que según sea la temporada, en los límites de la región se puede duplicar o triplicar el volumen de lluvias (Mesa S. et al., 1997). En la temporada seca, la región 1 indica una zona de sabana en pleno centro del altiplano donde el volumen de lluvias es menor que en las demás regiones (regiones 2 y 3) las cuales se encuentran influenciadas por el ascenso de humedad proveniente del valle del río Magdalena sobre la vertiente occidental (límites del Altiplano) (Mesa S. et al., 1997), mientras la región 4 está influenciada por el paramo de Sumapaz, con altitudes mayores a 3.000 m.s.n.m. lo que hace que el volumen de lluvias sea similar al de la región 1. Los procesos atmosféricos que generan las lluvias en esta temporada están muy ligados al efecto Föhn y a los procesos orográficos y convectivos locales (Guzmán et al., 2014), debido principalmente a que la ZCIT se encuentra en la posición mas al sur de Colombia. Por otro lado, en la temporada húmeda o de lluvias, el incremento en el volumen de lluvias es notorio con respecto a la temporada seca; en general, el aumento trimestral del promedio de lluvias es mayor a 200 mm a lo largo de la región 1, esto se debe sobre todo a que la abundante nubosidad que caracteriza a la ZCIT

se encuentra a lo largo del Altiplano Cundiboyacense, provocando un aumento en su volumen. Sin embargo, tanto en la región 2 como en la región 3 localizadas en el costado nororiental, el volumen de lluvias es mayor entre un 50 % y un 80 % más que en la región 1, ya que estas regiones tienen una fuerte influencia del régimen de lluvias del piedemonte llanero, coincidiendo con la época de mayor volumen de esta zona; así mismo, la advección de humedad procedente del oriente es fortalecido en la vertiente de la cordillera oriental donde los procesos atmosféricos locales generan lluvias de tipo orográfico (Guzmán et al., 2014; Ideam, 2015).

4. Conclusiones

Este trabajó determinó la regionalización de patrones de lluvias, periodo 1986 – 2005, en el Altiplano Cundiboyacense, basado en la amplia diferencia que existe en el régimen de precipitación, entendiendo que la delimitación de las regiones varía de acuerdo con la estacionalidad, por ello se planteó aplicar esta metodología en dos temporadas: seca, que se extiende entre diciembre y febrero, y una húmeda o de lluvias, que se extiende entre septiembre y noviembre. La aplicación del proceso metodológico arrojó cuatro (4) regiones para la temporada seca y tres (3) regiones para la temporada húmeda o de lluvias. El volumen de lluvias para la temporada seca no sobrepasó los 200 mm trimestrales (entre 133,5 mm para la región 1 y 199,2 mm para la región 2), mientras para la temporada húmeda o de lluvias estuvo por encima de 500 mm trimestrales (305,0 mm para la región 1 y 531,8 mm para la región 3). A pesar de que no se generaron un mayor número de regiones, sobre todo por la carencia de un mayor número de series climáticas (observaciones), es necesario aplicar este tipo de metodologías objetivas ya que permiten identificar zonas de mayor variabilidad, no sólo de precipitación si no de otras variables con alta variabilidad como lo es la radiación solar. Aunque la aplicación del proceso de ACP y otros métodos multivariados no ha sido a nivel local, vale destacar que las regiones generadas guardan una consistencia lógica sobre la realidad de la zona, en tal sentido es recomendable realizar otros ejercicios en periodos diferentes, sobre todo en temporadas de transición (seca-humeda-seca), donde hay mayor incertidumbre acerca del comportamiento de las lluvias.

5. Agradecimientos

A la Corporación colombiana de investigación agropecuaria – AGROSAVIA y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación – Minciencias, por la cofinanciación del proyecto 502-2010: "Zonificación agroclimática del sistema de ganadería del valle de Ubaté y Chiquinquirá y la región del Alto Chicamocha" ejecutado entre 2013 y 2016, con los cuales se obtuvieron los resultados presentados en este trabajo.

Referencias bibliográficas

Arrieta-Pastrana A, Saba M, & Alcázar AP (2022): Analysis of Climate Variability in a Time Series of Precipitation and Temperature Data: A Case Study in Cartagena de Indias, Colombia. *Water 2022*, 14(9):1378 https://doi.org/10.3390/W14091378

Bettolli ML, Rivera JA, Penalba OC (2010): Regionalización de los días secos en Argentina. Un enfoque metodológico. *Meteorologica*, 35(2):67-80, Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-468X2010000200003

Cattell RB (2010): The Scree Test For The Number Of Factors. 1(2), 245-276. https://doi.org/10.1207/S15327906MBR0102_10

Comrie AC, Glenn EC (1998): Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research*, 10(3):201-2015. https://www.jstor.org/stable/24865968

Guzmán D, Ruíz JF, Cadena M (2014): Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través Análisis de Componentes Principales (ACP). http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Regionalizaci %25C3 %25B3n %2Bde %2Bla %2Blluvia %2Ben %2BColombia.pdf/92287f96-840f-4408-8e76-98b668b83664

Ideam (2015): Atlas Climatológico de Colombia - Interactivo - año 2015. http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html

Ilbay-Yupa M, Lavado-Casimiro W, Rau P, Zubieta R, Castillón F (2021): Updating regionalization of precipitation in Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 143(3-4):1513-1528. Disponible en: https://doi.org/10.1007/S00704-020-03476-X/FIGURES/9

IPCC (2012): Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático Publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Edición a cargo de Resumen par (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ed.). IPCC. https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_ES_web.pdf

Kaiser HF (1958): The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. Psychometrika 1958 23:3, 23(3), 187-200. https://doi.org/10.1007/BF02289233

Mesa S, Poveda JG, Carvajal SLF (1997): Introducción al clima de Colombia (1.a ed.). Imprenta Universidad Nacional de Colombia.

Montealegre JE (2009): Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Estudio+de+la+variabilidad+climática+de+la.pdf/643c4c0e-83d7-414f-b2b4-6953f64078d3

Pabón JD, Montealegre JE (2017): Los Fenómenos de El Niño y de La Niña su efecto climático e impactos socieconómicos. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Paulhus JLH, Kohler MA (1952): Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Review*, 80(8):129-133. Disponible en: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080¡0129:IOMPR¿2.0.CO;2

Pohl C, van Genderen J (2016): Remote Sensing Image Fusion: A Practical Guide. En Remote

Sensing Image Fusion (1.a ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315370101

Poveda G (2004): La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28(107):201-222. Disponible en: http://www.accefyn.com/revista/Vol_28/107/201-222.pdf

Poveda G, Waylen PR, Pulwarty RS (2006): Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1):3-27. Disponible en: https://doi.org/10.1016/J.PALAEO.2005.10.031

Richman MB, Lamb PJ (1985): Climatic Pattern Analysis of Three- and Seven-Day Summer Rainfall in the Central United States: Some Methodological Considerations and a Regionalization. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 24(12):1325-1343. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1985)024

Rodriguez-Puebla C, Encinas AH, Nieto S, Garmendia J (1998): Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 18(3):299-316. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19980315)18:3¡299::AID-JOC247¿3.0.CO;2-L

Shepard D (1968): A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference On -, 517-524. https://doi.org/10.1145/800186.810616

Strangeways I (2007): Precipitation. Theory , Measurement and Distribution. En Distribution. Cambridge University Press.

Wilks DS (2011): Principal Component (EOF) Analysis. *International Geophysics*, 100:519-562. Disponible en: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385022-5.00012-9