

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN METEOROLOGÍA APLICADA**



**“DETERMINACIÓN DE PATRONES DE VIENTOS HORIZONTALES EN
LA TROPÓSFERA Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN EN EL
ALTIPLANO PERUANO BOLIVIANO”**

Presentada por:

MELISSA DE JESÚS MEDINA BURGA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN METEOROLOGÍA APLICADA**

Lima - Perú

2020

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO**

MAESTRÍA EN METEOROLOGÍA APLICADA

**“DETERMINACIÓN DE PATRONES DE VIENTOS HORIZONTALES EN
LA TROPÓSFERA Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN EN EL
ALTIPLANO PERUANO BOLIVIANO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

MELISSA DE JESÚS MEDINA BURGA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

M. Eng. Esaúl Obregón Párraga
PRESIDENTE

Mg. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño
ASESOR

Dr. Jhan Carlo Espinoza Villar
CO-ASESOR

Mg.Sc. Jerónimo García Villanueva
MIEMBRO

Mg. Alessandri Canchoa Quispe
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mi familia,
por su apoyo incondicional en todo este proceso, por la motivación ante los momentos difíciles y a mi compañero de vida que ha estado a mi lado a pesar de las dificultades y la distancia.

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios por todas las bendiciones dadas hasta este momento, gracias a ello he tenido muchas oportunidades.

Al Dr. Jhan Carlo Espinoza investigador superior del Instituto Geofísico del Perú (IGP), por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo de tesis gracias al financiamiento del Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (PNICP) en el marco del proyecto N° 397- PNICP-PIAP-2014 desarrollado en el IGP y el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia. Gracias por todas las lecciones, enseñanzas y consejos dados.

Al Dr. Jean Emmanuel Sicart, y el proyecto en el glaciar de El Zongo, por su apoyo y la oportunidad de trabajar en el marco internacional franco peruano mediante el IRD realizado del 2014 al 2015. Esta oportunidad motivó mi interés en el estudio del clima en la zona del altiplano.

Asimismo, agradezco al Mg. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño por su orientación y apoyo en los estudios de maestría en la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Finalmente quiero agradecer a todos mis amigos y compañeros de SCAH-IGP por sus consejos, observaciones y todos los momentos compartidos desde el 2009 que empezó este camino en la ciencia. A la Ph.D. Dra. Yamina Silva Vidal a quien expreso un especial agradecimiento por su guía en diferentes aspectos de mi vida profesional y personal a lo largo de estos años, así como al Dr. Víctor Chávez por sus contribuciones con este trabajo siendo un amigo y profesional muy querido.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Circulación intraestacional en américa del sur.....	4
2.2. Circulación atmosférica y elementos relacionados.....	4
2.3. Patrones de circulación.....	7
III. METODOLOGÍA.....	10
3.1. Descripción del área de estudio.....	10
3.1.1. Datos históricos.....	10
3.1.2. Softwares utilizados.....	12
3.1.3. Eventos climáticos estacionales en el Altiplano peruano boliviano.....	12
3.2. Métodos.....	15
3.2.1. Determinación de patrones de vientos horizontales en la troposfera en el Altiplano peruano boliviano.	15
a. Cartas o mapas auto organizados (som)–redes neuronales.....	15
b. Clasificación ascendente jerárquica.....	18
3.2.2. Identificación de patrones de circulación atmosférica asociados a la variabilidad intraestacional utilizando técnicas de agrupación estadística.....	22
3.2.3. Identificación la persistencia (duración de cada patrón) y transición (probabilidad de ocurrencia) de cada uno de los patrones.....	23
3.2.4. Determinación la influencia de los patrones de circulación en la precipitación.....	24
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1. Determinación de los patrones de vientos horizontales en la tropósfera	25

4.1.1.	Verano - DEF.....	25
4.1.2.	Otoño - MAM.....	29
4.1.3.	Invierno - JJA.....	30
4.1.4.	Primavera - SON.....	34
4.2.	Identificación de los patrones de circulación atmosféricos asociados a la variabilidad estacional.....	37
4.2.1	Verano - DEF.....	37
4.2.2	Otoño - MAM.....	44
4.2.3	Invierno - JJA.....	51
4.2.4	Primavera - SON.....	58
4.3.	Identificación de la persistencia (duración de cada patrón) y transición (probabilidad de ocurrencia) de cada uno de los patrones de circulación	64
4.3.1	Verano - DEF.....	64
4.3.2	Otoño - MAM.....	65
4.3.3	Invierno - JJA.....	69
4.3.4	Primavera - SON.....	71
4.4.	Determinación de la influencia de los patrones de circulación en la precipitación	74
4.4.1	Verano - DEF.....	74
4.4.2	Otoño - MAM.....	78
4.4.3	Invierno - JJA.....	82
4.4.4	Primavera - SON.....	86
V. CONCLUSIONES.....		90
VI. RECOMENDACIONES.....		93
VII. BIBLIOGRAFÍA.....		94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de los Datos de Reanálisis ERA – Interim y OLR	11
Tabla2: Porcentaje de días distribuidos entre los patrones de circulación atmosféricos (DEF)	65
Tabla 3: Porcentaje de días distribuidos entre los patrones de circulación atmosféricos (MAM).....	67
Tabla 4: Porcentaje de días distribuidos entre los patrones de circulación atmosféricos (JJA).....	71
Tabla 5: Porcentaje de días distribuidos entre los patrones de circulación atmosféricos (SON).....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1:** Esquema de circulación de bajos niveles de la atmósfera en América del Sur para el verano austral, donde HP y BP representan centros de alta y baja presión, ITCZ es la Zona de Convergencia Intertropical y SACZ es la Zona de Convergencia del Atlántico Sur.....6
- Figura 2:** Esquema de circulación de bajos niveles de la atmósfera en América del Sur para el invierno austral, donde HP representa un centro de alta presión y ITCZ es la Zona de Convergencia Intertropical.7
- Figura 3:** Ubicación de las estaciones meteorológicas del SENAMHI de 1979 al 2016 en el área de interés.....11
- Figura 4:** Esquema conceptual de Low Level Jet (LLJ) o jet de bajos niveles en América del Sur. MCS representa sistemas convectivos de mediana escala. Northeast Trades son vientos alisios noreste y ET es evapotranspiración....13
- Figura 5:** Vientos climáticos a 850 hPa (m/s) y convergencia de humedad regional integrada entre 0 y 500 hPa durante (A) el período de noviembre a febrero y para (B) el período de mayo a agosto ($\text{m g s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$). Variables similares de los materiales compuestos de LLJ en Santa Cruz de la Sierra (C) de noviembre a febrero y (D) de mayo a agosto.14
- Figura 6:** Modelo de carta Topológica en 2-D.17
- Figura 7:** Representación esquemática de los Mapas Auto Organizados (SOM) seguido por una clasificación Ascendente Jerárquica (CAH).....20

Figura 8: A) Representación del CAH aplicando el vector referencia de la carta de Kohonen. B) Clasificación de 49 vectores referentes (izquierda) en 7 CPs (derecha).	21
Figura 9: A) Carta bidimensional rectangular de Kohonen. B) Representación de vientos a 850hPa de las nueve neuronas señaladas en A) y C) el porcentaje de proyección de días lluviosos en cada neurona para el norte(arriba) y el sur (abajo).	22
Figura 10: a) Clasificación de 49 vectores referentes representadas en la carta de Kohonen, b) Dendograma de la clasificación ascendente jerárquica, sobre la línea rojas se indica el número de grupos seleccionados.	26
Figura 11: a) Esquema de número de grupos separados por las distancias euclidianas de los primeros 20 vectores referentes (b) Clasificación en 6 patrones de circulación o CPs en el mapa bidimensional.....	27
Figura 12: Determinación de los patrones de vientos horizontales a 200 hPa en DEF.....	28
Figura 13: a) Dendograma de la clasificación ascendente jerárquica, sobre la línea roja se indica el número de grupos seleccionados. b) Clasificación en 7 patrones de circulación o CPs en el mapa bidimensional.....	29
Figura 14: Determinación de los patrones de vientos horizontales a 200 hPa en MAM	31
Figura 15: a) Dendograma de la clasificación ascendente jerárquica, sobre la línea roja se indica el número de grupos seleccionados. b) Clasificación en 7 patrones de circulación o CPs en el mapa bidimensional	32
Figura 16: Determinación de los patrones de vientos horizontales a 200 hPa en JJA	33
Figura 17: a) Dendograma de la clasificación ascendente jerárquica, sobre la línea roja se indica el número de grupos seleccionados. b) Clasificación	

en 8 patrones de circulación o CPs en el mapa bidimensional.....	34
Figura 18: Determinación de los patrones de vientos horizontales a 200 hPa en SON.....	36
Figura 19: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.....	39
Figura 20: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.	40,41
Figura 21: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.	42,43
Figura 22: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.....	46
Figura 23: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.	47,48
Figura 24: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.	49,50

Figura 25: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.....	53
Figura 26: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.	54,55
Figura 27: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.	56,57
Figura 28: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.....	59
Figura 29: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.	60,61
Figura 30: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.	62,63
Figura 31: Probabilidad de persistencias y transiciones para el día posterior de cada patrón de circulación clasificado en DEF.....	66
Figura 32: Probabilidad de persistencias y transiciones para el día posterior de cada patrón de circulación clasificado en MAM.....	68

Figura 33: Probabilidad de persistencias y transiciones para el día posterior de cada patrón de circulación clasificado en JJA.....	70
Figura 34: Probabilidad de persistencias y transiciones para el día posterior de cada patrón de circulación clasificado en SON.....	73
Figura 35: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el DEF	75
Figura 36: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.	77
Figura 37: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el MAM.....	79, 80
Figura 38: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.	81
Figura 39: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el JJA.....	83, 84
Figura 40: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.	85
Figura 41: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el SON.....	87, 88
Figura 42: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y OLR. Los valores estandarizado de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.....	89

Figura 43: Probabilidad de persistencias y transiciones para dos días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en DEF. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón	106
Figura 44: Probabilidad de persistencias y transiciones para tres días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en DEF. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón	107
Figura 45: Probabilidad de persistencias y transiciones para cuatro días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en DEF. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón	108
Figura 46: Probabilidad de persistencias y transiciones para dos días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en MAM. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón	109
Figura 47: Probabilidad de persistencias y transiciones para tres días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en MAM. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón	110
Figura 48: Probabilidad de persistencias y transiciones para cuatro días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en MAM. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón	111
Figura 49: Probabilidad de persistencias y transiciones para dos días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en JJA. Tomando como referencia el CP7 como primer patrón	112
Figura 50: Probabilidad de persistencias y transiciones para tres días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en JJA. Tomando como referencia el CP7 como primer patrón	113
Figura 51: Probabilidad de persistencias y transiciones para cuatro días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en JJA. Tomando como referencia el CP7 como primer patrón	114

Figura 52: Probabilidad de persistencias y transiciones para dos días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en SON. Tomando como referencia el CP8 como primer patrón	115
Figura 53: Probabilidad de persistencias y transiciones para tres días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en SON. Tomando como referencia el CP8 como primer patrón	116
Figura 54: Probabilidad de persistencias y transiciones para cuatro días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en SON. Tomando como referencia el CP8 como primer patrón	117
Figura 55: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y PISCO en colores sólidos	119
Figura 56: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y PISCO en colores sólidos.....	120
Figura 57: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y PISCO en colores sólidos.....	121
Figura 58: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y PISCO en colores sólidos	122
Figura 59: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.....	123

Figura 60: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.....124

Figura 61: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.....125

Figura 62: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.....126

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Evolución temporal de los patrones de circulación atmosféricos a 200 hPa en las diferentes estaciones del año.....	105
ANEXO 2: Análisis de precipitaciones utilizando datos de anomalía estandarizada de la base de datos de PISCO-SENAMHI y anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y 850 hPa.....	118
ANEXO 3: Tabla: Relación de estaciones meteorológicas.....	127, 128, 129, 130

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo identificar los patrones de circulación (CPs) asociados a las estaciones del año que reflejen las características recurrentes de la variabilidad atmosférica estacional en el altiplano peruano boliviano y parte de la Amazonía boliviana. Para clasificar los patrones se utilizaron datos de vientos diarios a 200 hPa de reanálisis ERA – Interim para el periodo de 1979 al 2016 y se asoció cada patrón con la precipitación in situ de 173 estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de interés (15° S – 25° S, 80° W – 60° W) y a diferentes altitudes desde 156 m hasta 4 460 m. También se usó datos interpolados de precipitación del producto PISCO – SENAMHI desde 1981 al 2015 que utiliza datos de estaciones meteorológicas e información de datos satelitales del producto CHIRPS a escala mensual con una resolución de 5 km y datos de OLR (Outgoing Longwave Radiation) obtenida de la website de la NCAR/NOAA con una resolución de 2.5° x 2.5° en el mismo periodo. El análisis se realizó para las estaciones del año, en verano (DEF) se determinaron 6 patrones de circulación atmosférica, otoño (MAM) se determinaron 7 patrones de circulación atmosférica, invierno (JJA) se determinaron 7 patrones de circulación atmosférica y primavera (SON) con 8 patrones de circulación atmosférica. Para la agrupación se utilizó la clasificación ascendente jerárquica y redes neuronales SOM. Los patrones identificados muestran ciclos temporales bien definidos y patrones asociados a eventos extremos como inundaciones y sequías. Los resultados muestran consistencias al representar los datos de PISCO, las estaciones in situ del SENAMHI-Bolivia y OLR, representan nuevas perspectivas sobre los eventos hidrológicos extremos asociados a la circulación atmosférica en determinados patrones de circulación.

Palabras claves: Circulación atmosférica, Patrones de Circulación, Precipitación, Anomalía estandarizada de OLR, Altiplano peruano-boliviano, Eventos Extremos.

ABSTRACT

This study aims to identify the circulation patterns (CPs) that pertain to the seasons of the year that reflect the recurrent characteristics of the intra-seasonal atmospheric variability in the Peruvian-Bolivian highlands and a portion of the Bolivian Amazon. To classify the patterns, daily wind data was used at 200 hPa of ERA - Interim reanalysis for the period from 1979 to 2016 and each pattern was associated with the on-site precipitation of 173 weather stations located in the area of study (15° S - 25° S, 80° W - 60° W) and at different altitudes from 156 m to 4 460 m. Interpolated precipitation data of the PISCO – SENAMHI product was also used from 1981 to 2015 that uses weather station data and satellite data information of the CHIRPS product on a monthly basis with a resolution of 5 km and OLR (Outgoing Longwave Radiation) data obtained from the NCAR / NOAA website with a resolution of 2.5° x 2.5° during the same period. The analysis was performed in all four seasons of the year, in summer (DEF) 6 atmospheric circulation patterns were determined, in autumn (MAM) 7 atmospheric circulation patterns, in winter (JJA) 7 atmospheric circulation patterns and in spring (SON) 8 atmospheric circulation patterns. Hierarchical ascending classification and SOM neural networks were used for the grouping. The patterns identified show well defined time cycles and patterns related to extreme events such as floods and droughts. The outcomes show consistencies when representing the data of PISCO, the on-site stations of SENAMHI-Bolivia and OLR, which represent new perspectives on the extreme hydrological events that lie behind atmospheric circulation in certain circulation patterns.

Keywords: Atmospheric circulation, Circulation patterns, Precipitation, Standardized OLR anomaly, Peruvian-Bolivian highlands, Extreme events.

I. INTRODUCCIÓN

El altiplano exhibe un clima semiárido con una precipitación media anual que oscila entre unos 600 mm en el noreste y 200 mm en el suroeste (Aceituno, 1988; Aceituno y Montesinos, 1993). La mayor parte de la precipitación (70 por ciento) ocurre durante el verano austral, en los meses de diciembre, enero y febrero (DEF), cuando los vientos del este permiten el ascenso de aire húmedo que alimenta tormentas convectivas sobre la meseta (Garreaud, 1999; Garreaud *et al.*, 2003; Falvey y Garreaud, 2005). La precipitación de verano tiene una variabilidad sinóptica significativa, explicada en gran medida por la capa límite local de humedad y el viento zonal en el aire (Garreaud y Aceituno, 2001) y severas tormentas debido a la formación de sistemas convectivos de mesoescala (Velasco y Fritsch, 1987; Seluchi y Marengo, 2000), el calor latente es liberado en las tormentas mientras los flujos de vientos en superficie se desplazan hacia el este, produciendo un mecanismo de retroalimentación positiva (Seluchi y Saulo, 1997). El resto del año el altiplano está influenciado por el flujo del oeste de nivel alto que trae aire seco del Pacífico y los eventos de precipitación son casi inexistentes (Vuille y Ammann, 1997). En las escalas de tiempo interanuales, existe una tendencia a una mayor (menor) precipitación en toda la cuenca durante los años de La Niña (El Niño), que también se explica en gran medida por la intensidad del flujo de vientos zonales de niveles altos, también a escala decadal (Garreaud y Aceituno, 2001; Vuille *et al.*, 2000; Segura *et al.*, 2016).

La incursión de vientos a bajos niveles que se desplazan desde el sur hacia el norte del continente genera cambios drásticos en el sistema térmico y dinámico de la atmósfera en latitudes medias y altas (Marengo y Wagner, 2004, Álvarez *et al.*, 2013). Los episodios de estas incursiones han sido estudiados en diferentes áreas geográficas, tales como el Sistema del Monzón de Asia y sus características en invierno (Lu y Chan, 1999; Wu y Chan, 1995), así como en Estados Unidos para las Montañas Rocosas (Colle y Mass, 1995), donde las temperaturas decrecen rápidamente a causa de la incursión de vientos en la abrupta topografía de las Rocallosas, llegando a valores de hasta 22 m/s y donde la componente

vertical del viento se incrementa, advectando aire frío. En América del Sur, los estudios de estos eventos son de importancia debido a los impactos sociales y económicos en los pueblos de la Amazonía (Hidalgo, 2014) y en el altiplano peruano (Lavado y Obando, 2002) a causa de la incursión de vientos del sur y el efecto de barrera natural de la cordillera de los Andes, generan precipitaciones en el sur de Chile y nevadas en los Andes subtropicales (Garreaud y Rutllant, 1996). Otros estudios analizan su relación con la precipitación, en Argentina (Vera y Vigliarolo, 2000), en el sur de Brasil (Marengo *et al.*, 1997), en la Amazonía peruana (Espinoza *et al.*, 2013), en general, en toda América del Sur (Espinoza *et al.*, 2012; Wang y Fu, 2002; Boers *et al.*, 2013; Espinoza *et al.*, 2013; Sicart *et al.*, 2015).

La distribución espacial e intensidad de las precipitaciones debido a la presencia de nevadas en la estación de invierno, junio, julio y agosto (JJA), son atribuidos a los diferentes mecanismos que pueden producirlos (friajes, bajas segregadas o ambos) (Vuille y Amman, 1997; Sicart *et al.*, 2015). Uno de los mecanismos que influye en las precipitaciones en la época seca es la formación de *Cut off Low* o Bajas Segregadas (Hoskins *et al.*, 1985; Bell y Bosart, 1993), que son procesos que ocurren en la alta y media tropósfera por la contribución de aire frío del *jet streak* o celda de aire frío que se desplaza con gran velocidad de la corriente de chorro (Hoskins *et al.*, 1993). En las costas de Chile se realizaron estudios sobre los impactos en los sistemas de la precipitación durante la formación de las bajas segregadas (Garreaud y Rutllant, 1993). Estos sistemas fomentan el incremento en el gradiente zonal de presión que incrementa el flujo del norte proveniente de la Amazonía (Ferreira *et al.*, 2005) e intensifica los vientos hacia el norte, entre Argentina, Bolivia y sureste de Brasil a causa del viento polar (Godoy *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 1997). Este fenómeno es uno de los mecanismos que producen precipitaciones intensas y nevadas en el altiplano peruano boliviano de corta duración durante la estación seca (JJA) y que está dentro del periodo de recarga en los glaciares tropicales, como el glaciar de El Zongo ubicado en Bolivia y analizar factores que contribuyen o mitigan la reducción drástica del derretimiento de los glaciares (Sicart *et al.*, 2015).

Trabajos previos realizados en la cuenca amazónica relaciona estos comportamientos con la variabilidad de la precipitación. Espinoza *et al.* (2012) describen cómo los flujos de vientos de bajos niveles son utilizados para determinar los patrones de circulación atmosféricos (CPs) para el área de la cuenca, este análisis demostró claramente la existencia de conexiones

entre la parte sur y norte de la cuenca amazónica en términos de patrones de circulación/precipitación y su coherencia con el desplazamiento regional de la actividad convectiva hacia el norte para las estaciones del año. Paccini (2016) muestra los CPs que influyen en la cuenca amazónica para todos los días del año, este estudio está centrado en la cuenca amazónica peruana, donde sugiere que la precipitación está forzada principalmente por la circulación de vientos de bajos niveles. Otros de los trabajos mencionan la relación de los patrones de circulación atmosférica con las incursiones de vientos del sur durante JJA y drásticos descensos de temperatura de hasta 10° C en un día (Satyamurty *et al.*, 1998), (Espinoza *et al.*, 2012), muestran la evolución temporal entre los CPs y la temperatura a lo largo el flanco este de la cordillera de los Andes cuando el frente frío ingresa en el continente y se desplaza hacia el norte; llegando hasta la Amazonía peruana.

En América del Sur, el pronóstico y monitoreo de eventos extremos, como lluvias o incursiones de vientos del sur, sigue siendo una de las grandes limitaciones. El altiplano peruano boliviano, por su topografía abrupta y estaciones meteorológicas con información incompleta, dificultan una adecuada caracterización. Es por eso que los resultados de este trabajo de investigación tienen una gran importancia para poder entender el comportamiento físico de estos eventos extremos y la circulación atmosférica asociados a los mismos que son caracterizados a escala sinóptica y estacional, de manera que este trabajo de tesis pueda brindar información adecuada y aportar posibles pronósticos de eventos extremos, su monitoreo y la toma de decisiones de autoridades para la prevención y mitigación de daños en poblaciones vulnerables.

El objetivo general es determinar patrones de circulación de vientos a escala estacional asociados a la precipitación, su frecuencia e intensidad en las estaciones del año en la tropósfera alta en el altiplano peruano boliviano, por medio de los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar patrones de vientos horizontales en la tropósfera.
2. Identificar patrones de circulación atmosférica asociados a la variabilidad estacional.
3. Identificar la persistencia (duración de cada patrón) y transición (probabilidad de ocurrencia) de cada uno de los patrones.
4. Determinar la influencia de los patrones de circulación en la precipitación.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Circulación intraestacional en América del Sur

El América del Sur se presenta factores que influyen en la circulación atmosférica como la cordillera de los Andes, así como características climáticas que presentan un ciclo regular, el termino intraestacional está relacionada a variaciones que ocurren dentro de cada estación del año con duración de hasta tres meses o 90 días (Garreaud y Aceituno, 2001).

2.2. Circulación atmosférica y elementos relacionados

El Sistema Monzónico Sudamericano (SAMS) es el factor regulador del clima más importante de Sudamérica y constituye uno de los mayores regímenes de circulación. En el mes de octubre se inicia la fase húmeda del sistema caracterizado por presentar lluvias intensas con énfasis en el centro y este de Brasil y regiones andinas ubicadas en latitudes medias. En los meses de diciembre, enero y febrero (DEF) se registra la mayor contribución de precipitaciones en esta área coincidiendo con la fase madura del SAMS, como ha sido registrado en trabajos previos (Espinoza *et al.*, 2011).

Los vientos alisios son una de las forzantes del sistema SAMS que transportan la humedad desde el Océano Atlántico. La topografía agreste del continente conformada principalmente por la barrera natural o cordillera de los Andes que bloquea la circulación de bajos niveles y desvía el flujo de humedad hacia el oeste de Brasil, Bolivia y Paraguay.

La banda profunda nubosa dependiendo de la estación del año ubicada cerca de la línea ecuatorial, aproximadamente a 8° N, o Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) es el lugar donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte y hemisferio sur, asociada a la circulación de la celda de Haldley (OMM, 1967).

La banda del oeste del Pacífico ecuatorial o Zona de Convergencia del Pacífico Sur (SPCZ) se extiende hacia el continente hasta los 40° S aproximadamente e inicia cerca de las Islas Solomón en Fiiji, mostrando una mayor actividad convectiva en verano que es explicada por los sistemas frontales extratropicales.

La banda nubosa del este o Zona de Convergencia del Atlántico Sur (SACZ) ubicada en la parte central del continente se extiende en la dirección sureste-noreste, entre 15° S y 40° S (Nogle-Peagle y Mo, 1997) que produce una fuerte actividad convectiva en bajos niveles en la estación cálida, de noviembre a marzo, siendo responsable del transporte de humedad desde la cuenca amazónica hacia Paraguay, Argentina, sureste de Brasil y Uruguay.

La circulación en verano está representada en la Figura 1 según Espinoza (2009), la Amazonía central, los Andes centrales y las llanuras subtropicales del continente presentan sistemas convectivos intensos (SACZ), en esta estación se forma una celda de baja presión extremadamente seca y caliente sobre la región de Chaco en bajos niveles, que en altos niveles, favorece la formación de una celda de alta presión conocida como la Alta de Bolivia, que responde al calentamiento en la alta tropósfera generado por la convección sobre la base amazónica y ascenso de vientos compensado por el descenso de vientos de los sistemas de alta presión ubicados en cada uno de los océanos adyacentes al continente, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y Anticiclón del Atlántico Sur (AAS). El flujo dirigido hacia el norte entre los Andes y Brasil (15° S y 40° S) indica la presencia del *low level jet* (LLJ) o jet de bajos niveles que llega hasta valores de 15 m/s y es responsable del transporte de vapor de agua y calor en la región de Paraguay y el norte de Argentina hacia la Amazonía (Paegle, 1987; Satyamurty y Nobre, 1998), basado en el criterio de Bonner (1968) para vientos a bajos niveles (850 hPa) mayores o iguales a 12 m/s, la componente meridional dirigida hacia el norte y una diferencia entre las velocidades del viento entre 850 hPa y 700 hPa que debe ser mayor o igual a 6 m/s y ubicados en la región de Santa Cruz y Mariscal Estigarribia en Bolivia (Marengo *et al.*, 2004).

La Figura 2 muestra el comportamiento de la atmósfera en invierno, las masas de aire frío y alta presión cerca de la superficie penetran hacia el noreste del continente, causando intensas heladas y friajes en el sur, entre los 30° S y 20° S, que gradualmente pierden intensidad, avanzando hacia la cuenca amazónica, causando estragos en Bolivia, este y norte del Perú, la región amazónica del Brasil y el sur de Colombia, Venezuela y hasta la Guyana francesa

en algunos casos (Satyamurty y Nobre, 1998). Los *Cut off Lows*, o bajas segregadas son celdas aisladas con vorticidad ciclónica en niveles medios y altos de la atmósfera ubicadas en latitudes subtropicales y medias, debido a la intensificación en la rapidez de los vientos en algunas zonas del *jet stream* o corriente de chorro subtropical de altos niveles, denominados *jet streak* (Hoskins *et al.*, 1985).

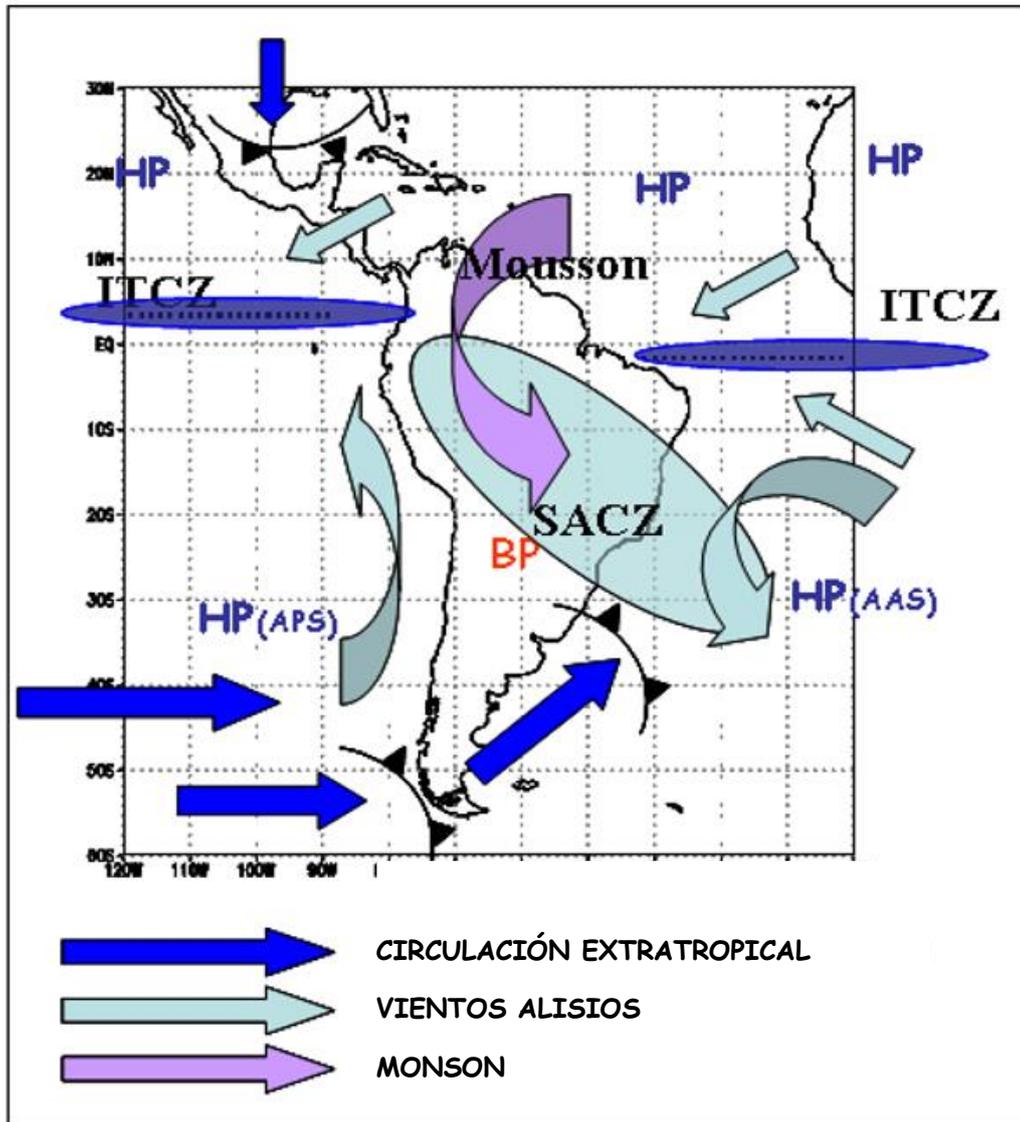


Figura 1: Esquema de circulación de bajos niveles de la atmósfera en América del sur para el verano austral, donde HP y BP representan centros de alta y baja presión, ITCZ es la Zona de Convergencia Intertropical y SACZ es la Zona de Convergencia del Atlántico Sur. FUENTE: Adaptado de Espinoza, 2009.

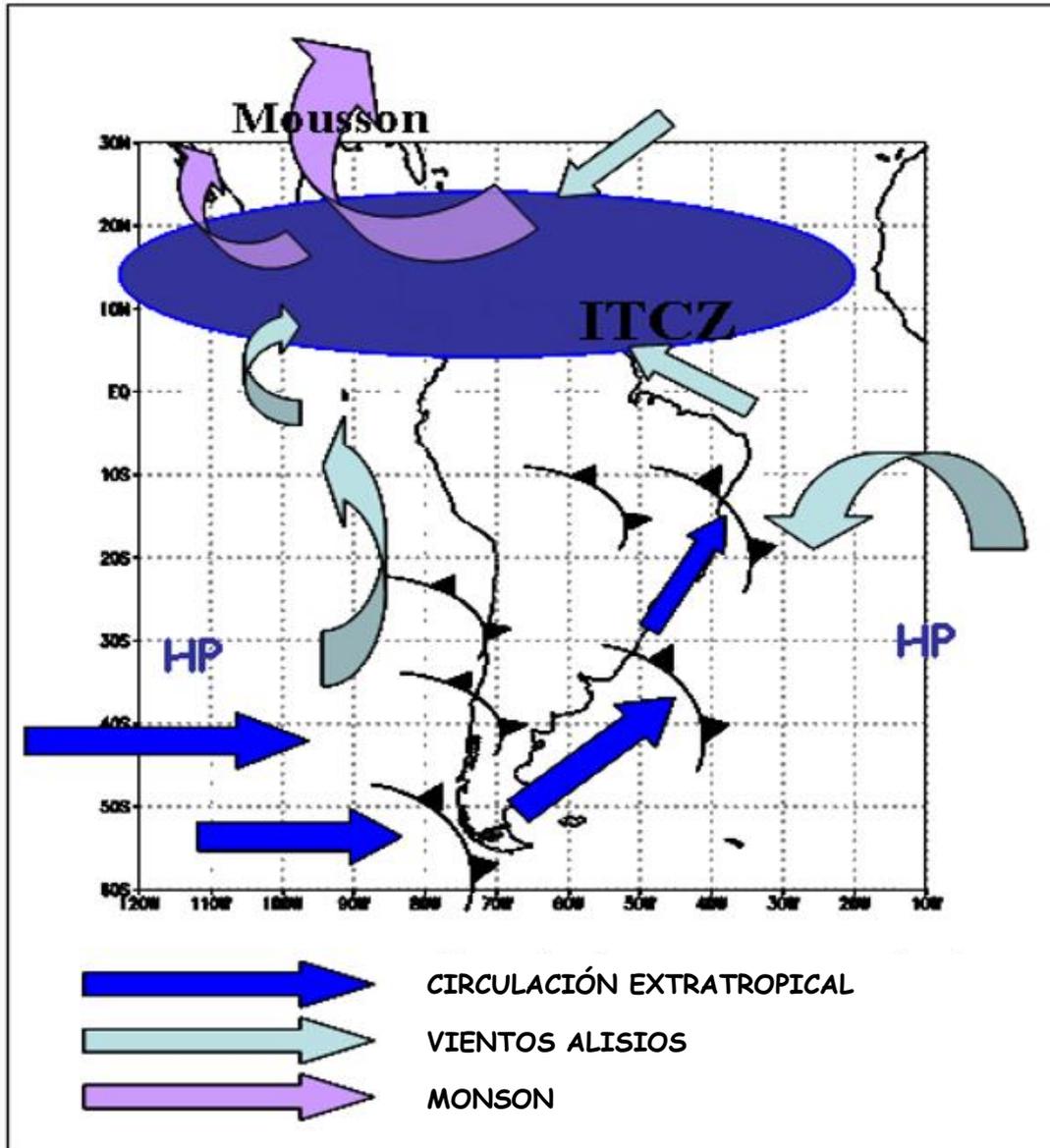


Figura 2: Esquema de circulación de bajos niveles de la atmósfera en América del sur para el invierno austral, donde HP representa un centro de alta presión y ITCZ es la Zona de Convergencia Intertropical.

FUENTE: Adaptado de Espinoza, 2009.

2.3. PATRONES DE CIRCULACIÓN

Es la configuración de una circulación atmosférica de características recurrentes definidas sobre una determinada región (OMM, 1967) relacionada directamente con cambios en variables locales como temperatura o precipitación (Hewitson y Crane, 2002).

Para realizar la definición de CPs, se ha utilizado el análisis de clúster o SOM. En estudios previos para la identificación de la variabilidad atmosférica de una determinada región relacionada a circulaciones sinópticas y de mesoescala, anuales e intraestacionales, (Cavazos, 1999; Espinoza *et al.*, 2009, 2012, 2013; Bettolli *et al.*, 2010, Debortoli *et al.*, 2015).

En América del Sur, Espinoza *et al.* (2012; 2013), realizan estudios sobre patrones de precipitación relacionados con la circulación de vientos a bajos niveles, mostrando en otoño, correspondiente a los meses de marzo, abril y mayo (MAM) y en JJA, 7 CPs, en DEF, 6 CPs y en primavera, correspondiente a los meses de setiembre, octubre y noviembre (SON), 8 CPs, con duraciones de hasta 10 días aproximadamente. Identifica el patrón característico de precipitación en la cuenca de La Plata (CP 2), relaciona la propagación de perturbaciones extratropicales dirigidas hacia el este, asociados al flujo monzónico y advección de vientos del sur, que desplaza la precipitación hacia el norte de la CA. En invierno, predominan los frentes fríos, desplazándose hacia el norte y generando precipitaciones en el flanco este de los Andes a causa del movimiento hacia el este de la onda de Rossby extratropical.

Paccini (2016), identifica los CPs de macroescala para caracterizar la variabilidad atmosférica para la cuenca amazónica y los relacionó con las precipitaciones en La Amazonía. Cada uno de los CPs tiene una duración promedio de 14 días, para todo el año y se encontraron 9 patrones de circulación, donde el patrón CP2 está asociado a días con mayor precipitación en el año.

Se identificaron 9 CPs basados en vientos de bajos niveles (850 hPa) sobre el área 50° S - 15° N, 95° O - 30° O a través de la aplicación de un método híbrido de agrupamiento de datos, *Self-Organizing Maps* y Clasificación Ascendente Jerárquica. Estos 9 CPs se organizan en el mapa bidimensional del SOM de acuerdo con tres tipos de circulación dominante: regímenes del norte (CP2, CP8 y CP9), regímenes del sur (CP4, CP5 y CP6) y una circulación con situaciones intermedias (CP7, CP1, CP3). De acuerdo con sus características algunas CPs se consideran como variaciones de sistemas climáticos conocidos como la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (CP1) y el Jet de Bajos Niveles Sudamericano (CP8).

La variabilidad interanual del viento zonal explica la mitad de la varianza de la convección y, por lo tanto, las precipitaciones en verano sobre el altiplano a través de un patrón de vientos este/húmedo – oeste/seco. Las anomalías de la circulación están en equilibrio geostrófico con los cambios en la baroclinicidad meridional en la frontera sur del borde tropical, pues las fluctuaciones del viento zonal sobre los Andes centrales son en gran parte producidas por trenes extratropicales de onda de Rossby que se amplifican sobre América del Sur subtropical (Garreaud y Aceituno, 2001; Vuille, 2000). En el trabajo de Segura *et al.*; 2016, realizan un análisis decadal e interdecadal de vientos zonales a 200 hPa (U200) sobre los Andes centrales donde muestra que también controlan la variabilidad de las precipitaciones de baja frecuencia en la región del altiplano y la influencia de la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico central que explica el 66 por ciento de la baja frecuencia de los vientos zonales a 200 hPa por encima de los Andes, esto significa que durante décadas, cuando el Océano Pacífico occidental se encuentra en un estado cálido (frío), predominan las anomalías oeste (este) en la variabilidad de baja frecuencia de vientos zonales por encima de los Andes centrales.

III. METODOLOGÍA

3.1. Descripción del área de estudio

3.1.1. Datos históricos

Se dispone con datos de precipitación de 173 estaciones meteorológicas de la región de estudio pertenecientes a Perú y Bolivia de 1979 al 2016 que son proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) – Bolivia (http://senamhi.gob.bo/index.php/record_estaciones) y Perú proporcionadas por el IRD con hasta el 33 por ciento de datos faltantes para cada una de las estaciones meteorológicas (ver Anexo 3) en la región de interés, ver Figura 3, con alturas variables entre 156 m hasta 4 460 m.

Se usó datos de precipitación interpolada del producto PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations. Precipitación) – SENAMHI desde 1981 al 2015 que utiliza datos de estaciones meteorológicas de todo el Perú con un número de estaciones variables desde 180 hasta 448 con la condición que tengan al menos 10 años de registro (un año con al menos 9 meses de datos e información) y datos satelitales del producto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) el cual tiene datos a escala global de precipitación con una resolución de 0.05° y funciona desde enero de 1981 a escala mensual.

Se analizó datos diarios de reanálisis obtenidos de ERA-Interim (http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_full_daily) siendo el resultado de un compilado de datos observados que incluyen datos satelitales, boyas, embarcaciones, reportes aéreos y datos de modelos de pronóstico, con una resolución de 0.75° x 0.75° por grilla, considerando las componentes zonales “u” y meridional “v” del viento y altura geopotencial a diferentes niveles de presión.

Adicional a ello, se utilizó información diaria interpolada de OLR que significa Outgoing Longwave Radiation o Radiación de Onda Larga obtenida de la website de la NCAR/NOAA (https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.interp_OLR.html). La información se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de los Datos de Reanálisis ERA – Interim y OLR.

VARIABLE	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN TEMPORAL	NIVEL VERTICAL	ÁREA	PERIODO
Viento zonal y meridional (“u” y “z”)	0.75° x 0.75°	Datos de 0 h, 6 h, 12 h y 18 h diarios	850 hPa, 500 hPa y 200 hPa	60° S – 60° N 150° O – 150° E	1979 – 2016
Altura geopotencial	0.75° x 0.75°	Datos de 0 h, 6 h, 12 h y 18 h diarios	850 hPa, 500 hPa y 200 hPa	60° S – 60° N 150° O – 150° E	1979 – 2016
OLR	2.5° x 2.5°	diaria		60° S – 60° N 150° O – 150° E	1979 – 2013

FUENTE: Elaboración propia

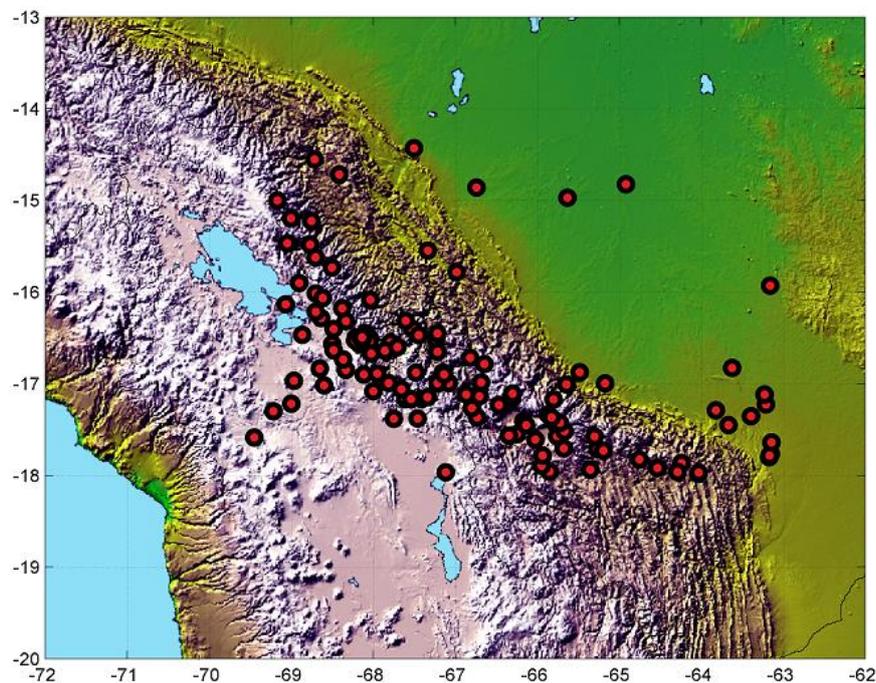


Figura 3: Ubicación de las estaciones meteorológicas del SENAMHI de 1979 al 2016 en el área de interés.

FUENTE: Elaboración propia

3.1.2. Softwares utilizados

Se utilizó el programa MATLAB ® para el procesamiento de datos, elaboración de programas, así como herramientas del SOM Toolbox.

3.1.3. Eventos climáticos estacionales en el Altiplano peruano boliviano

Espinoza *et al.* (2011), refuerzan las aplicaciones de la clasificación jerárquica en clima, para ello, clasifica patrones asociados a la precipitación en la cuenca amazónica con énfasis en la ocurrencia de eventos extremos y en Espinoza *et al.* (2012), realizan una revisión de eventos extremos en invierno como las incursiones de vientos del sur y su influencia en las precipitaciones. Estas incursiones de vientos fueron usadas para determinar el índice de nubosidad y la circulación atmosférica asociada a estos eventos en el glaciar de El Zongo (Sicart *et al.*, 2015) y la contribución de estas incursiones en el proceso de recarga del glaciar.

En Espinoza *et al.* (2015) mencionan la importancia de la región de hotspots, son lugares con máxima precipitación, que vienen a ser regiones muy ricas para las actividades económicas y de precipitaciones extremas con alturas entre los 400 m y 700 m. En condiciones de barlovento, pueden percibir valores de precipitación de más de 4 000 mm/año representadas en las estaciones de Quincemil y San Gabán en Perú, Chiripiri y Cristal Mayu en Bolivia. En invierno, los hotpost peruanos muestran precipitaciones muy intensas atribuida a la circulación de vientos de bajos niveles. En el punto caliente del norte, los vientos de bajo nivel soplan casi perpendicular a las estribaciones orientales de los Andes durante todo el año, mejorando la circulación local y la convección forzada por la topografía. Sin embargo, en el punto caliente del sur, los vientos del noroeste-sureste soplan paralelos a los Andes, y son más intensos en el invierno austral, ligado a la intensificación del anticiclón del Atlántico Sur. Los vientos *cross* ecuatoriales juegan un papel importante en la modulación de la variabilidad de las precipitaciones cerca de la superficie, mientras se observa una disminución gradual de esta influencia al este de los Andes en relación con la altitud y la orografía.

En algunas ocasiones, los flujos de aire van hacia el noroeste entre la ladera oriental de los Andes y la meseta brasileña son particularmente fuertes en Bolivia (cerca de Santa Cruz de

la Sierra), a aproximadamente 1 km de la costa y altura geopotencial entre 800 hPa a 900 hPa (Douglas *et al.*, 1999); transportan masas de aire muy húmedo desde el Océano Atlántico y de norte a sur de la Amazonía y la cuenca de La Plata (Figura 4). Estos flujos se llaman chorro de nivel bajo de América del Sur y se observan en esta área durante todo el año (Saulo *et al.*, 2000; Marengo *et al.*, 2004, Vera *et al.*, 2006). La Figura 4 muestra un diagrama conceptual del LLJ como un componente del monzón sudamericano, según Marengo *et al.* (2004). Esta figura ilustra cómo el transporte de humedad, enriquecido por la evapotranspiración en la CA, genera una fuerte actividad convectiva en la cuenca de La Plata.

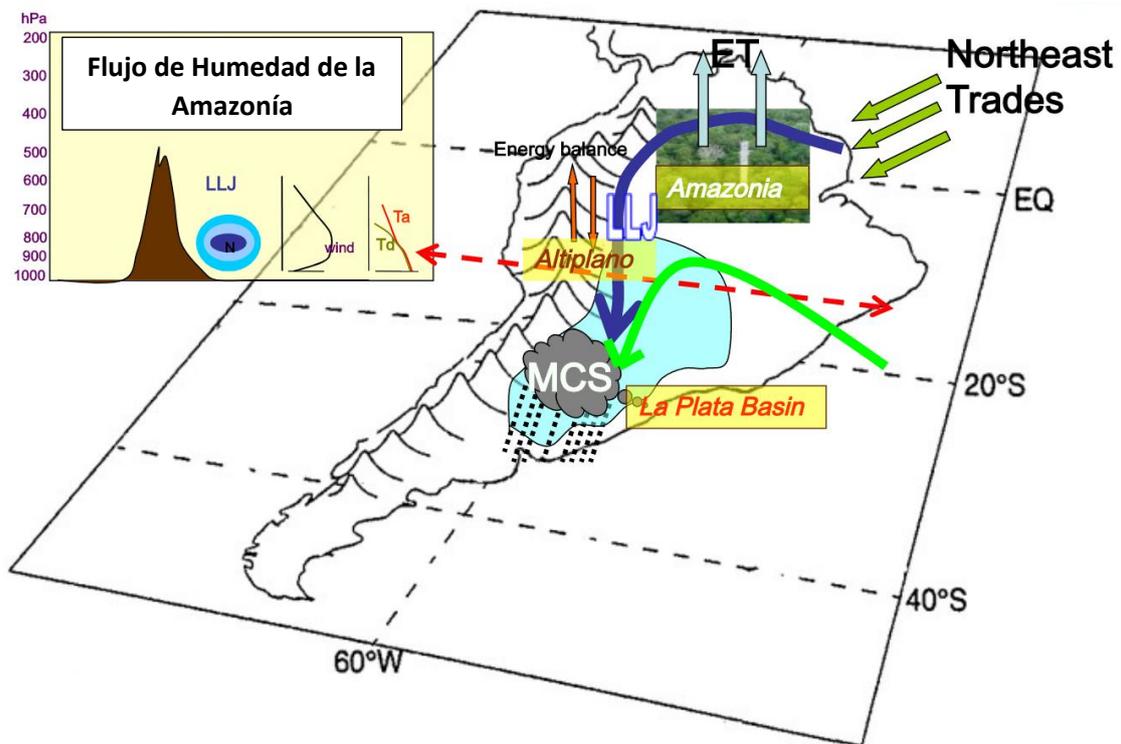


Figura 4: Esquema conceptual de Low Level Jet (LLJ) o jet de bajos niveles en Sudamérica. MCS representa sistemas convectivos de mediana escala. Northeast Trades son vientos alisios noreste y ET es evapotranspiración.

FUENTE: Adaptado de Marengo *et al.*, 2004.

La Figura 5 (Marengo *et al.* (2004)) muestra las condiciones de circulación promedio y el flujo de vapor de agua integrado entre el suelo y 500 hPa en presencia de eventos LLJ en Santa Cruz de la Sierra, para la temporada de calor (de septiembre a abril) y la temporada de frío (de mayo a agosto). Durante la temporada de calor, el LLJ es más intenso y conectado a los vientos alisios del noreste del Atlántico norte tropical; los flujos de humedad del

meridiano de la región ecuatorial del continente se duplican en relación con las condiciones promedio de la temporada (Figura 5c). Durante el invierno, el LLJ es independiente de los vientos alisios del noreste (en ausencia del monzón); los fuertes flujos del norte se desarrollan a medida que aumenta SOA, generando fuertes vientos del este hacia el sur al acercarse los Andes (Figura 5 d). En conclusión, el LLJ es un fenómeno intermitente que existe a lo largo del año, pero cuyo origen, en relación con la circulación regional, es diferente según la estación.

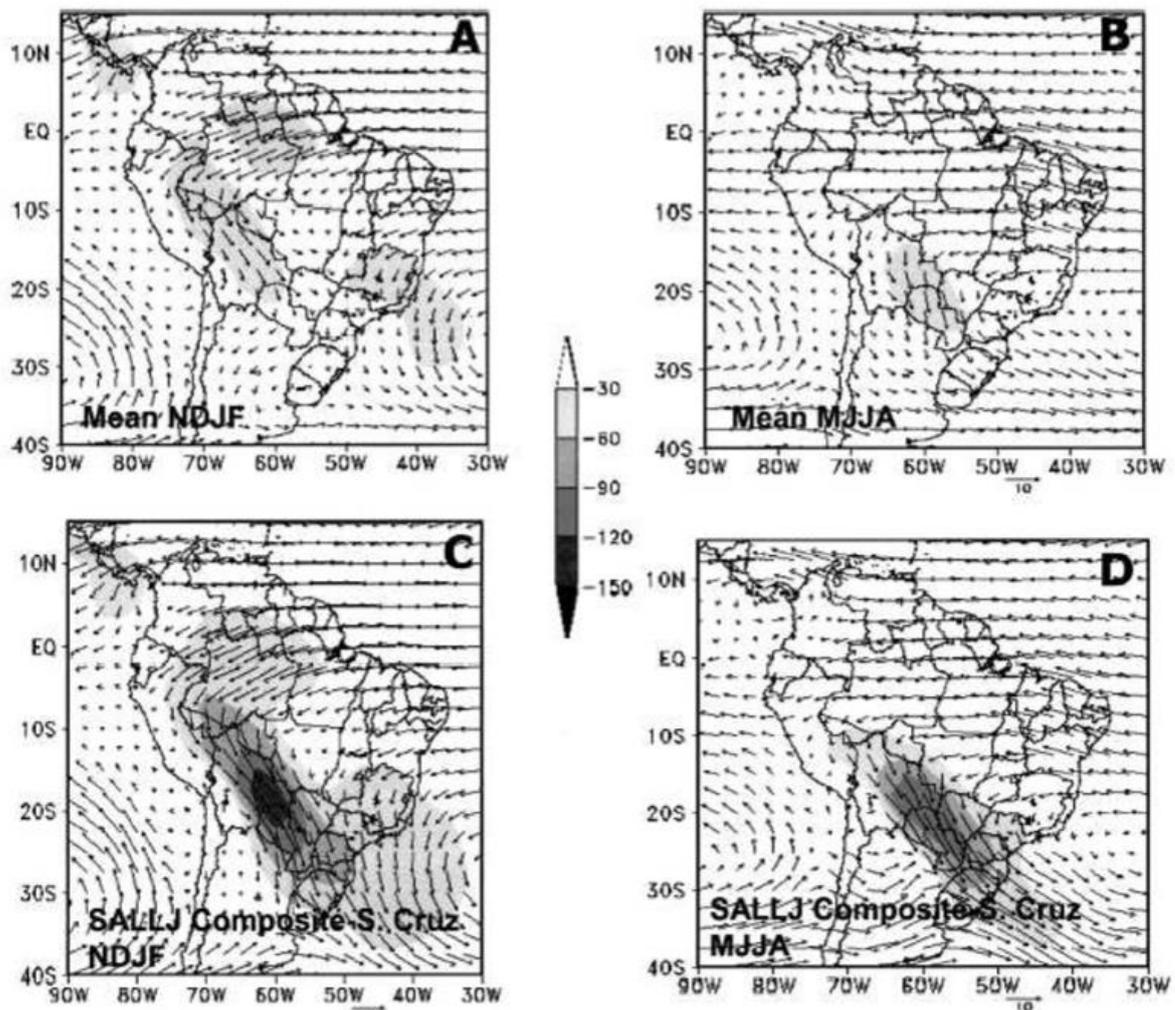


Figura 5: Vientos climáticos a 850 hPa (m/s) y convergencia de humedad regional integrada entre 0 y 500 hPa durante (A) el período de noviembre a febrero y para (B) el período de mayo a agosto ($\text{m g s}^{-1} \text{kg}^{-1}$). Variables similares de los materiales compuestos de LLJ en Santa Cruz de la Sierra (C) de noviembre a febrero y (D) de mayo a agosto.

FUENTE: Marengo *et al.*, 2004.

3.2. Métodos

Esta sección presenta los métodos y herramientas utilizados para caracterizar el clima en el altiplano peruano boliviano de acuerdo con los objetivos presentados.

3.2.1. Determinación de patrones de vientos horizontales en la tropósfera

Como el objetivo es obtener patrones de escala temporal estacional, usando anomalías de datos estandarizados para las estaciones de verano, invierno, otoño y primavera. Luego del preprocesamiento de datos se empleó el método de mapas de Autoorganizados o SOM basado en las cartas de Kohonen y redes neuronales (Kohonen, 1984, 2001) y el método de Clasificación Jerárquica Ascendente. Espinoza *et al.* (2012) emplearon esta metodología para el área de América del Sur.

a. Cartas o Mapas Auto Organizados (SOM) – Redes Neuronales

Una red neuronal se compone de unidades llamadas neuronas. Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Esta salida viene dada por tres funciones:

- Una función de propagación (también conocida como función de excitación), que por lo general consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión (valor neto). Si el peso es positivo, la conexión se denomina excitatoria; si es negativo, se denomina inhibitoria.
- Una función de activación, que modifica a la anterior. Puede no existir, siendo en este caso la salida la misma función de propagación.
- Una función de transferencia, que se aplica al valor obtenido por la función de activación. Se utiliza para acotar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que queramos darles a dichas salidas. Algunas de las más utilizadas son la función sigmoidea.

Una de las metodologías a aplicar en este estudio son los algoritmos de autoorganización de cartas de Kohonen (Kohonen, 1984, 2001) y algoritmos de SOM (*Self-Organizing Maps*). Si bien es cierto, los usos de estas metodologías han sido aplicadas en diferentes áreas, en

clima han usado estas herramientas para clasificar los regímenes de tempestades en el norte de México y Texas (Cavazos, 1999), esto permitió realizar un estudio sobre la determinación de eventos extremos y su influencia sobre la precipitación.

El algoritmo SOM se basa en la clasificación estadística de proyección no lineal y no supervisadas, permitiendo la representación de la matriz de datos de gran tamaño de una manera sintética basado en dos criterios o proceso de dos capas:

- Una capa inicial: Las observaciones se encuentran en $X_i \in R^d$, donde X_i está definido para la variable d , todos los datos a analizar generalmente en grandes dimensiones, $D = \{X_i \in R^d, i = 1:n\}$.
- La capa de salida: La carta C (representación del espacio), de dimensión reducida, generalmente una grilla regular bidimensional (de dimensiones $p \times q$). La topología o estructura de mapa bidimensional determine la zona donde se define la malla y las áreas aledañas. Las neuronas se encuentran conectadas unas a otras con las neuronas adyacentes por una relación de vecindad. Una neurona de capa de salida se define por dos posiciones: por un lado, por sus coordenadas (viento zonal, viento meridional) con una resolución espacial de $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ a 200 hPa a partir de los datos de reanálisis de ERA-Interim en el espacio de representación (es decir, su posición en el mapa C) y, por otro lado, por un vector $X_i \in R^d$, denominado vector de referencia (o vector de código, vector de peso, prototipo), que está asociado con él en el espacio de datos. Cada neurona C está completamente conectada a la capa de entrada. En el caso de este estudio, la capa de salida consta de 49 neuronas con cartas donde $p = 7$ y $q = 7$.

En nuestro caso, el algoritmo del SOM realiza una proyección no lineal de los datos de entrada en una matriz de dos dimensiones y cada componente de la matriz se denomina neurona, estas neuronas se encuentran conectadas entre sí en base a una topología determinada.

La Figura 6, muestra la forma y el tamaño de la carta determinando el número de relaciones entre las neuronas. La elección de las dimensiones de las cartas depende en gran medida del modelo y el nivel de la investigación en detalle. El algoritmo de entrenamiento de las neuronas es similar al algoritmo de cuantificación de los vectores referentes. La gran diferencia entre ellos es que su proceso incluye un mecanismo de autoorganización

topológico, permitiendo que las neuronas vecinas en el mapa SOM, se actualicen en cada proceso, este viene a ser el algoritmo de entrenamiento del SOM es similar al algoritmo de cuantificación de vectores, como el método de *k-means*. Ello permite que las neuronas se encuentren en forma ordenada en el mapa bidimensional, es decir, tienen vectores referentes parecidos, entonces, también serían similares en el espacio real donde se realiza el estudio. Las neuronas vecinas tienen vectores referentes parecidos y, por lo tanto, son también similares en el espacio (Vesanto *et al.*, 2000).

El algoritmo de entrenamiento busca adaptar los vectores a través de un proceso de interacción, de manera que cada vector referente final represente a un grupo de datos, es por ello por lo que se debe realizar un proceso de inicialización antes del proceso de entrenamiento. El algoritmo de entrenamiento al realizar ciclos sucesivos, cada ciclo analiza cada uno de los vectores $\vec{x}_i, i = 1, 2, \dots, n$, donde n es el número de vectores, para luego calcular el vector referente más cercano $\vec{y}_{w(i)}$ denominado Best-Matching Unit (BMU) que es el vector referente que minimiza la distancia al vector de datos:

$$\|\vec{x}_i - \vec{y}_{w(i)}\| = \min_k \|\vec{x}_i - \vec{y}_k\|, k = 1, \dots, m.$$

donde $\| \ \|$ es la medida de la distancia y m el número total de neuronas.

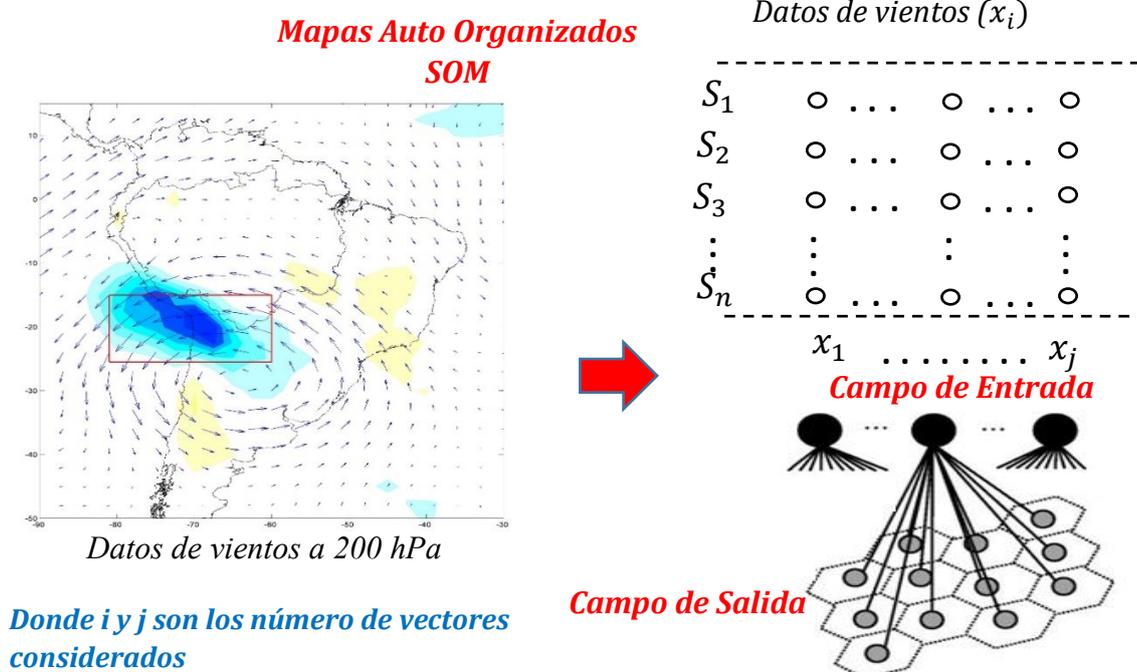


Figura 6: Modelo de carta Topológica en 2-D.
FUENTE: Elaboración propia

Después de encontrar el vector referente BMU, se recalculan y actualizan los vectores referentes del SOM en base al centroide del grupo correspondiente y de los grupos vecinos:

$$y_j = \frac{\sum_{i=1}^n h(\|r_j - r_{w(i)}\|)x_i}{\sum_{i=1}^n h(\|r_j - r_{w(i)}\|)}, j = 1, 2, \dots, m$$

El núcleo de la vecindad, denominado $h(r)$, mide las distancias de los grupos en el mapa bidimensional (carta del SOM) y se encarga de determinar la tasa de cambio de un vector referente en base a los grupos vecinos, generalmente y en este caso se usa una función Gaussiana:

$$h(r) = e^{-\frac{r}{s(t)}}$$

donde $s(t)$ es el radio de la vecindad que decrece uniformemente en el tiempo, suavizando las restricciones topológicas (Kohonen *et al.*, 2001).

b. Clasificación Ascendente Jerárquica

La clasificación ascendente jerárquica está basada en la estrategia de la distancia mínima o similitud máxima. En este método se considera que la distancia o similitud entre dos clústeres viene dada, respectivamente, por la mínima distancia (o máxima similitud) entre sus componentes. Ya que los datos obtenidos aún son un número considerablemente grande, esta técnica ayudará a realizar la clasificación de subgrupos utilizando las distancias Euclidianas.

Así, si tras efectuar la etapa K -ésima, tenemos ya formados $n - K$ clústeres o agrupaciones, la distancia entre ellos C_i (con n_i elementos) y C_j (con n_j elementos) sería:

$$d(C_i, C_j) = \min_{\substack{x_l \in C_i \\ x_m \in C_j}} \{d(x_l, x_m)\} \quad l = 1, \dots, n_i; \quad m = 1, \dots, n_j$$

Mientras que la similitud, si estuviéramos empleando una medida de tal tipo, entre los dos clústeres sería:

$$s(C_i, C_j) = \max_{\substack{x_l \in C_i \\ x_m \in C_j}} \{s(x_l, x_m)\} \quad l = 1, \dots, n_i; \quad m = 1, \dots, n_j$$

Con ello la estrategia seguida en el nivel $K + 1$ será:

- En el caso de emplear distancias, se unieron los clústeres C_i y C_j si

$$d(C_i, C_j) = \min_{\substack{i_1, j_1=1, \dots, n-K \\ i_1 \neq j_1}} \{d(C_{i_1}, C_{j_1})\} = \min_{\substack{i_1, j_1=1, \dots, n-K \\ i_1 \neq j_1}} \left\{ \min_{\substack{x_l \in C_i \\ x_m \in C_j}} \{d(x_l, x_m)\} \right\}$$

$$l = 1, \dots, n_i; \quad m = 1, \dots, n_j$$

- En el caso de emplear similitudes, se unieron los clústeres C_i y C_j si

$$s(C_i, C_j) = \max_{\substack{i_1, j_1=1, \dots, n-K \\ i_1 \neq j_1}} \{s(C_{i_1}, C_{j_1})\} = \max_{\substack{i_1, j_1=1, \dots, n-K \\ i_1 \neq j_1}} \left\{ \max_{\substack{x_l \in C_i \\ x_m \in C_j}} \{s(x_l, x_m)\} \right\}$$

$$l = 1, \dots, n_i; \quad m = 1, \dots, n_j$$

De acuerdo con el problema y datos a tratar, se puede utilizar el SOM como la reducción de espacio de datos manteniendo la resolución, se calcula una clasificación de vectores referentes, por ejemplo, utilizando la clasificación jerárquica ascendente (CAH), como lo mostrado en la Figura 7 y considerando las máximas similitudes entre los clusters obtenidos, de acuerdo con el trabajo de Espinoza (2009). La Figura 8 muestra la carta de Kohonen basada en la clasificación jerárquica de los vectores referentes determinados usando las cartas SOM y en la Figura 9 se representan los vientos a 850hPa de las neuronas señaladas en las cartas de Kohonen y las asocia con otras variables con el porcentaje de proyección de días lluviosos en cada neurona respectivas (Espinoza *et al.*, 2012)

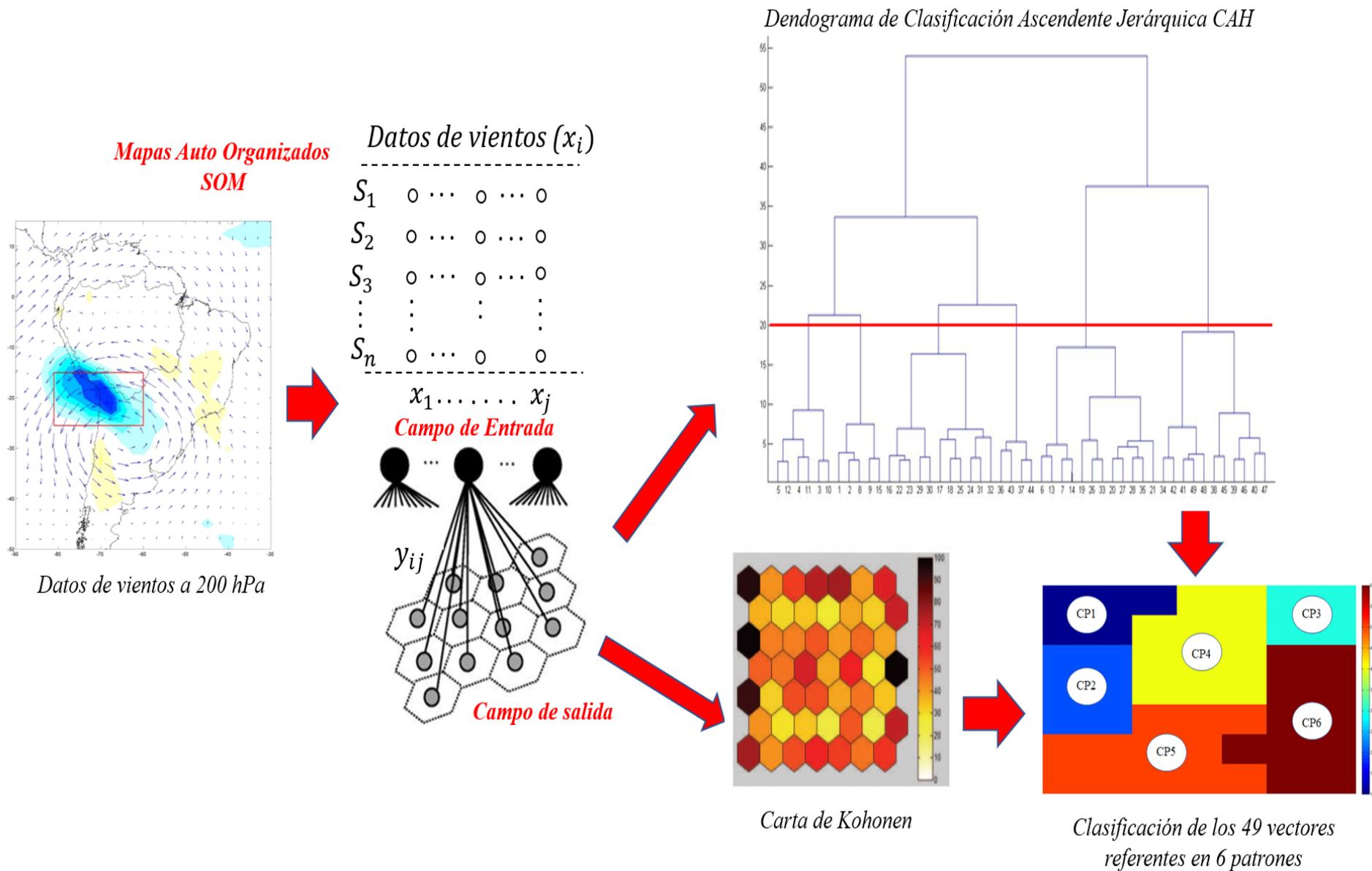


Figura 7: Representación esquemática de los Mapas Auto Organizados (SOM) seguido por una clasificación Ascendente Jerárquica (CAH).
 FUENTE: Elaboración propia.

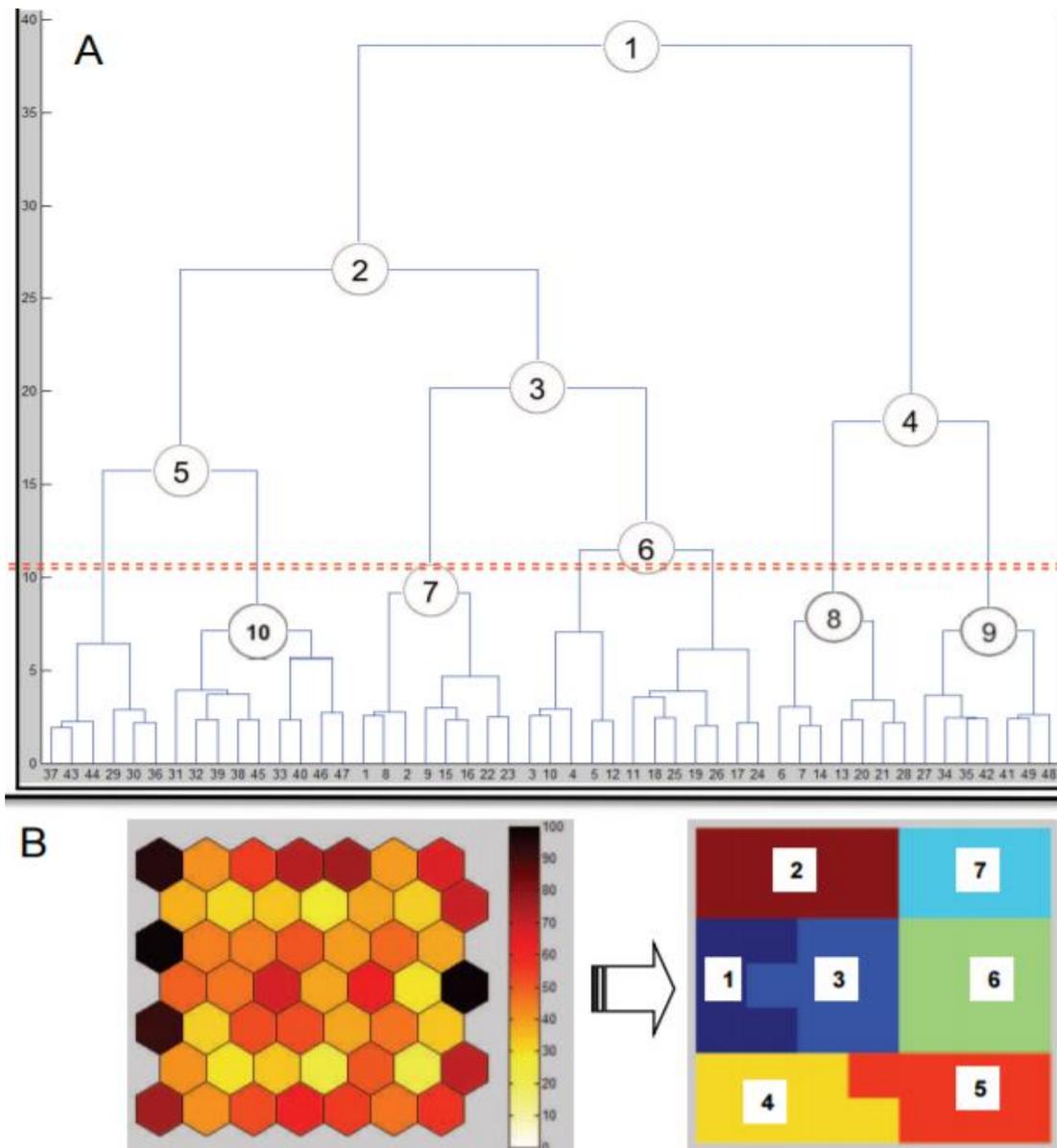


Figura 8: A) Representación de la Clasificación Ascendente Jerárquica o CAH aplicando el vector referencia de la carta de Kohonen. B) Clasificación de 49 vectores referentes (izquierda) en 7 CPs (derecha).

FUENTE: Espinoza *et al.*, 2012

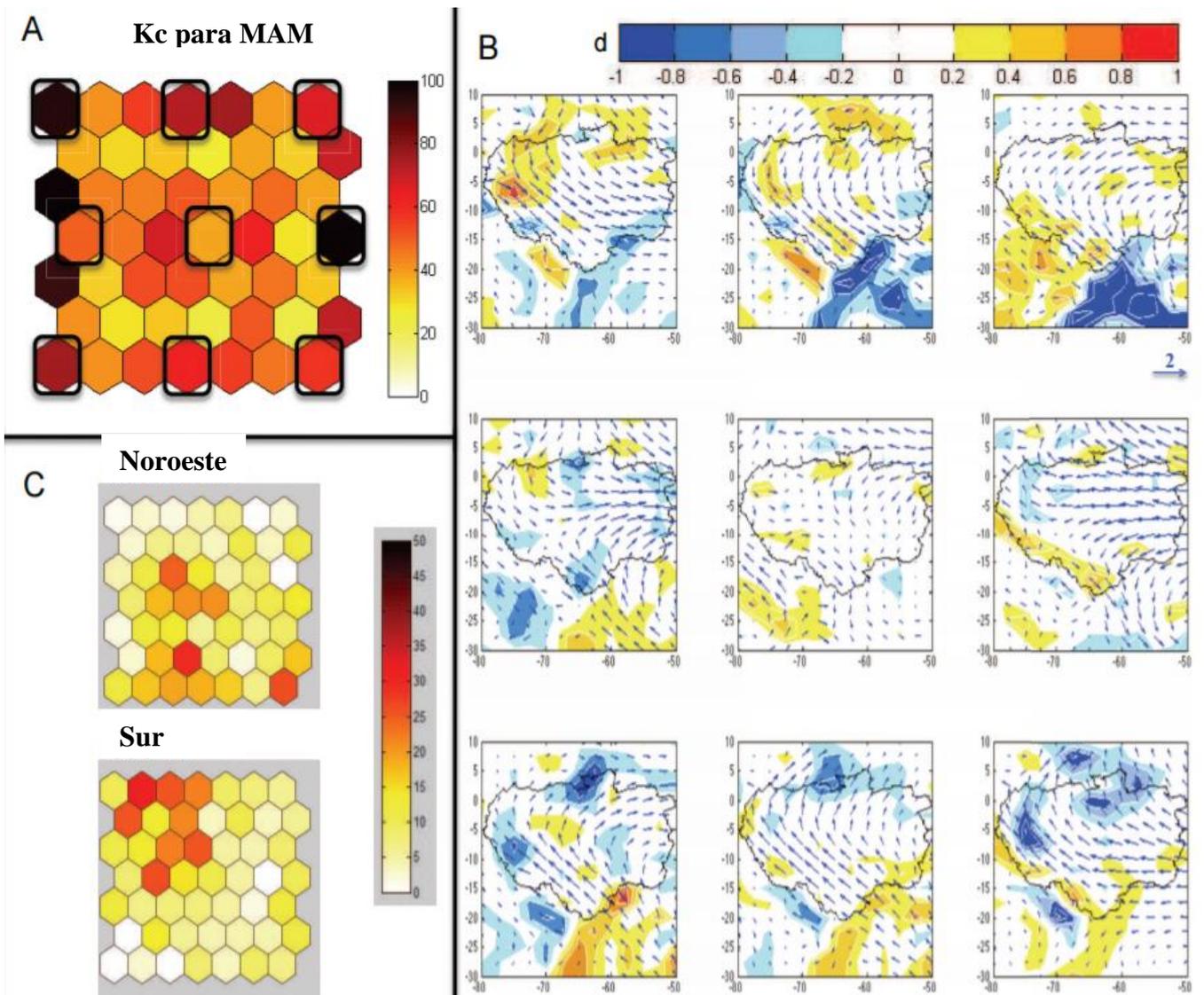


Figura 9: A) Carta bidimensional rectangular de Kohonen (Kc). B) Representación de vientos a 850hPa de las nueve neuronas señaladas en A) y C) el porcentaje de proyección de días lluviosos en cada neurona para el norte(arriba) y el sur (abajo).

FUENTE: Adaptado de Espinoza *et al.*, 2012.

3.2.2. Identificación de patrones de circulación atmosférica asociados a la variabilidad intraestacional utilizando técnicas de agrupación estadística.

Los patrones de circulación atmosféricos están definidos a partir de la variable de viento, tanto componente zonal como meridional de vientos a 200 hPa en el área comprendida entre 15° S – 25° S y 80° W – 60° W, perteneciente al Altiplano peruano boliviano, desde 1979 hasta el 2016. En la primera agrupación, usando cartas SOM (auto - organizadas) se clasificaron estacionalmente, es decir, para verano (DEF) con 3340 días, otoño (MAM) con

3496 días, invierno (JJA) con 3496 días y primavera (SON) con 3458 días. Por ejemplo, para la estación de verano se clasificaron 3340 días y estos días se agruparon en 6 patrones de circulación con dimensiones de 7 x 7 asociadas a dos componentes de las variables, la posición en el espacio bidimensional de SOM y el vector referente, el cual esté definido por la circulación atmosférica que representa dicho.

3.2.3. Identificación de la persistencia (duración de cada patrón) y transición (probabilidad de ocurrencia) de cada uno de los patrones.

Al determinar correctamente los patrones de circulación, se considera el concepto de transición y persistencia mediante la matriz de *classData*, obtenido como resultado de la clasificación.

- **Transición:** Es definida como la probabilidad que existe que un patrón de circulación pase a otro patrón en una cierta cantidad de días posteriores (Puede ser considerada como un día, dos días, ... etc en posterior).

$$CPm(t) = CPn(t + 1)$$

$$CPm(t) = CPn(t + 2)$$

.

.

.

$$CPm(t) = CPn(t + n)$$

donde:

t = día a analizar que pertenece a la *classData* o grupo de días de cada estación del año.

$n = 1,2,3, \dots$ días posteriores

- **Persistencia:** es definida como la probabilidad que un patrón de circulación permanezca los días siguientes al día t que este se presenta.

$$CPm(t) = CPm(t + i)$$

donde:

$t =$ día a analizar que pertenece a la classData o grupo de días de cada estación del año.

$m = 1,2,3, \dots$ patrones de circulación correspondientes al día t . Considerando que $i = 1,2,3, \dots$ es el número de días posteriores al día t

- **Frecuencia:** Definida como el número de días que un patrón de circulación CP se repite en un periodo de tiempo. Para realizar el cálculo de la frecuencia se utilizó el número de días de las estaciones del año (verano - DEF, otoño - MAM, invierno - JJA y primavera- SON).

3.2.4. Determinación de la influencia de los patrones de circulación en la precipitación

Después de identificar las características temporales de cada patrón y su correcta clasificación, se analiza la influencia que presenta en las variables meteorológicas involucradas.

- Análisis de la estructura vertical: Para ello se utiliza información de altura geopotencial estandarizada a diferentes niveles de presión: 850 hPa y 200 hPa. Para ello se utilizó la información obtenida de la clasificación de las redes neuronales denominada classData, se realizó un promedio de los días de cada CP en cada estación del año.
- Comparación de datos de precipitación in situ y OLR: Para verificar la calidad de los datos de precipitación asociada a los CPs se verificaron datos que pueden ser considerados outliers utilizando el diagrama de Boxplot y los cuartiles de cada serie de tiempo, la data trabajada fue con las estaciones en el área de interés que cuentan con hasta 33 por ciento de datos faltantes, para que el estudio no pueda estar influenciado por valores anómalos. Luego de ello se compara los datos con la OLR, separando los días correspondientes a cada una de las cartas asociadas a los CPs.
- Caracterización de los patrones de circulación durante eventos extremos: Para estudiar la relación que existe entre los patrones de circulación y los eventos hidrológicos extremos, se escogieron las características atípicas de los CPs considerando la frecuencia de los eventos y las anomalías de precipitación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se procede a describir cómo se determinó cada uno de los patrones de circulación por asociación o agrupación de datos, estas técnicas fueron descritas anteriormente en la sección de métodos. Después de identificar los patrones se describe las características de cada uno de ellos relacionadas a la transición, persistencia, frecuencia y la influencia de estos comportamientos en cada estación del año de acuerdo con los objetivos específicos propuestos.

4.1. Determinación de los patrones de vientos horizontales en la tropósfera

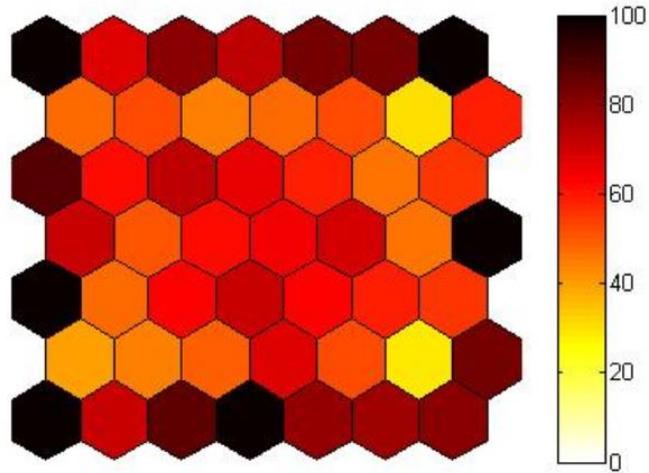
4.1.1. Verano - DEF

En la primera agrupación, usando cartas auto - organizadas se clasificaron para verano (DEF) con 3340 días que se agruparon en 6 patrones de circulación representados mediante una neurona en el mapa bidimensional de los Mapas SOM con dimensiones de 7 x 7 asociadas a dos componentes de las variables, la posición en el espacio bidimensional de SOM y el vector referente.

Para el verano DEF, la Figura 10 muestran 6 patrones determinados, estos patrones resumen el comportamiento característico de la estación de verano mediante el dendograma de la clasificación ascendente jerárquica para seleccionar el número de patrones basado en la variabilidad que existe entre los grupos basados en la distancia de separación de los vectores referentes, formando así grupos característicos.

a)

Kc para DEF



b)

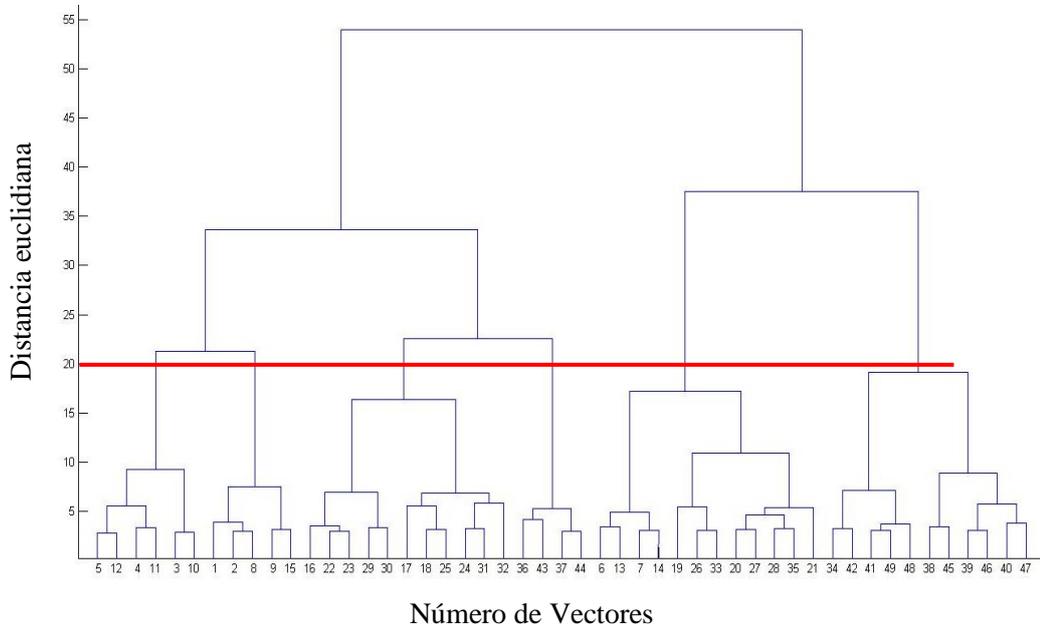


Figura 10: a) Clasificación de 49 vectores referentes representadas en la carta de Kohonen, b) Dendrograma de la clasificación ascendente jerárquica, sobre la línea roja se indica el número de grupos seleccionados.

FUENTE: Elaboración propia.

Para el DEF, la Figura 11 muestra la neurona asociada a los 49 vectores referentes y basados en la clasificación ascendente jerárquica descrita en líneas anteriores se seleccionan los patrones característicos basados en mayor similitud que existe entre los CPs más cercanos en el espacio, solo se representan 20 vectores referentes de un total de 49.

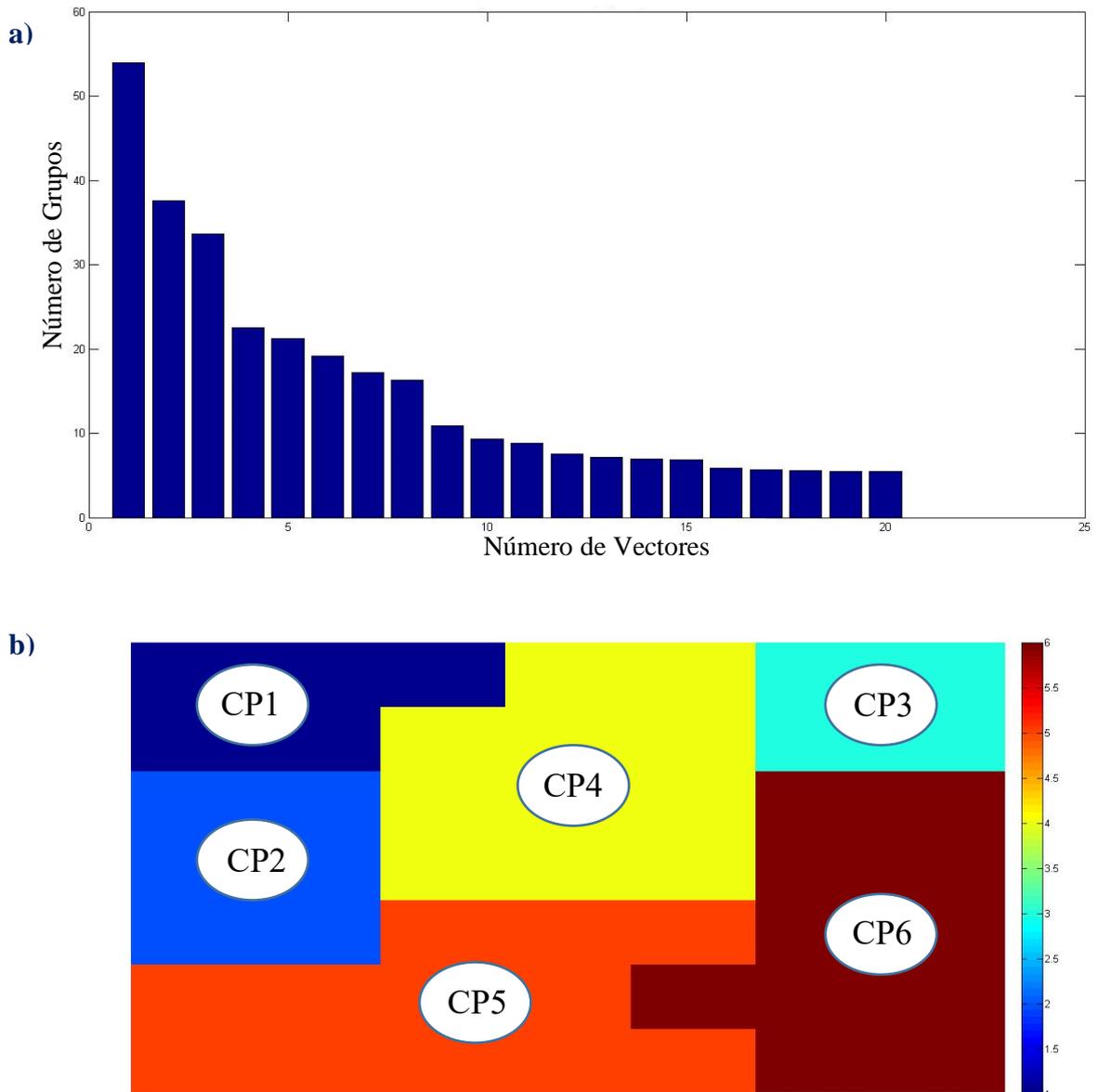


Figura 11: a) Esquema de número de grupos separados por las distancias euclidianas de los primeros 20 vectores referentes (b) Clasificación en 6 patrones de circulación o CPs en el mapa bidimensional.

FUENTE: Elaboración propia.

La Figura 12 muestra los patrones de vientos a 200 hPa asociados a la circulación atmosférica representada como un promedio de los días que conforman los grupos de vectores referentes con características similares. El recuadro de color rojo mostrado en cada patrón representa el área donde se determinaron los patrones de circulación.

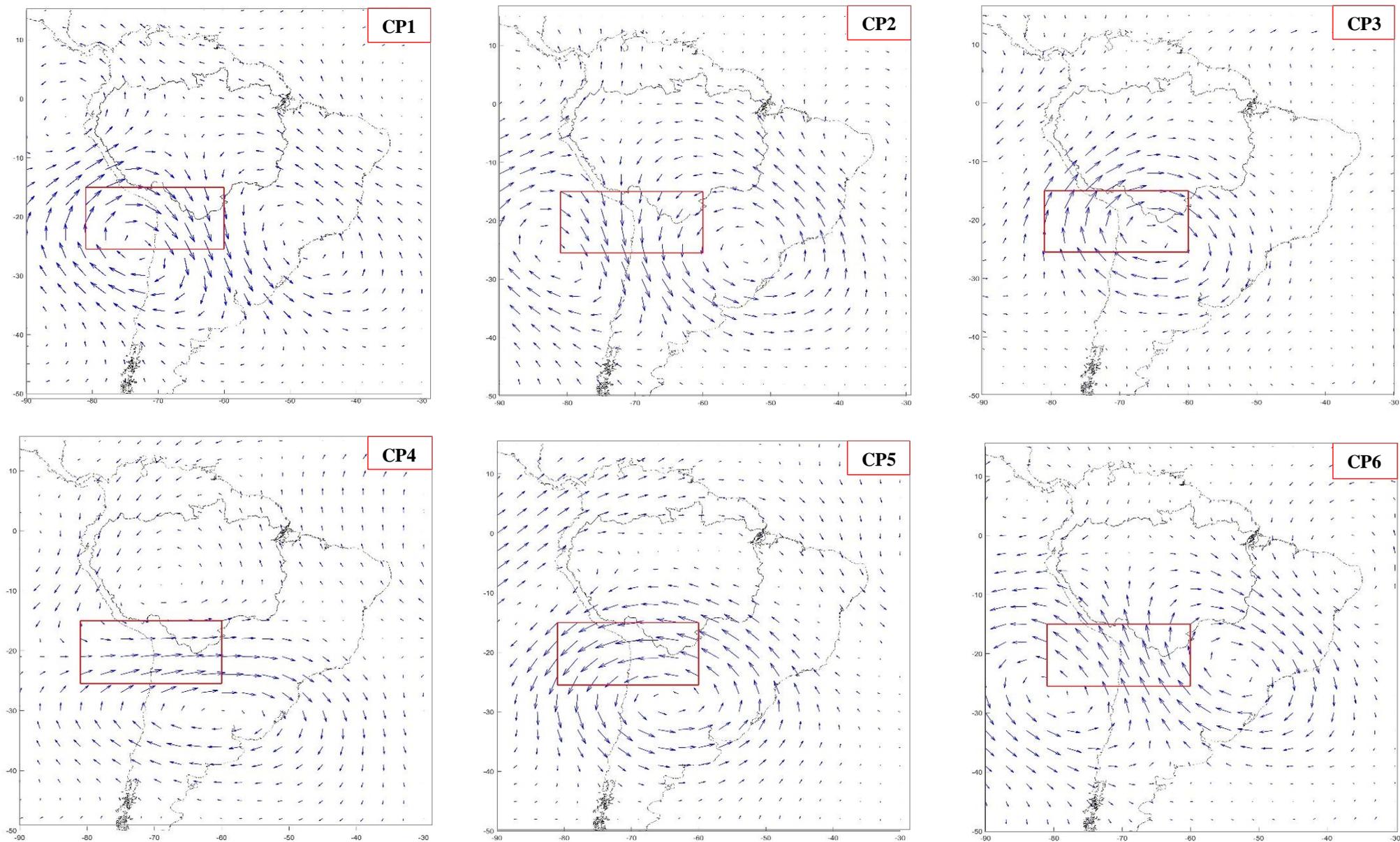


Figura 12: Determinación de los patrones de vientos horizontales a 200 hPa en DEF.

FUENTE: Elaboración propia.

4.1.2. Otoño – MAM

En la segunda agrupación, usando cartas SOM se clasificaron para otoño (MAM) un total de 3496 días que se agruparon en 7 patrones de circulación representados mediante una neurona en el mapa bidimensional de SOM con dimensiones de 7 x 7 asociadas a dos componentes de las variables, la posición en el espacio bidimensional de SOM y el vector referente. La Figura 13 muestra los patrones que resumen el comportamiento característico de la estación de otoño mediante el dendograma de la clasificación ascendente jerárquica para seleccionar el número de patrones basado en la variabilidad que existe entre los grupos, formando así grupos característicos. Se consideró el procedimiento descrito en DEF para las Figura 10 y Figura 11 en todas las estaciones siguientes.

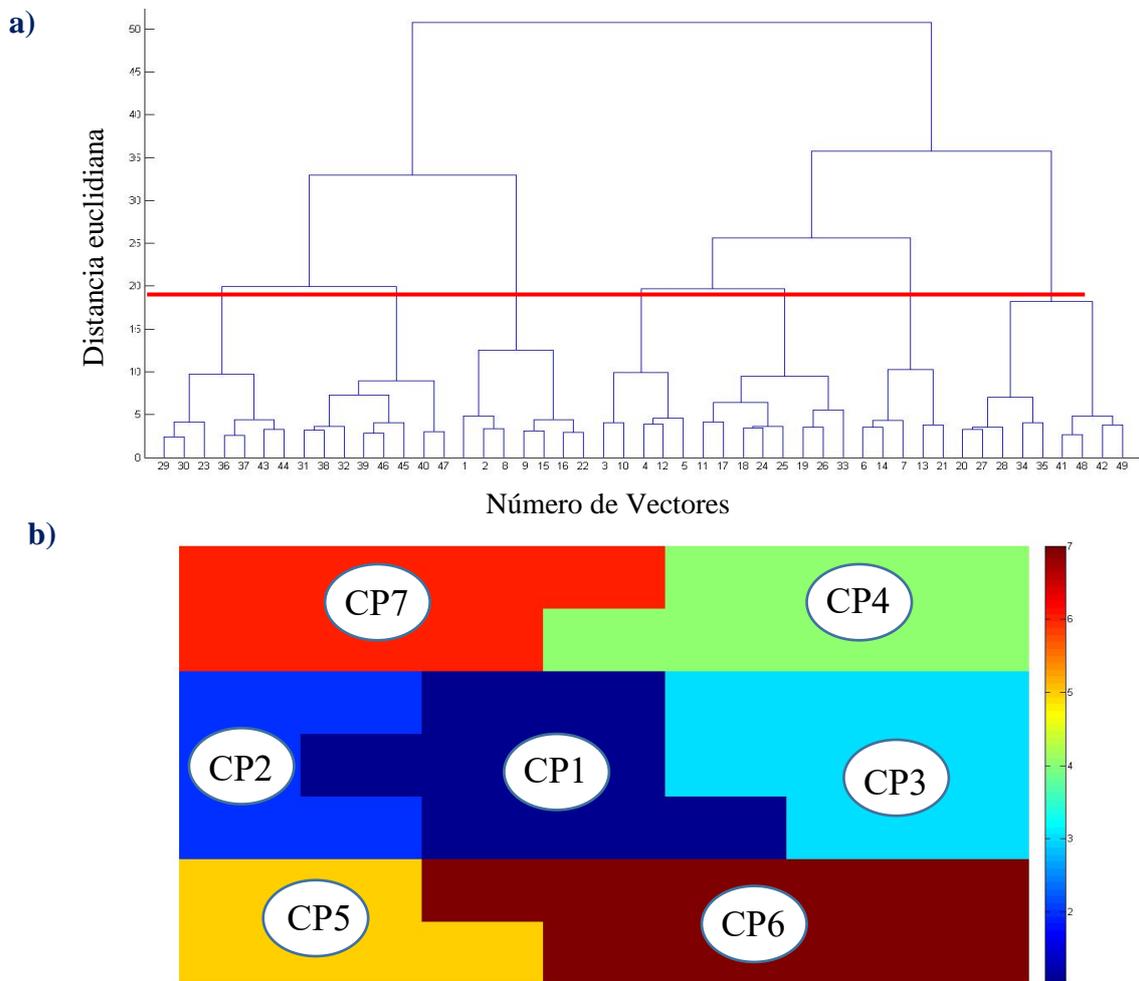


Figura 13: a) Dendograma de la clasificación ascendente jerárquica, sobre la línea roja se indica el número de grupos seleccionados. b) Clasificación en 7 patrones de circulación o CPs en el mapa bidimensional.

FUENTE: Elaboración propia.

La clasificación ascendente jerárquica descrita anteriormente selecciona los patrones característicos basados en mayor similitud que existe entre los CPs más cercanos en el espacio.

La Figura 14 muestra los patrones de vientos a 200 hPa asociados a la circulación atmosférica que se representa como un promedio de los días que conforman los grupos de vectores referentes con características similares. El recuadro de color rojo mostrado en cada patrón representa el área donde se determinaron los patrones de circulación.

4.1.3. Invierno – JJA

Para la tercera agrupación, se usó las cartas auto – organizadas y se clasificaron un total de 3496 días, donde fueron agrupados en 7 patrones de circulación representados mediante una neurona en el mapa bidimensional SOM con dimensiones de 7 x 7 asociadas a dos componentes de las variables, la posición en el espacio bidimensional de SOM y el vector referente. La Figura 15 muestra los patrones determinados que resumen el comportamiento característico mediante el dendrograma de la clasificación ascendente jerárquica para seleccionar el número de patrones basado en la variabilidad que existe entre los grupos, formando así grupos característicos.

La clasificación ascendente jerárquica descrita anteriormente selecciona los patrones característicos basados en mayor similitud que existe entre los CPs más cercanos en el espacio.

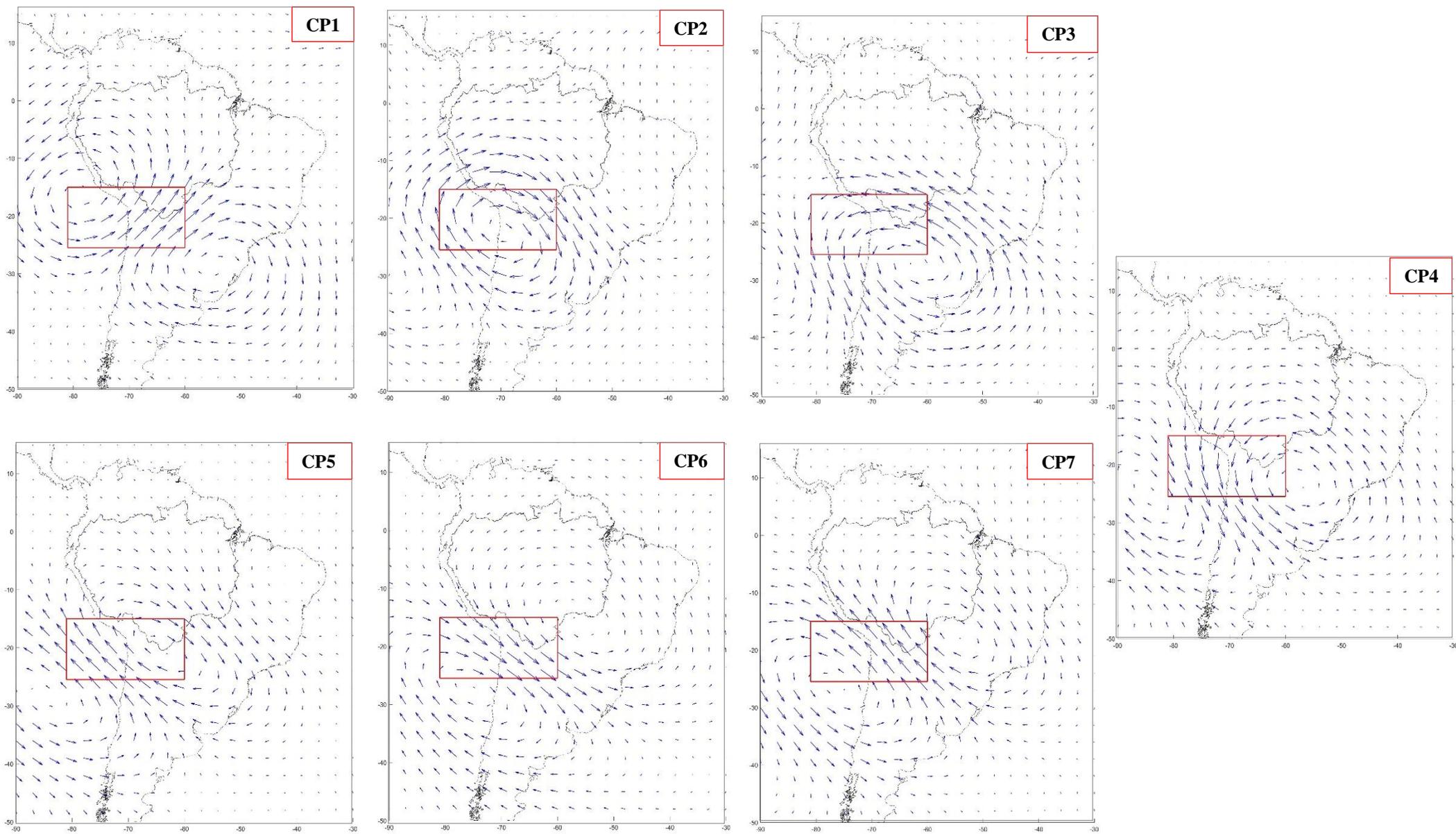


Figura 14: Determinación de los patrones de vientos horizontales a 200 hPa en MAM.

FUENTE: Elaboración propia.

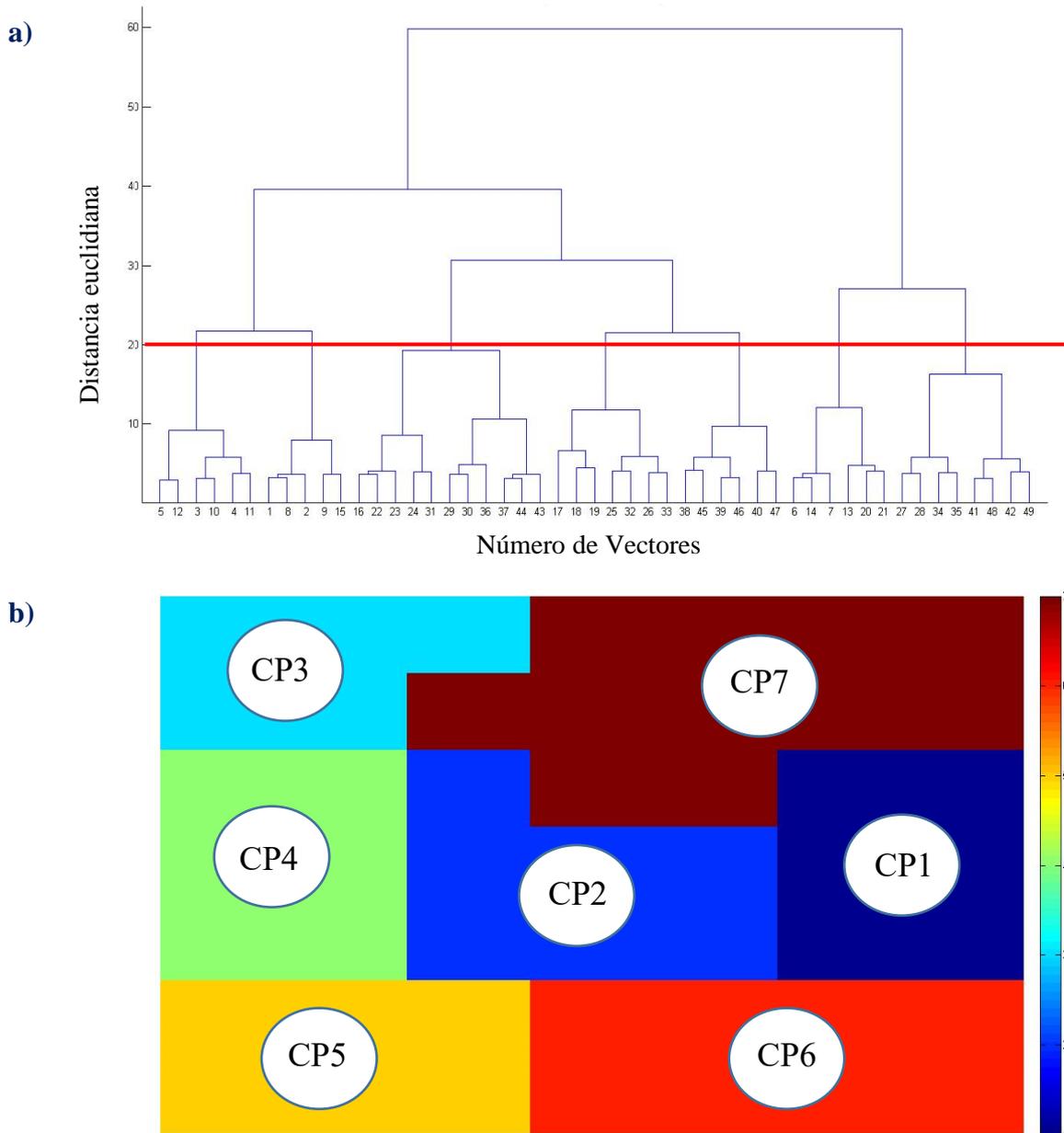


Figura 15: a) Dendrograma de la clasificación ascendente jerárquica, sobre la línea roja se indica el número de grupos seleccionados. b) Clasificación en 7 patrones de circulación o CPs en el mapa bidimensional.

FUENTE: Elaboración propia.

La Figura 16 muestra los patrones de vientos a 200 hPa asociados a la circulación atmosférica representada como un promedio de los días que conforman los grupos de vectores referentes con características similares.

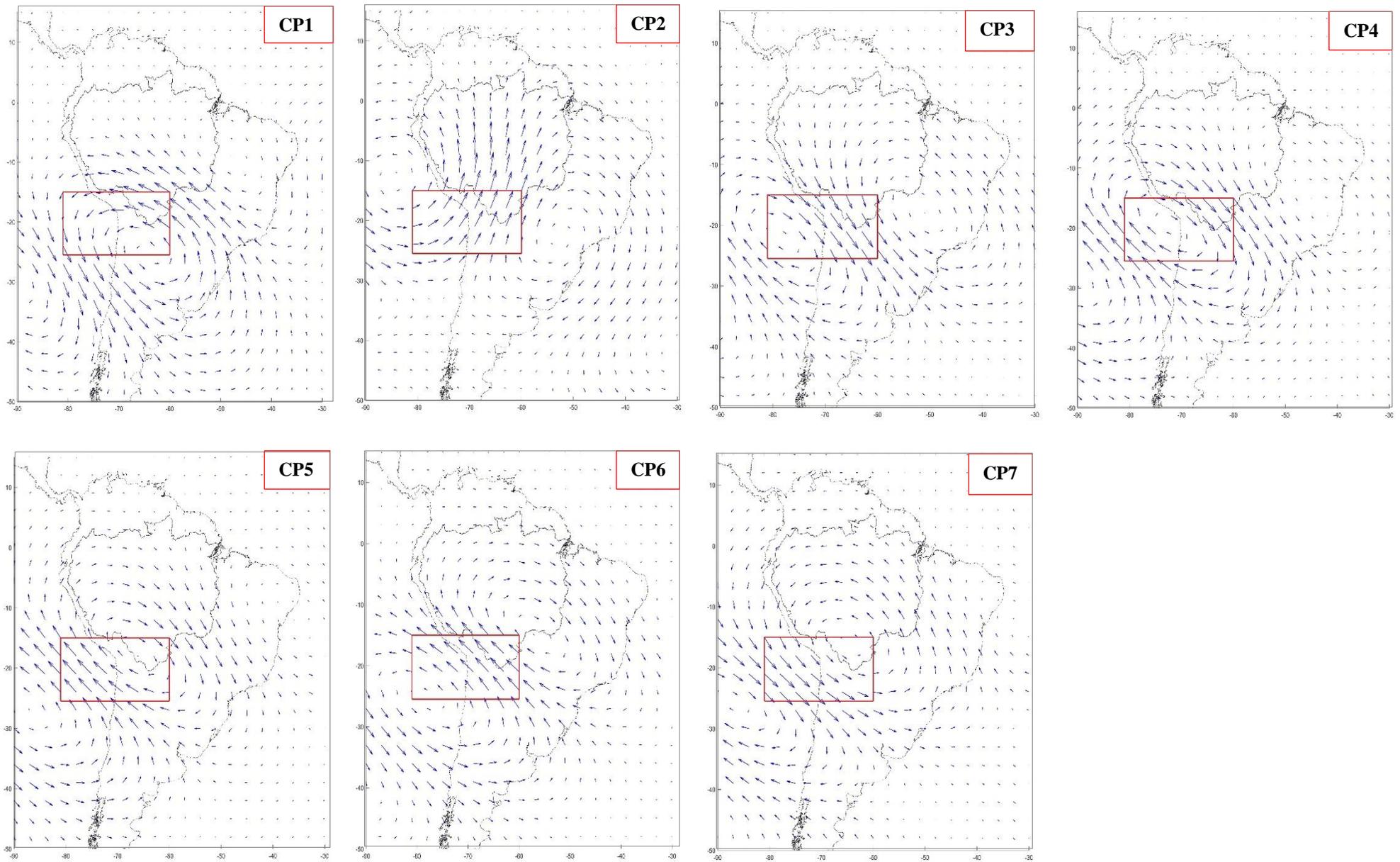


Figura 16: Determinación de los patrones de vientos horizontales a 200 h en JJA.

FUENTE: Elaboración propia

4.1.4. Primavera – SON

En la cuarta agrupación, usando cartas auto - organizadas se clasificaron para primavera (SON) un total de 3458 días que se agruparon en 8 patrones de circulación representados mediante una neurona en el mapa bidimensional SOM con dimensiones de 7 x 7 asociadas a dos componentes de las variables, la posición en el espacio bidimensional de SOM y el vector referente. La Figura 17 muestra 8 patrones de circulación atmosférica determinados que resumen el comportamiento característico de la estación de invierno mediante el dendograma de la clasificación ascendente jerárquica para seleccionar el número de patrones basado en la variabilidad que existe entre los grupos, formando así grupos característicos.

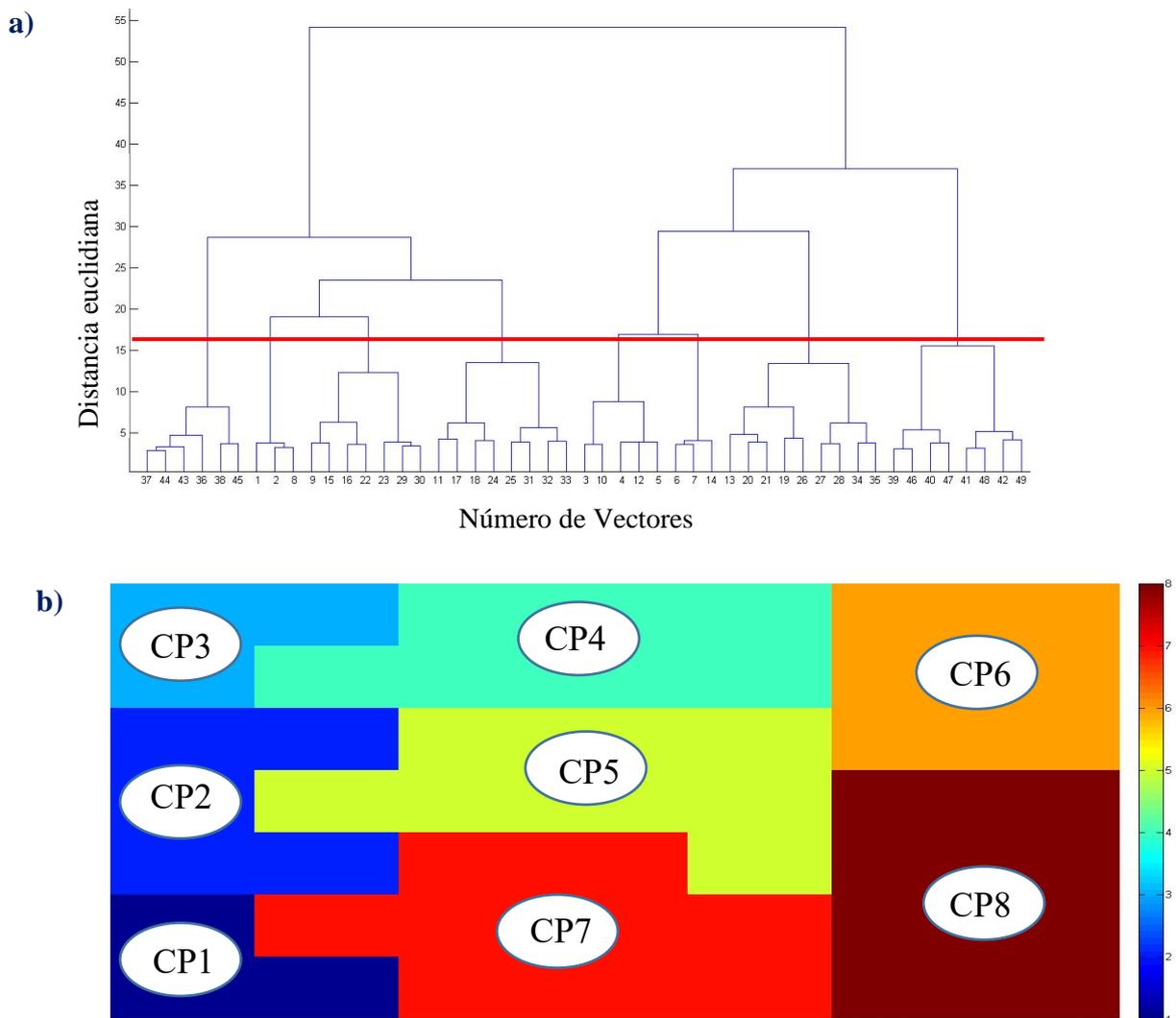


Figura 17: a) Dendograma de la clasificación ascendente jerárquica, sobre la línea roja se indica el número de grupos seleccionados. b) Clasificación en 8 patrones de circulación o CPs en el mapa bidimensional.

FUENTE: Elaboración propia.

La clasificación ascendente jerárquica descrita anteriormente selecciona los patrones característicos basados en mayor similitud que existe entre los CPs más cercanos en el espacio.

La Figura 18 muestra los patrones de vientos a 200 hPa asociados a la circulación atmosférica que se representa como un promedio de los días que conforman los grupos de vectores referentes con características similares. El recuadro de color rojo mostrado en cada patrón representa el área donde se determinaron los patrones de circulación.

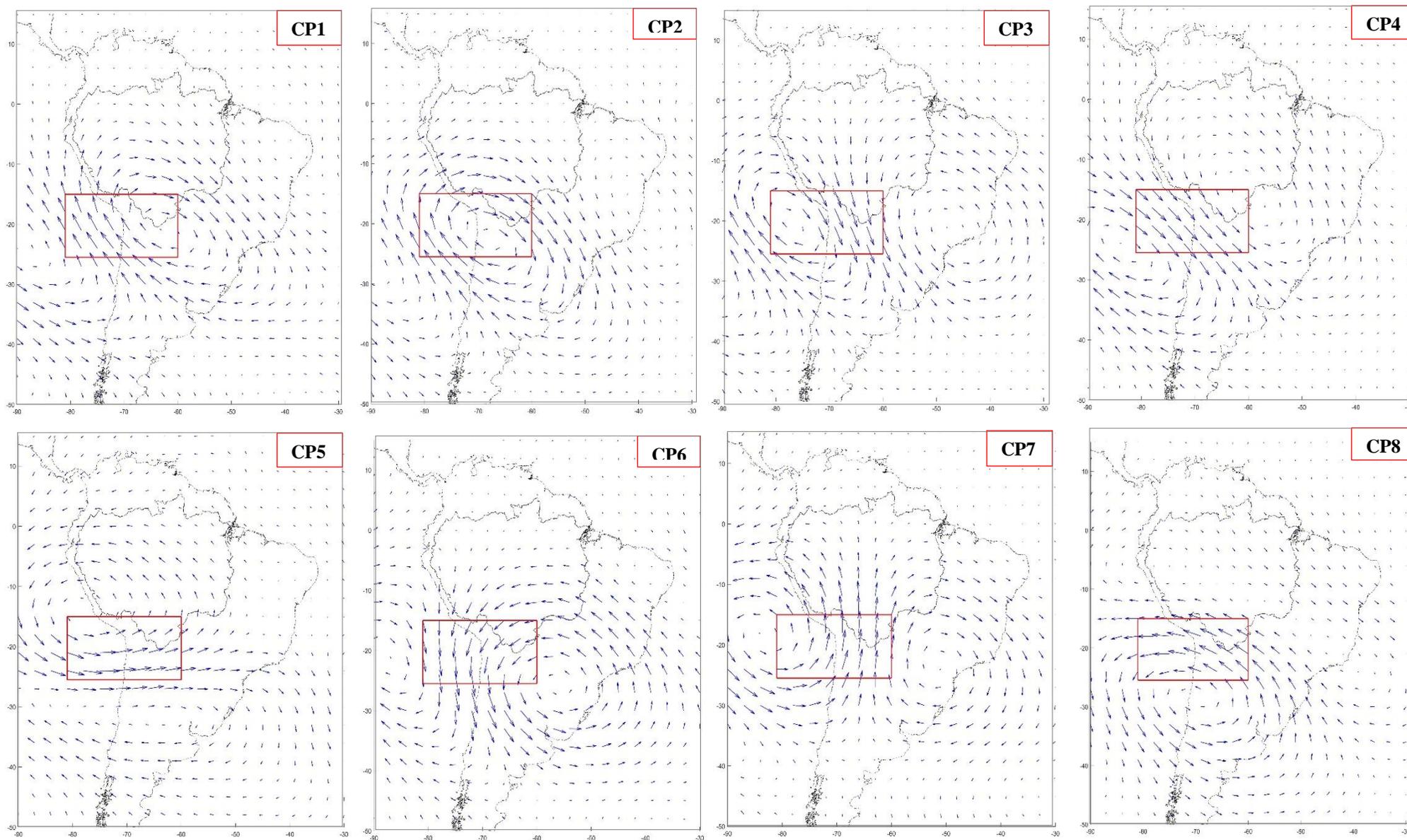


Figura 18: Determinación de los patrones de vientos horizontales a 200 hPa en SON.

FUENTE: Elaboración propia.

4.2. Identificación de los patrones de circulación atmosféricos asociados a la variabilidad estacional

Basados en las clasificaciones realizadas en líneas anteriores, a continuación, se presenta la circulación atmosférica asociadas a la presencia de posibles sistemas convectivos en el área de interés.

4.2.1. Verano - DEF

En la Figura 19 se observa la anomalía de vientos estandarizados a 200 hPa y OLR en colores sólidos. Las anomalías estandarizadas de OLR son utilizados como posibles sistemas convectivos asociados a la presencia de precipitación, esta imagen es una composición de los patrones de circulación denominada carta de circulación, para esta estación se reconocen 6 patrones característicos. Se observa actividad convectiva en gran parte de la CA y la cuenca de La Plata, los vientos provenientes del oeste se van intensificando, desplazando el núcleo convectivo al noreste de Brasil y parte del norte del Perú (CP2) mientras que un sistema de baja presión en altos niveles que se posiciona en Argentina muestra ausencia de lluvias (paleta de colores cálidos o rojos), estos sistemas se intensifican a lo largo de la margen de la cordillera de los Andes y el llano amazónico, en CP3 se observa una confluencia de vientos debido a los sistemas de alta y baja presión posicionados en el continente. La velocidad de los vientos se incrementa sobre el altiplano boliviano y se observan anomalías negativas de OLR (CP4) estos núcleos convectivos muestran días con precipitación en toda la zona de interés, progresivamente estas condiciones van cambiando sobre el continente (CP 5). Se observa una mayor influencia de vientos de oeste, donde los valores de anomalías estandarizadas de ORL se incrementan, estos vientos se debilitan y el CP6 muestra vientos del este sobre el continente y un sistema de baja presión sobre el área de interés.

La presencia de la Alta de Bolivia favorece a las precipitaciones en el altiplano y parte de la Amazonía Boliviana, como se observa en la carta mostrada en la Figura 20, el CP3 y CP4 muestran sobre el continente un sistema de alta presión posicionada en el área de Argentina. El CP5 muestra una onda atmosférica propagándose en el continente para en días posteriores se posicione un núcleo de baja presión en continente favoreciendo la ausencia de precipitaciones, como muestra el CP6. Lo observado en la Figura 14 se complementa con

el análisis de la Figura 21 donde se observa el comportamiento de la anomalía estandarizada de vientos y altura geopotencial a 850 hPa, estos niveles de presión se complementan por la dinámica vertical de los vientos, transportando masas de aire debido a la convergencia y divergencia de vientos, sumado a la barrera orográfica natural que es la cordillera de los Andes, facilitan el transporte de masas de aire de latitudes subtropicales a latitudes tropicales (Garreaud, 2000; Seluchi y Marengo, 2000). Algunos de estos días muestran características para los patrones húmedos como bajas cálidas, el patrón CP3 presenta circulación anticiclónica en niveles superiores y circulación ciclónica en bajos niveles y presenta un núcleo cálido relacionado al sistema convectivo que tiende a tener característica troposférica (altos niveles).

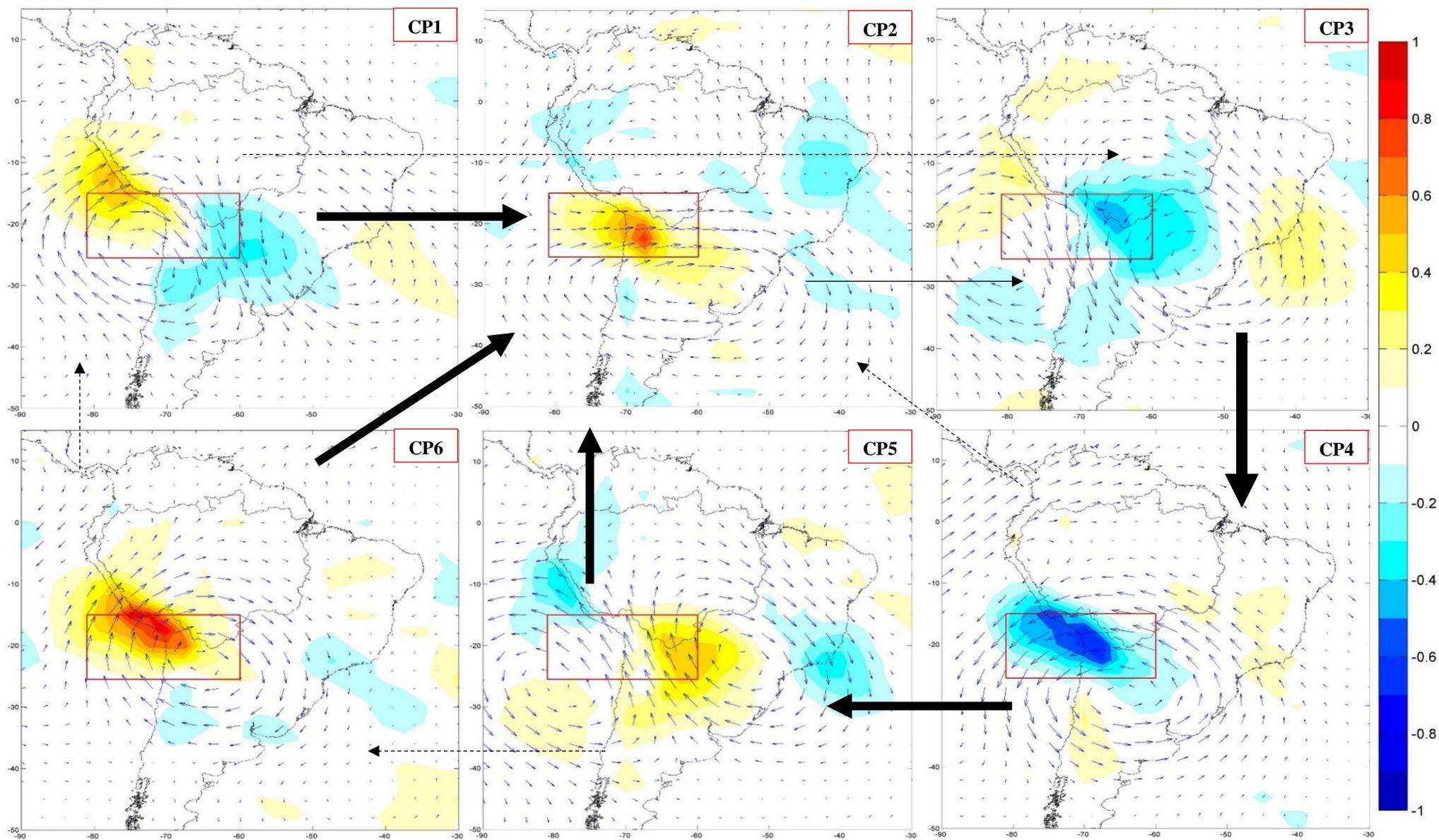


Figura 19: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia.

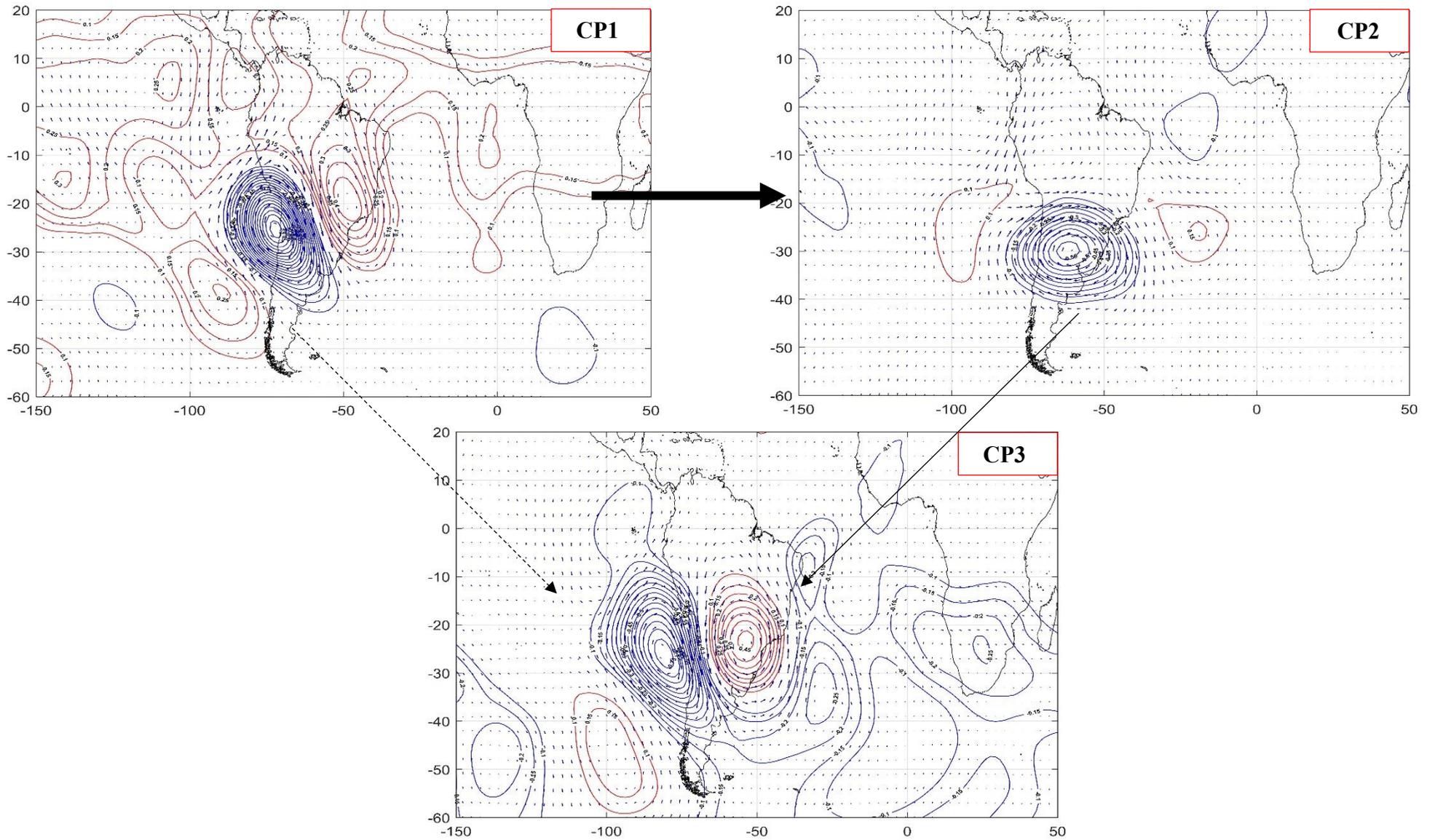


Figura 20: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno. (Continuación)
 FUENTE: Elaboración propia.

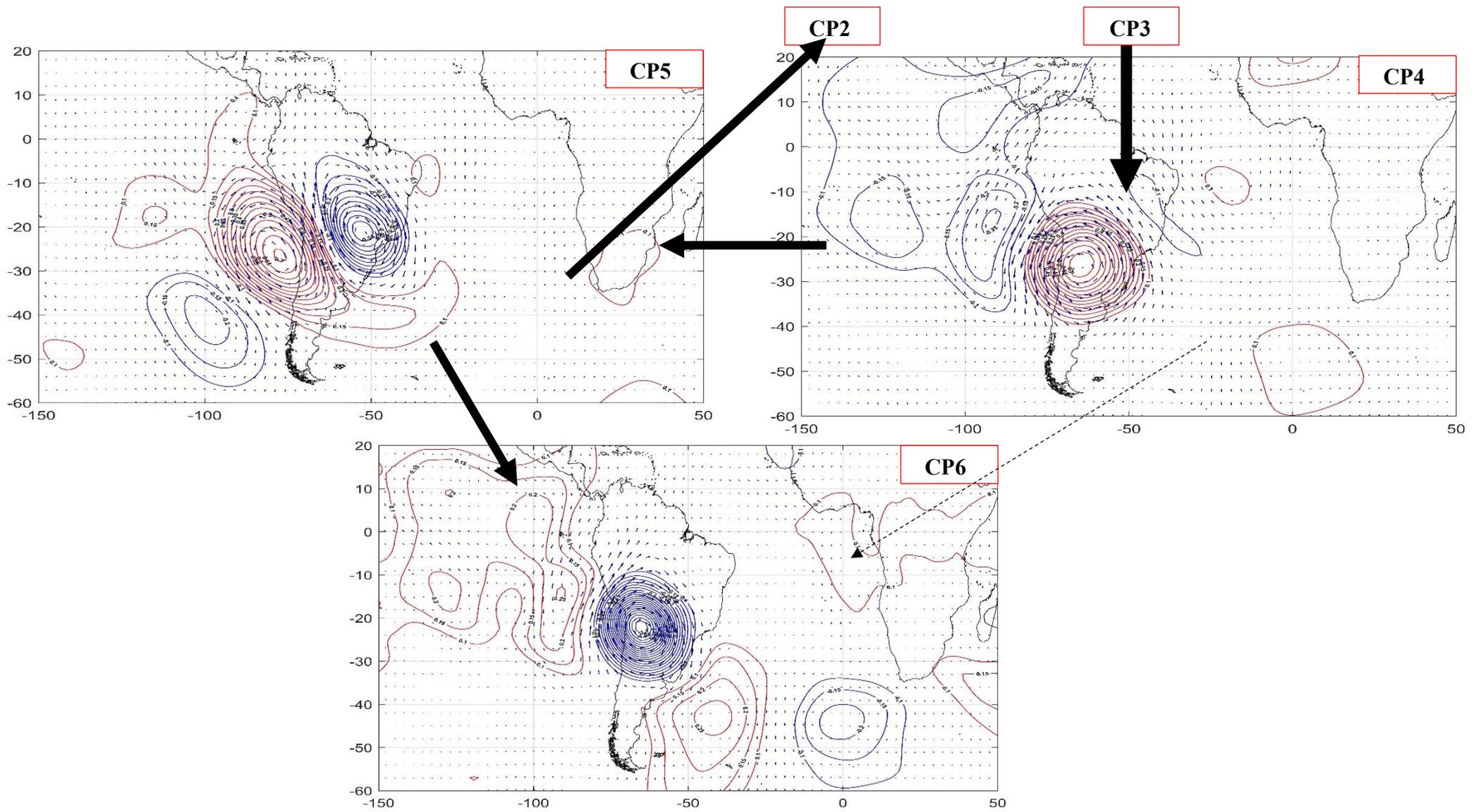


Figura 20: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.
 FUENTE: Elaboración propia.

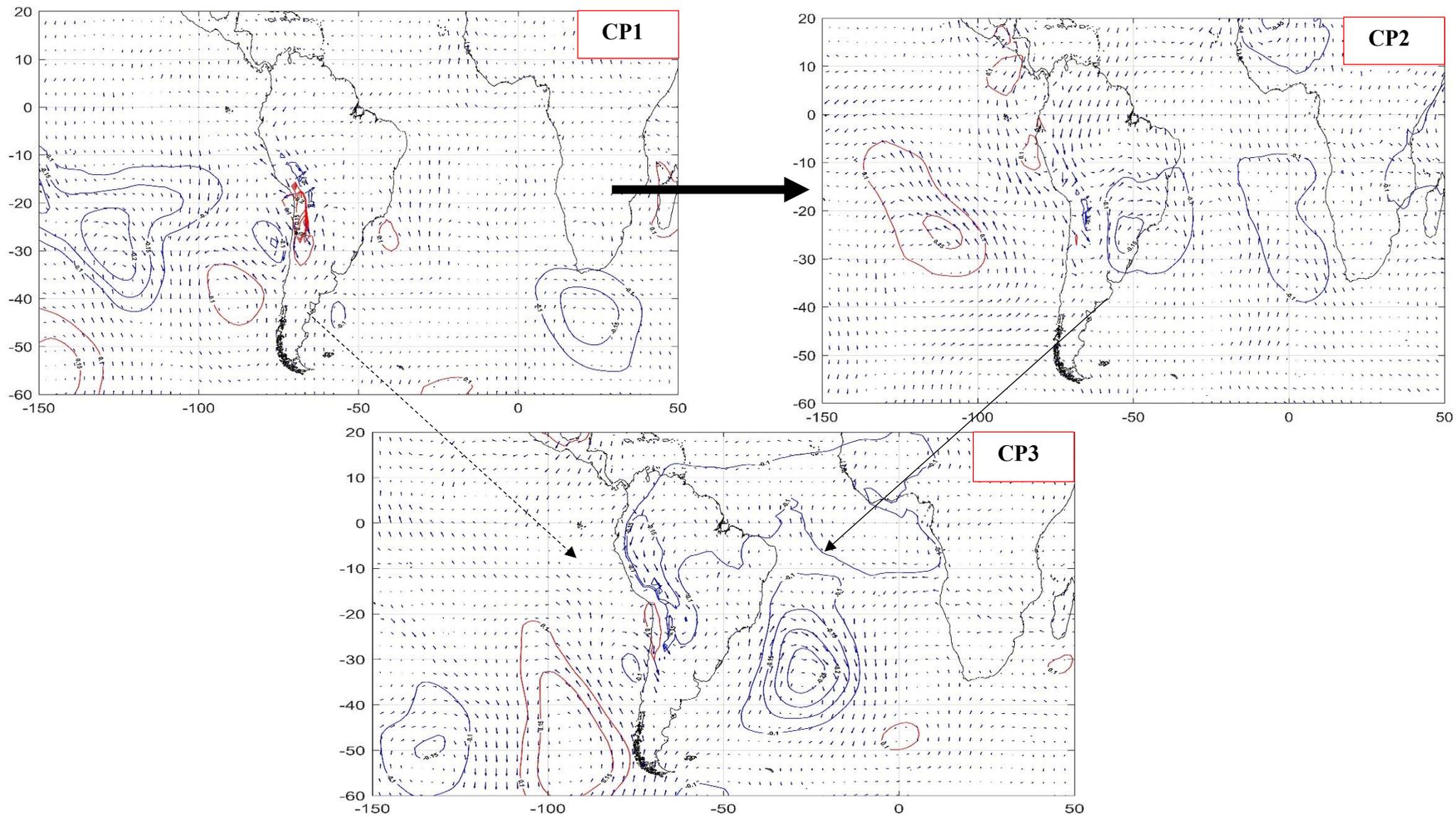


Figura 21: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno. (Continuación)

FUENTE: Elaboración propia.

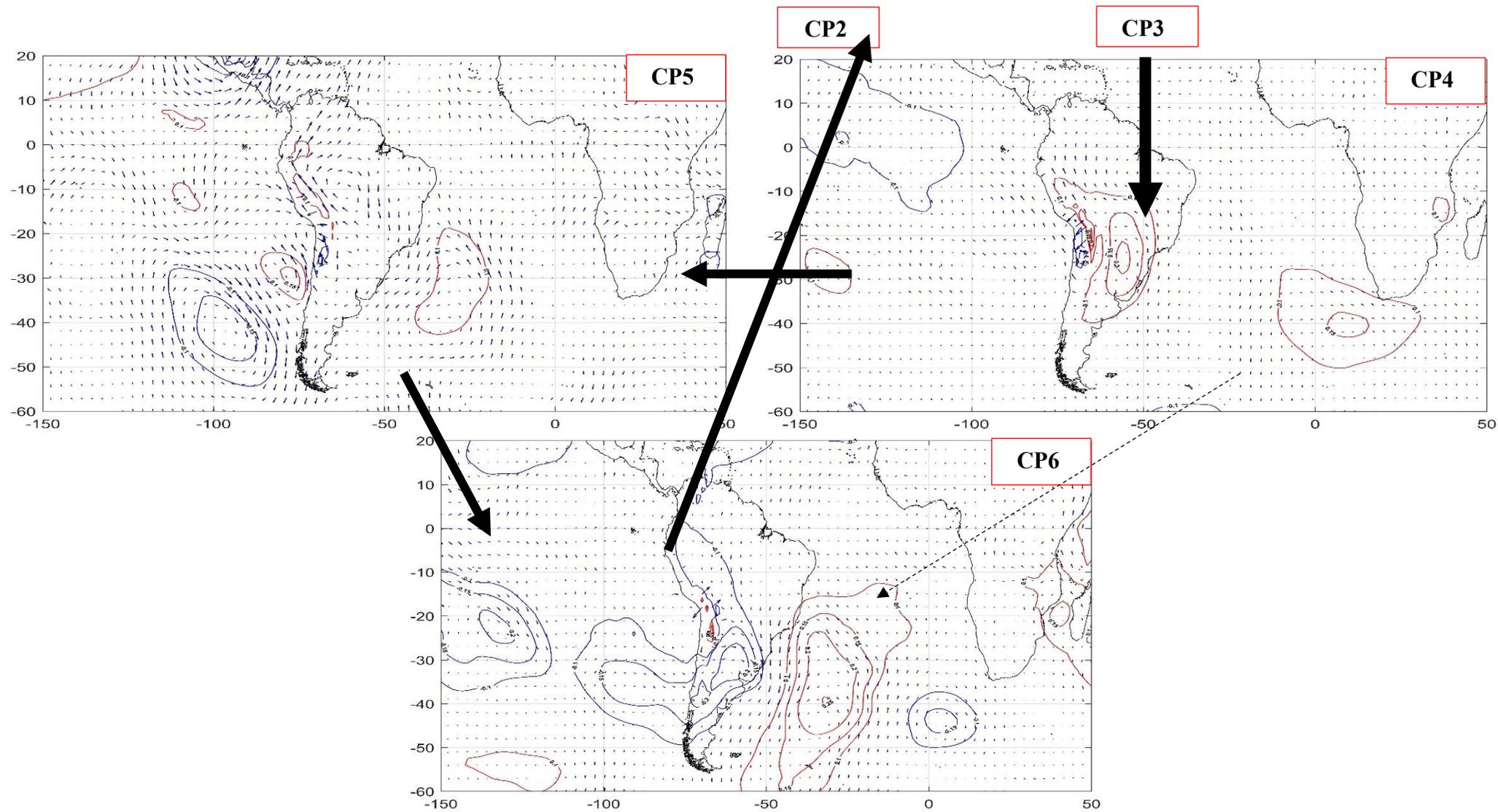


Figura 21: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.
 FUENTE: Elaboración propia.

4.2.2. Otoño – MAM

En la Figura 22 se observa la anomalía de vientos estandarizados y OLR. Las anomalías estandarizadas de OLR muestra una actividad convectiva en gran parte de la CA (noroeste y sureste) y Argentina, los vientos provenientes del sureste se van intensificando en la región del altiplano, desplazando el núcleo convectivo para luego debilitarse e intensificar las precipitaciones al oeste de la CA y altiplano (ver CP2 y CP3). En CP4 se observa un comportamiento del sistema de baja presión en altos niveles que muestra lluvias en la zona de interés, estos sistemas se intensifican a lo largo de la margen del altiplano, la velocidad de los vientos se incrementa y sobre el altiplano boliviano en el área de interés se observa anomalías positivas de OLR (CP5), progresivamente estas condiciones van cambiando sobre América del Sur, donde el sistema de baja presión se posiciona desplazando el núcleo convectivo (CP6) e intensificando los vientos del sureste en la margen de los Andes, donde los valores de anomalía estandarizada de ORL aumentan, presentándose días con buen clima al ser despejados. Estos vientos se intensifican en todo el altiplano (Andes y llano amazónico) y en CP7 se observan vientos de sureste sobre el continente y un sistema de alta presión.

La Figura 23 muestra la propagación del tren de ondas desplazándose a 200 hPa e intensificándose progresivamente, el CP3 marca los días más lluviosos de la estación es característico con una onda muy intensa en dirección noreste, dando lugar a un sistema de baja presión ingresando al continente donde el núcleo está en las costas de Chile, que se fortalece con el paso de los días (CP4). Nuevamente se observa el desplazamiento de una onda en continente, este sistema cuña - vaguada muestra el buen tiempo y el mal tiempo, es decir, zonas con lluvias y zonas con clima despejado como lo sustenta el CP5, a causa de los movimientos verticales que hace que el contenido de vapor de agua existente en capas bajas de la atmósfera al ser obligado a ascender se enfría y se condensa formando abundante nubosidad que posiblemente generará precipitaciones. Con el paso de los días, esta onda que va intensificándose entre el patrón CP6 y CP7 donde se observa el progresivo debilitamiento del sistema de baja de presión y el desarrollo de un sistema de alta presión en el continente.

Según los mostrado en la Figura 24, considerando valores de anomalías de vientos a 850 hPa, sustenta el sistema acoplado en altos y bajos niveles. Se observa una onda de bajos

niveles propagándose hacia el noroeste sobre el continente, llevando la energía necesaria para el acoplamiento en altos niveles como muestra el CP3, esta onda que es más predominante en gran parte del hemisferio sur.

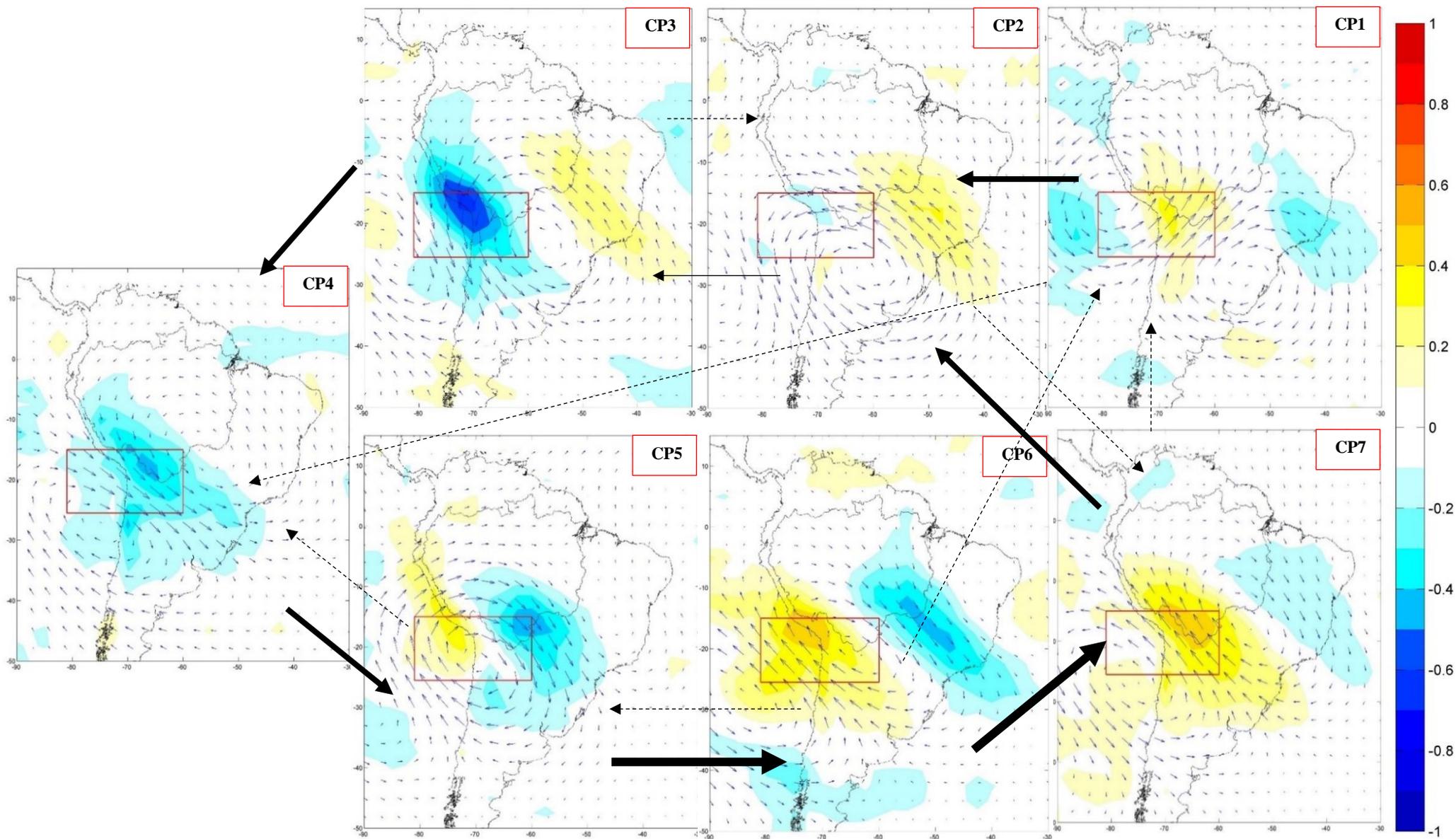


Figura 22: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia.

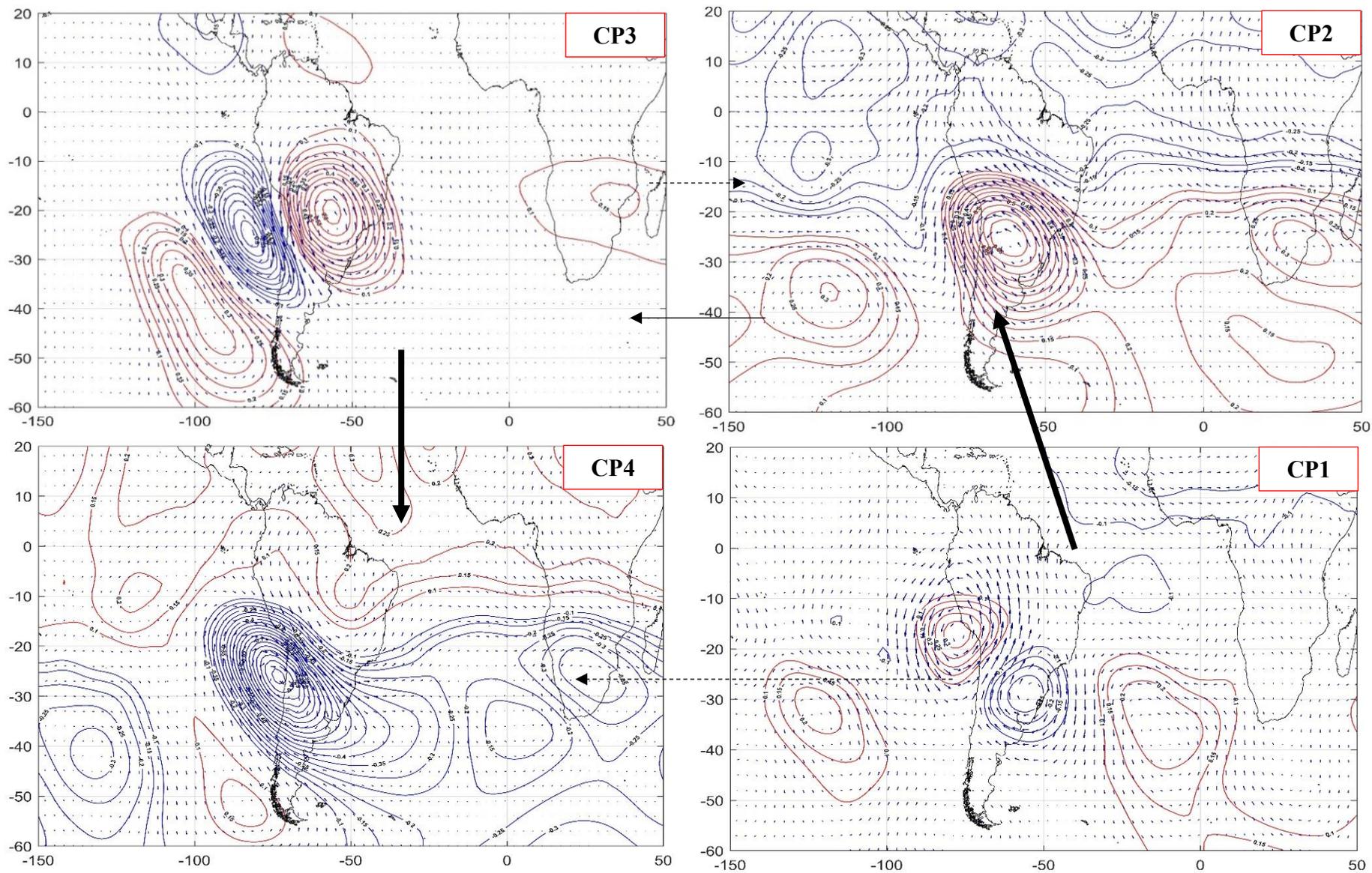


Figura 23: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno. (Continuación).
 FUENTE: Elaboración propia.

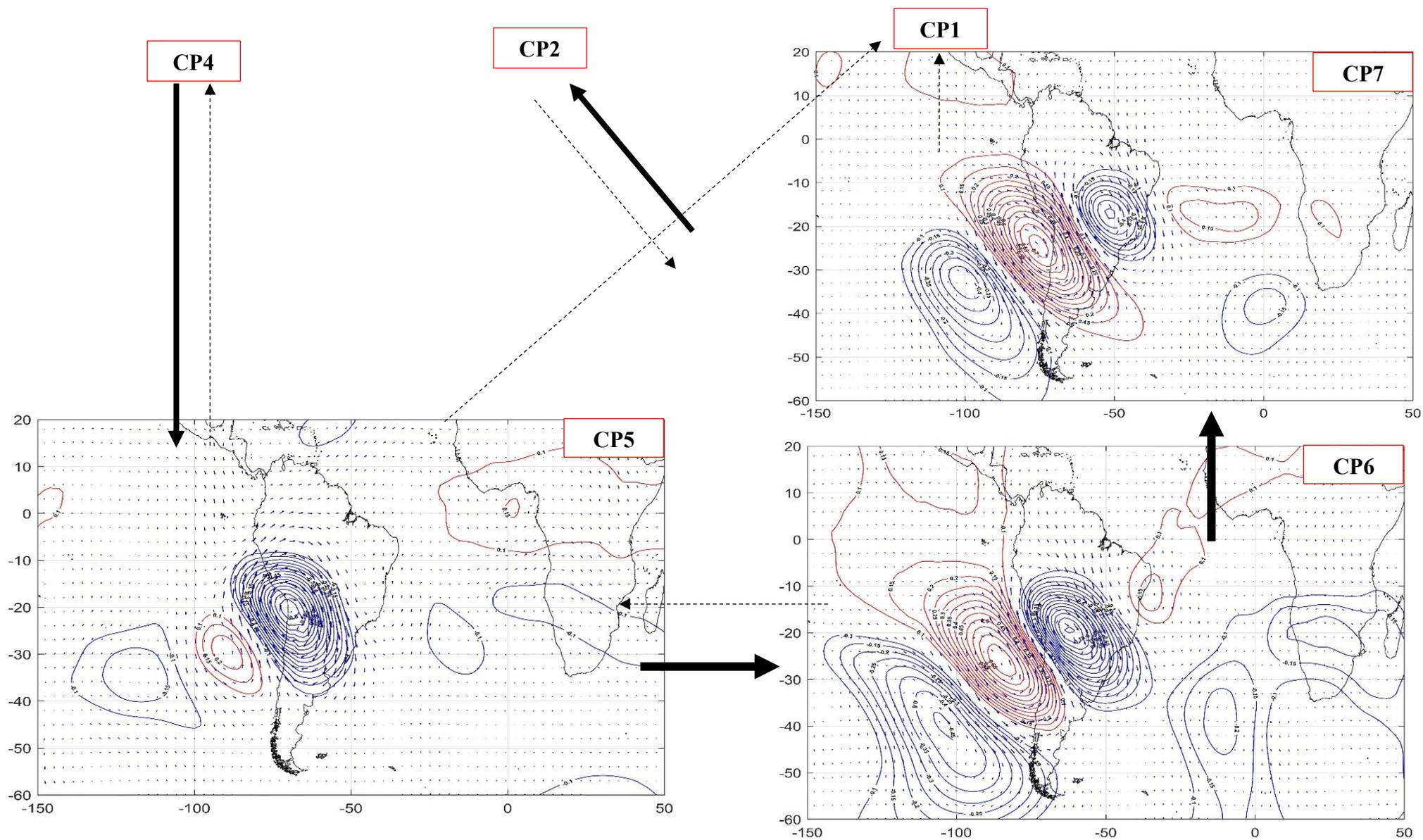


Figura 23: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.

FUENTE: Elaboración propia.

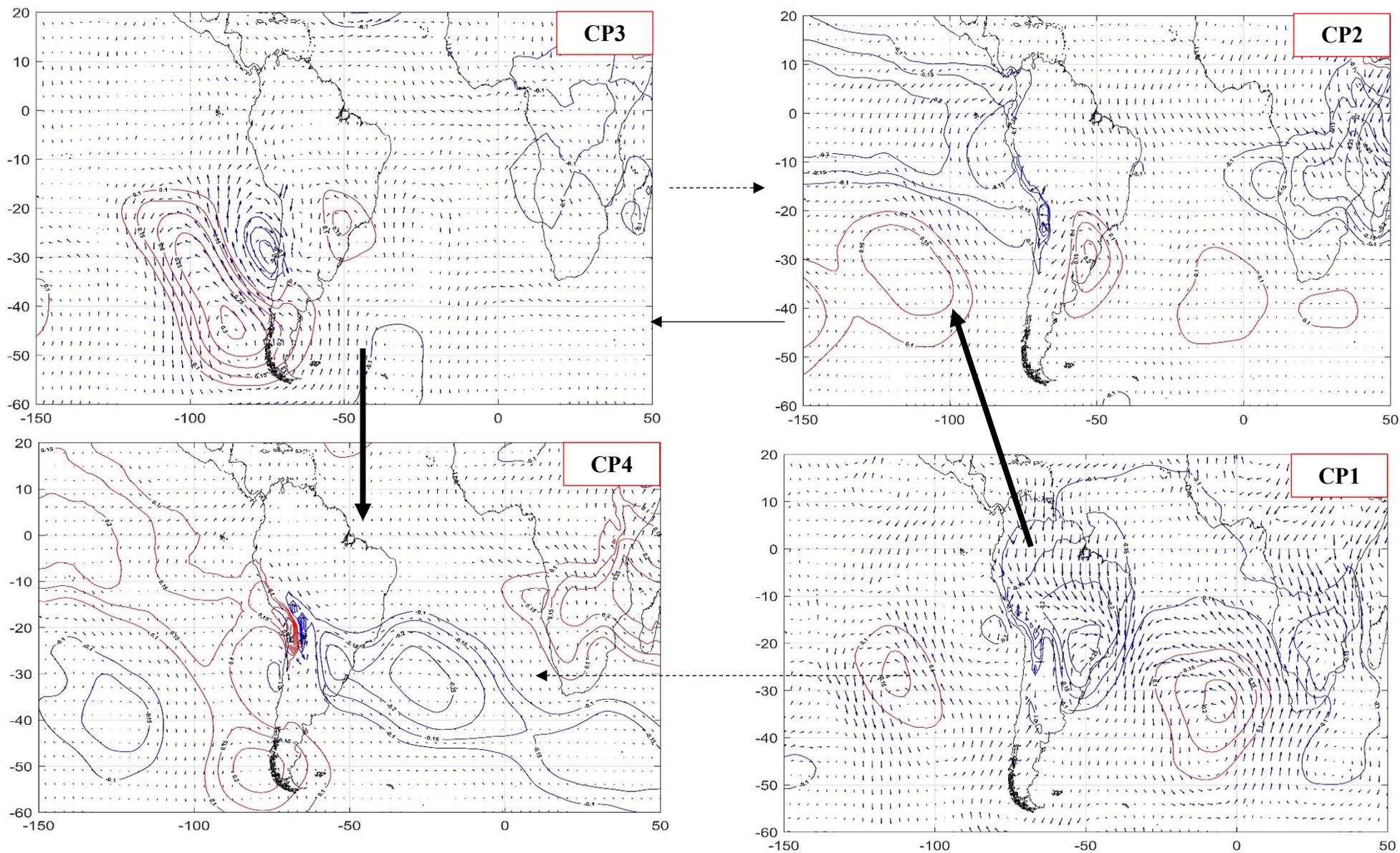


Figura 24: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno. (Continuación)
 FUENTE: Elaboración propia.

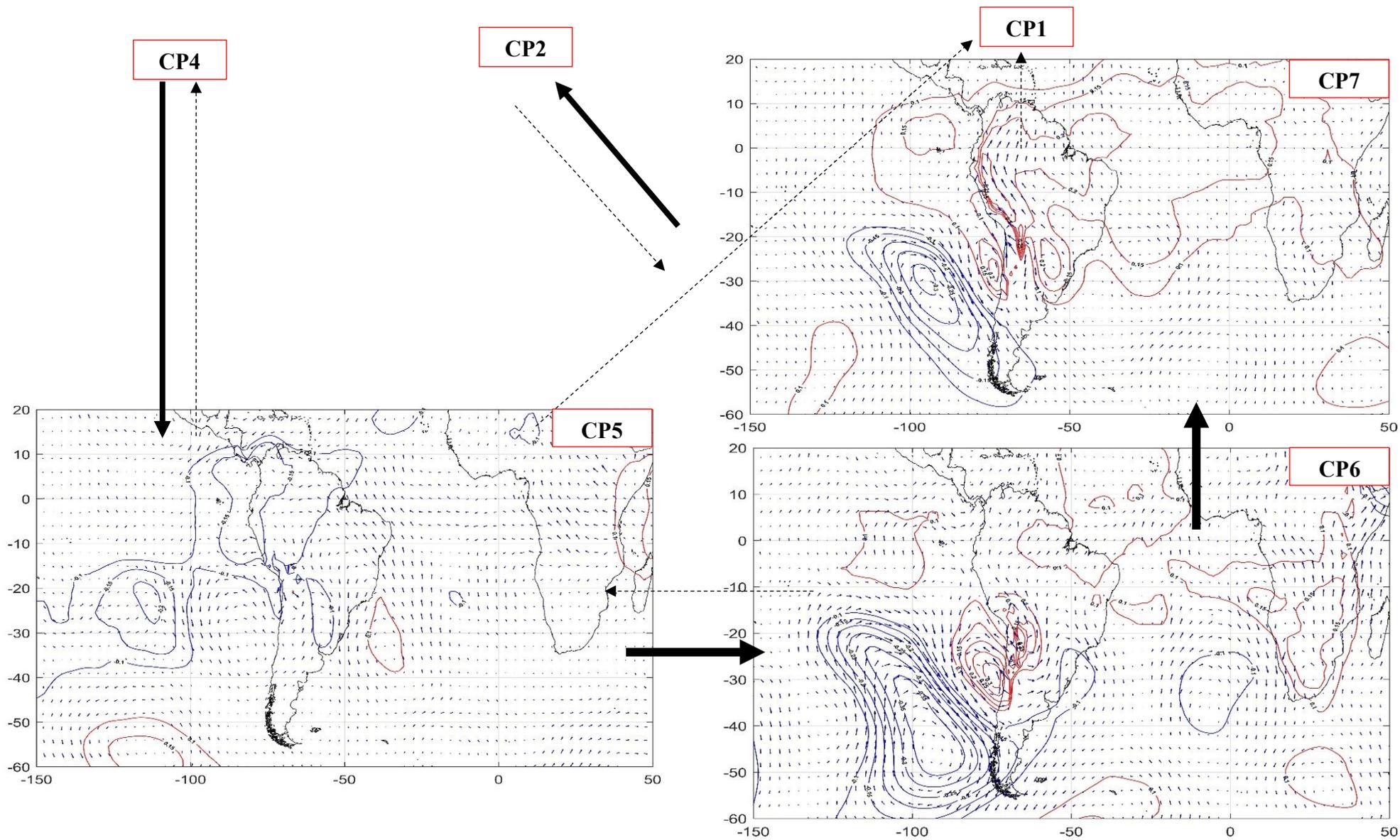


Figura 23: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.3. Invierno – JJA

En la Figura 25 se observa la anomalía de vientos estandarizados y OLR. Las anomalías estandarizadas de OLR muestran actividad convectiva en el centro y sureste en la cuenca Amazónica, altiplano peruano - boliviano y Argentina, el noreste de Brasil muestra en todos los patrones días secos debido a la predominancia de vientos del noreste.

El CP1 se muestra un núcleo de anomalías positiva de OLR con vientos del sureste, este tipo de circulación propicia el desplazamiento de flujos de humedad hacia continente ingresando por la costa y posicionándose en el Altiplano y llano amazónico (ver CP2 y CP3). El CP4 y CP5 se observa un comportamiento del sistema de baja presión en altos niveles que muestra cómo el núcleo convectivo se debilita y se propaga hacia la cuenca de La Plata, estos sistemas de baja presión con vientos circulando ciclónicamente, progresivamente estas condiciones van cambiando sobre el continente que propician el ingreso de flujos de vientos secos que se intensifican posicionando núcleos secos en el área de interés (CP6 y CP7), los valores de anomalía estandarizada de ORL aumentan. Estos vientos se intensifican en todo el altiplano. La precipitación se incrementa durante la formación de las bajas segregadas (Garreaud, 1999; Bishoff y Vargas, 2003). Estos sistemas fomentan el incremento en la gradiente zonal de presión que incrementa el flujo del norte proveniente de la Amazonía (Ferreira, 2004) e intensifica los vientos hacia el norte, entre Argentina, Bolivia y sureste de Brasil a causa del viento polar (Godoy *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 1997), esto se visualiza en el jet de bajos niveles, como lo mostrado a 850 hPa.

La Figura 26 muestra la propagación del tren de ondas desplazándose a 200 hPa e intensificándose progresivamente, marcando patrones que muestran patrones de sequías y precipitaciones intensas (Wheeler *et al.*, 2000). Los patrones asociados a núcleos convectivos muestran el posicionamiento de un sistema de baja presión en continente, mientras que los patrones que muestran anomalías positivas de OLR, los sistemas de alta presión en los Andes y llano amazónico están asociados a días secos. El patrón CP7 muestra la onda de Rossby que se inestabiliza formando remolinos aislados, este bloque de aire frío queda segregado. Simultáneamente aparecen anticiclones o bloques de alta presión que quedan bloqueadas y asociadas a aire caliente. En síntesis, la rotura de la circulación de los vientos del oeste ocasiona cambios bruscos de tiempo en las respectivas latitudes (frío en las

zonas subtropicales y calor en las áreas polares). Comprendemos entonces que las ondas contribuyen al transporte de calor entre el ecuador terrestre y los polos. Esto se complementa con la Figura 27 que representa valores de altura geopotencial a 850 hPa.

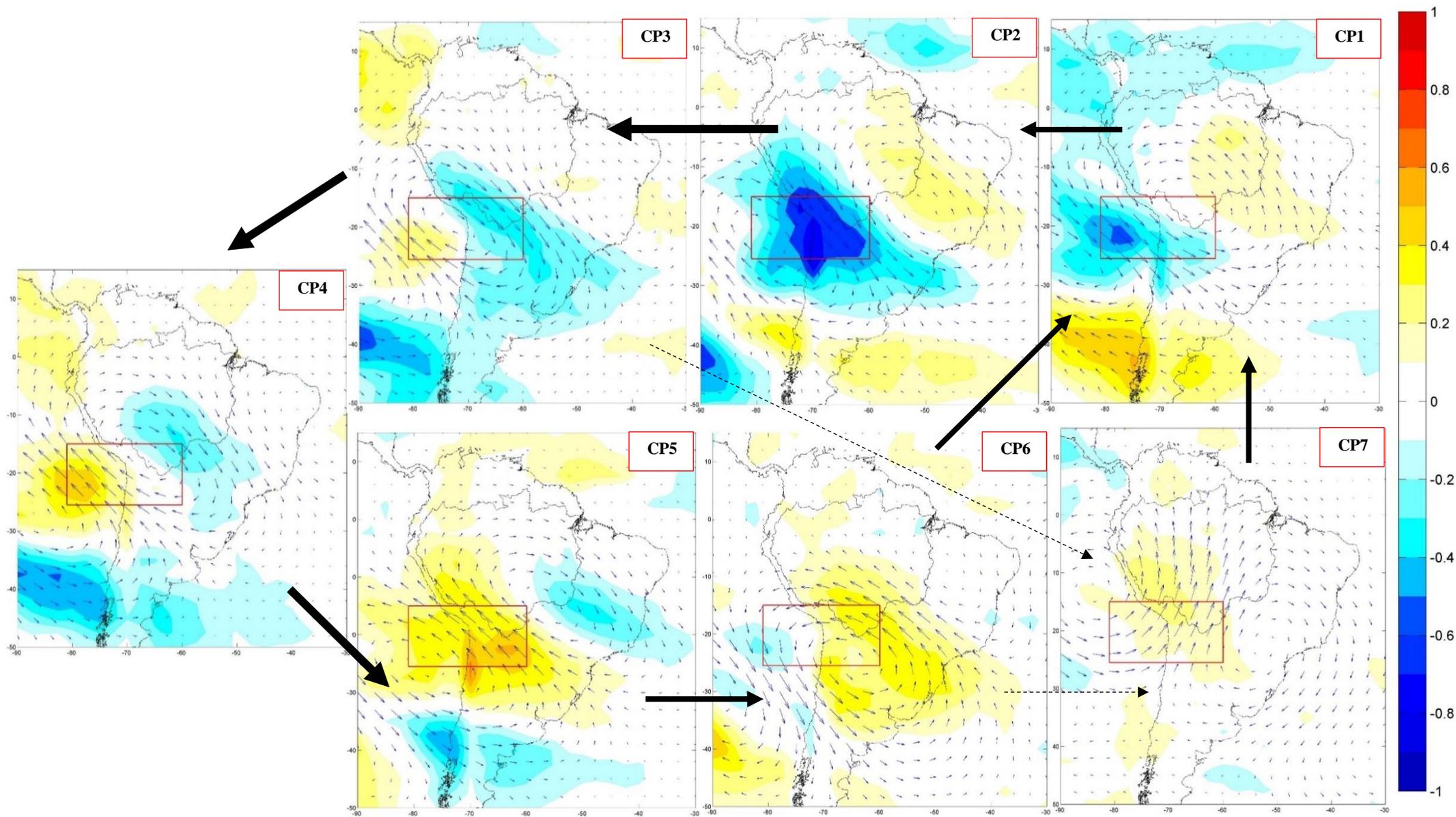


Figura 25: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia.

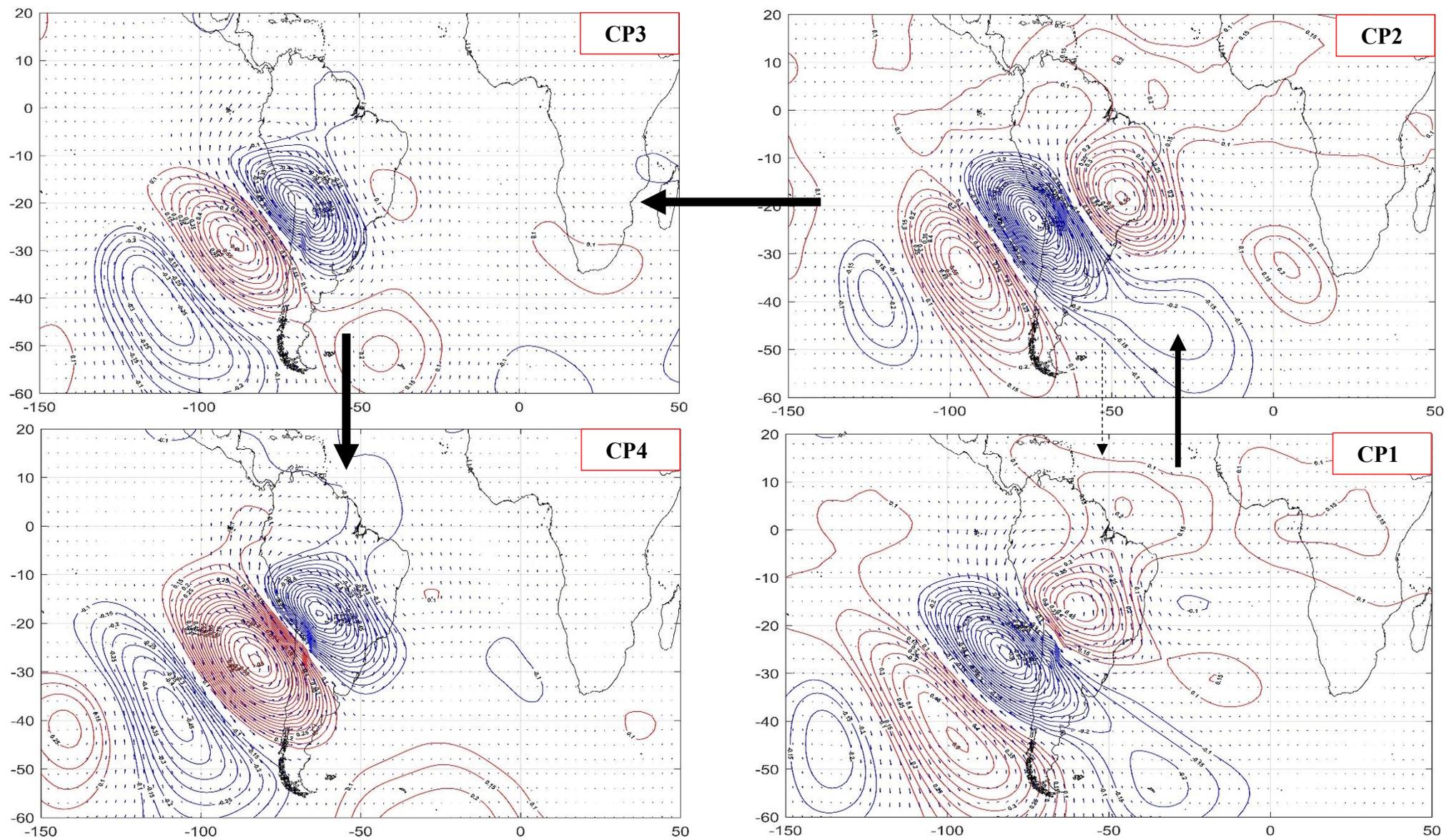


Figura 26: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno. (Continuación)
 FUENTE: Elaboración propia.

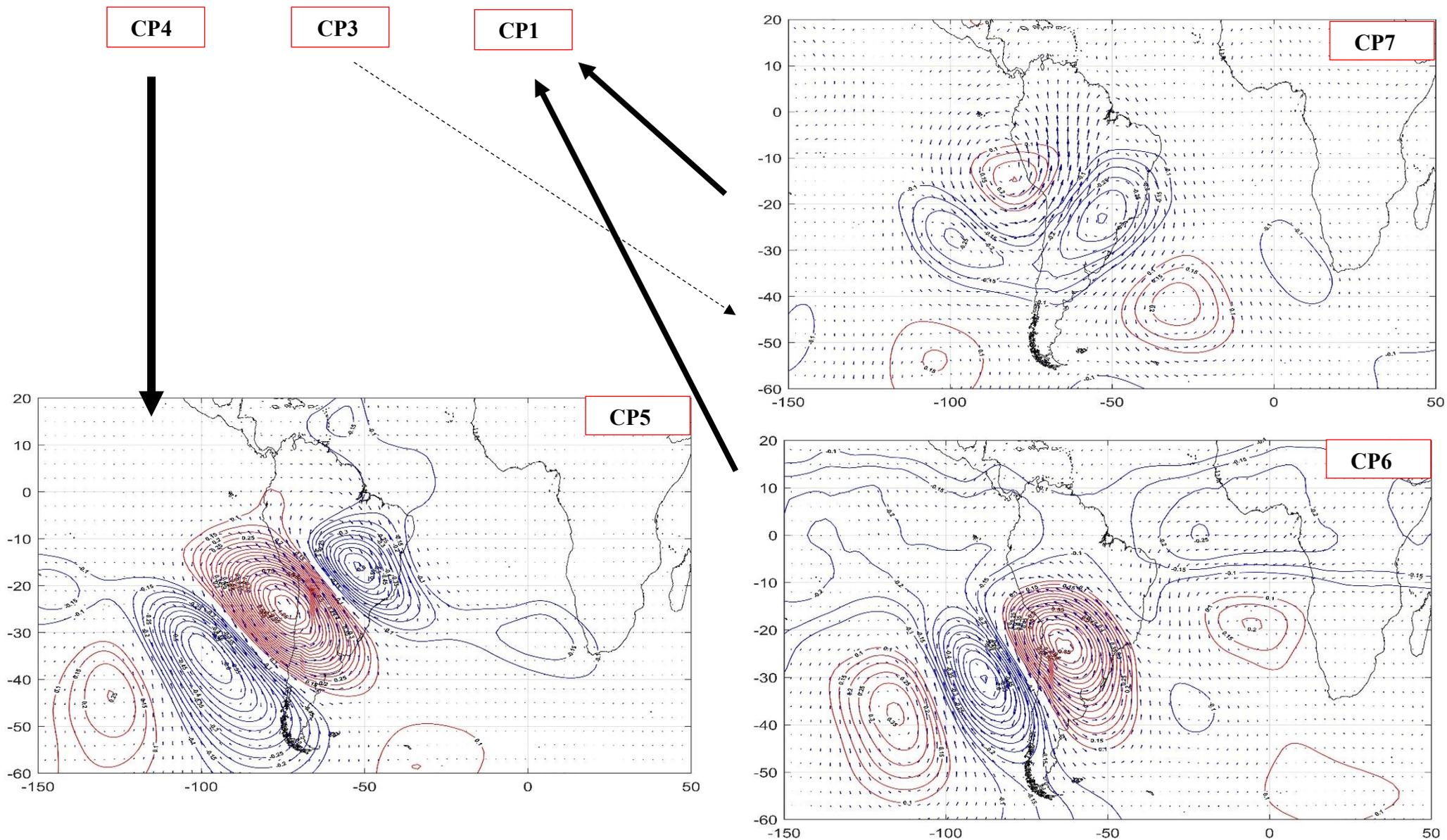


Figura 26: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.

FUENTE: Elaboración propia.

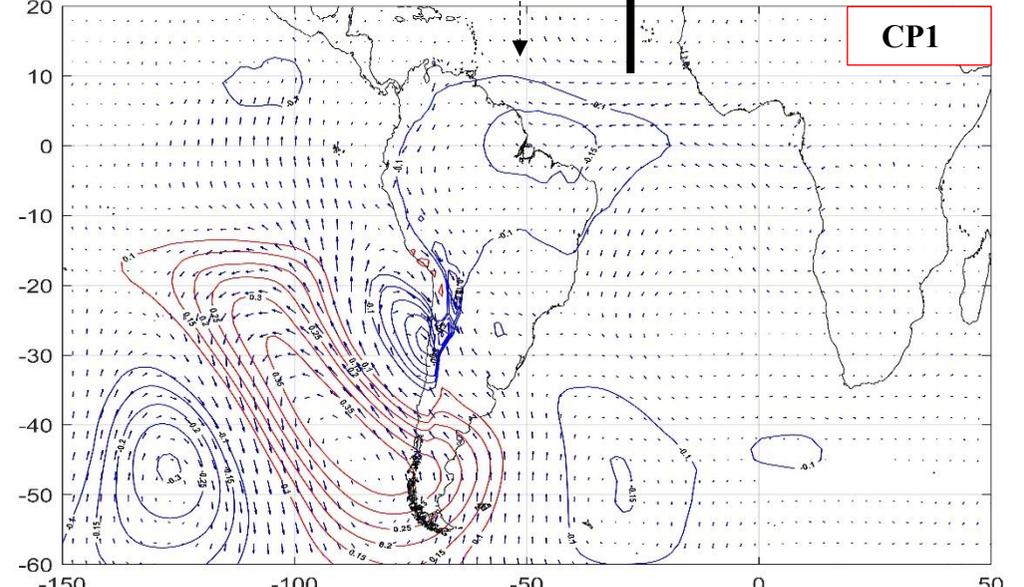
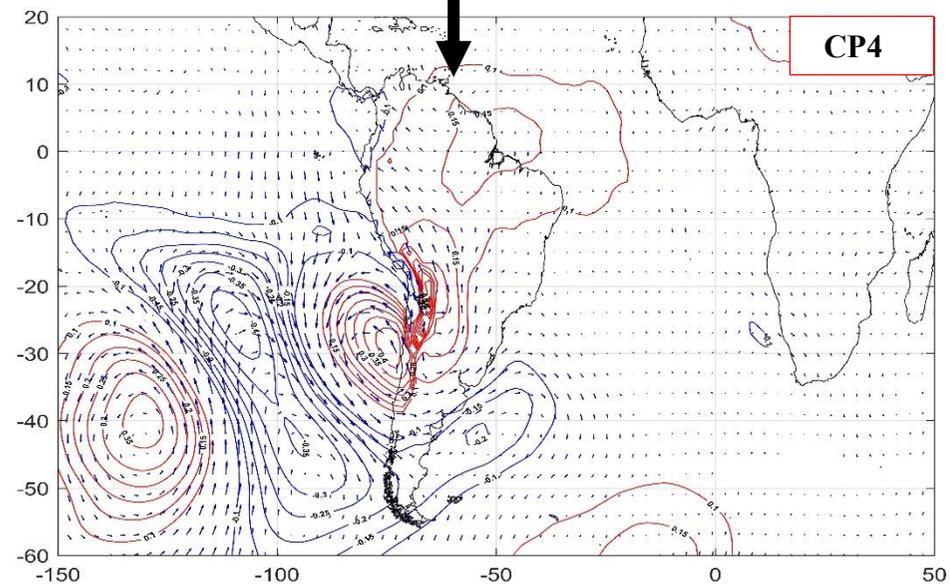
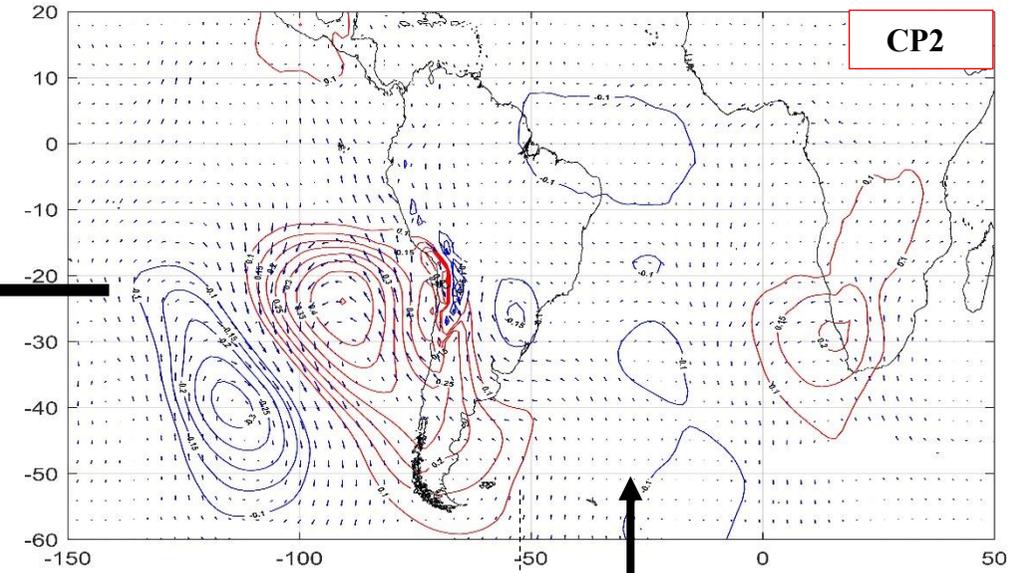
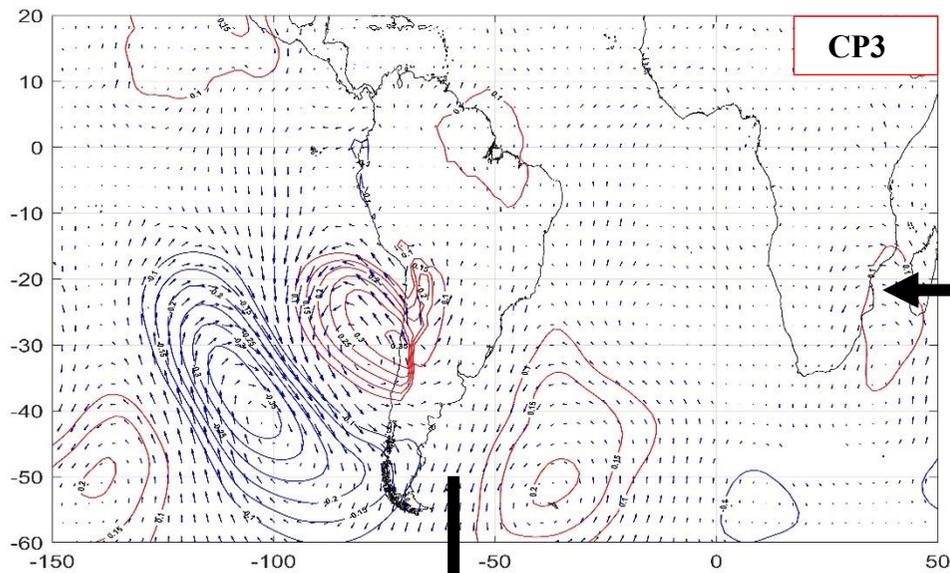


Figura 27: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno. (Continuación)
 FUENTE: Elaboración propia.

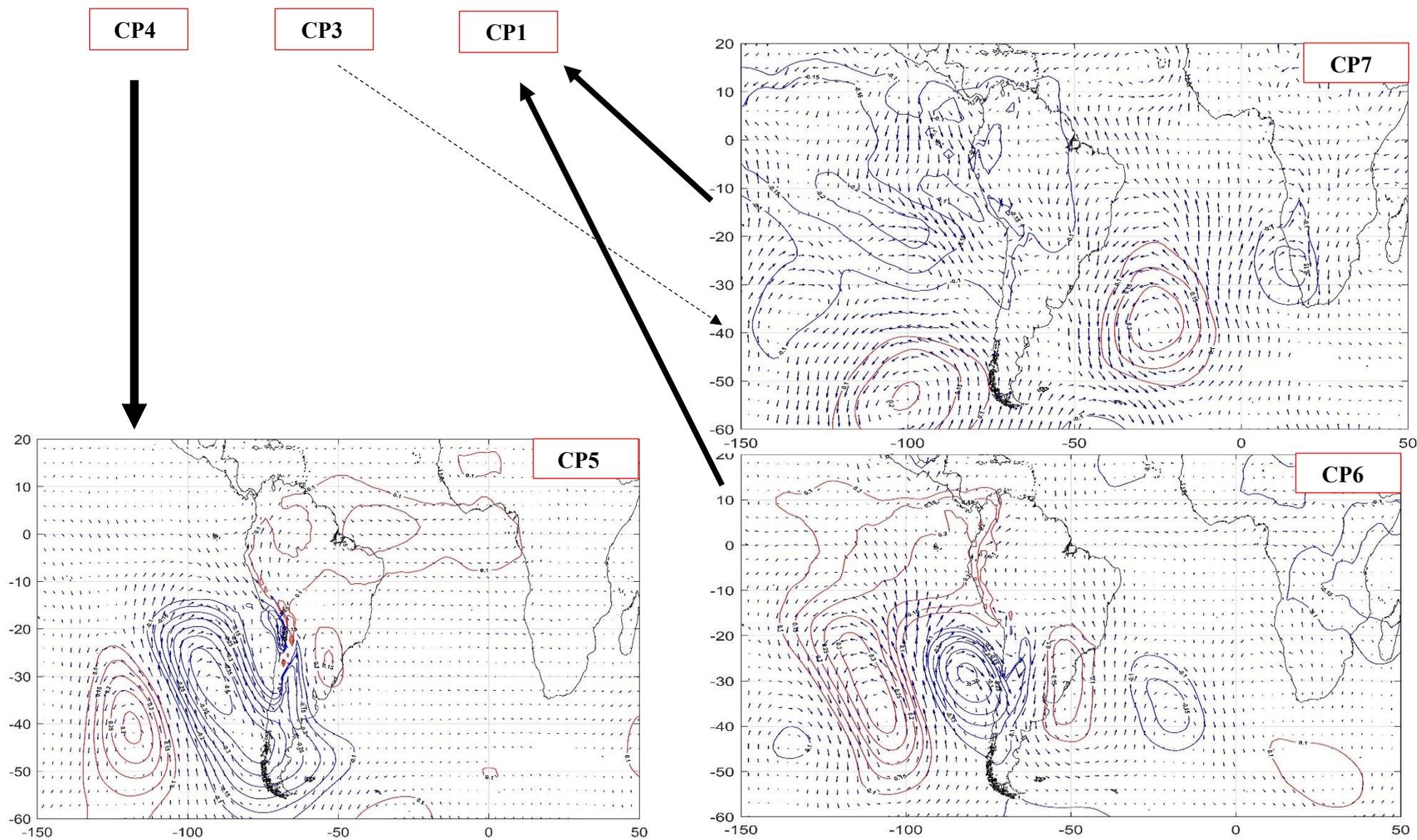


Figura 27: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.4. Primavera - SON

En la Figura 28 se observa la anomalía de vientos estandarizados y OLR. Las anomalías estandarizadas de OLR muestran poca actividad convectiva en el noreste y sureste en la cuenca amazónica y Argentina, estas condiciones van cambiando con el paso de los días y en la evolución del sistema. En CP1 se observa un núcleo de anomalías positiva de OLR con vientos del suroeste, el noreste de Brasil muestra actividad convectiva y el área de interés muestra anomalías positivas de OLR debido a la predominancia de circulación ciclónica de vientos; este sistema se debilita y desplaza el sistema de condiciones secas al llano de la cuenca Amazónica altiplánica y progresivamente se va intensificando, propiciando las condiciones húmedas necesarias para la precipitación en el altiplano y llano amazónico peruano boliviano (CP 8 y CP7). El CP6 y CP5 muestran un comportamiento del sistema de baja presión en la tropósfera que muestra cómo el núcleo convectivo se debilita y se dispersan debido a la confluencia de vientos dirigidos hacia el norte, mientras que el CP4 y CP3, nuevamente predominan las condiciones húmedas ya que los vientos se intensifican y confluyen en dirección opuesta para luego debilitarse debido a que en el sistema ciclónico se posiciona en continente (ver CP2) retornando progresivamente a las condiciones iniciales mostradas en el CP1 asociados a días despejados.

La Figura 29 muestra la propagación del tren de ondas desplazándose a 200 hPa e intensificándose progresivamente. Las cartas asociadas a núcleos convectivos muestran el posicionamiento de un sistema de baja presión en continente, mientras que los patrones que muestran anomalías positivas de OLR en la zona de interés también se observa sistemas de alta presión en los Andes y llano amazónicos asociados a días secos. La Figura 30 muestra la propagación de ondas en bajos niveles, estos sistemas acoplados de altas y bajas sobre el continente se intensifican y definen los patrones húmedos en esta estación para el altiplano y llano amazónico en el área de interés.

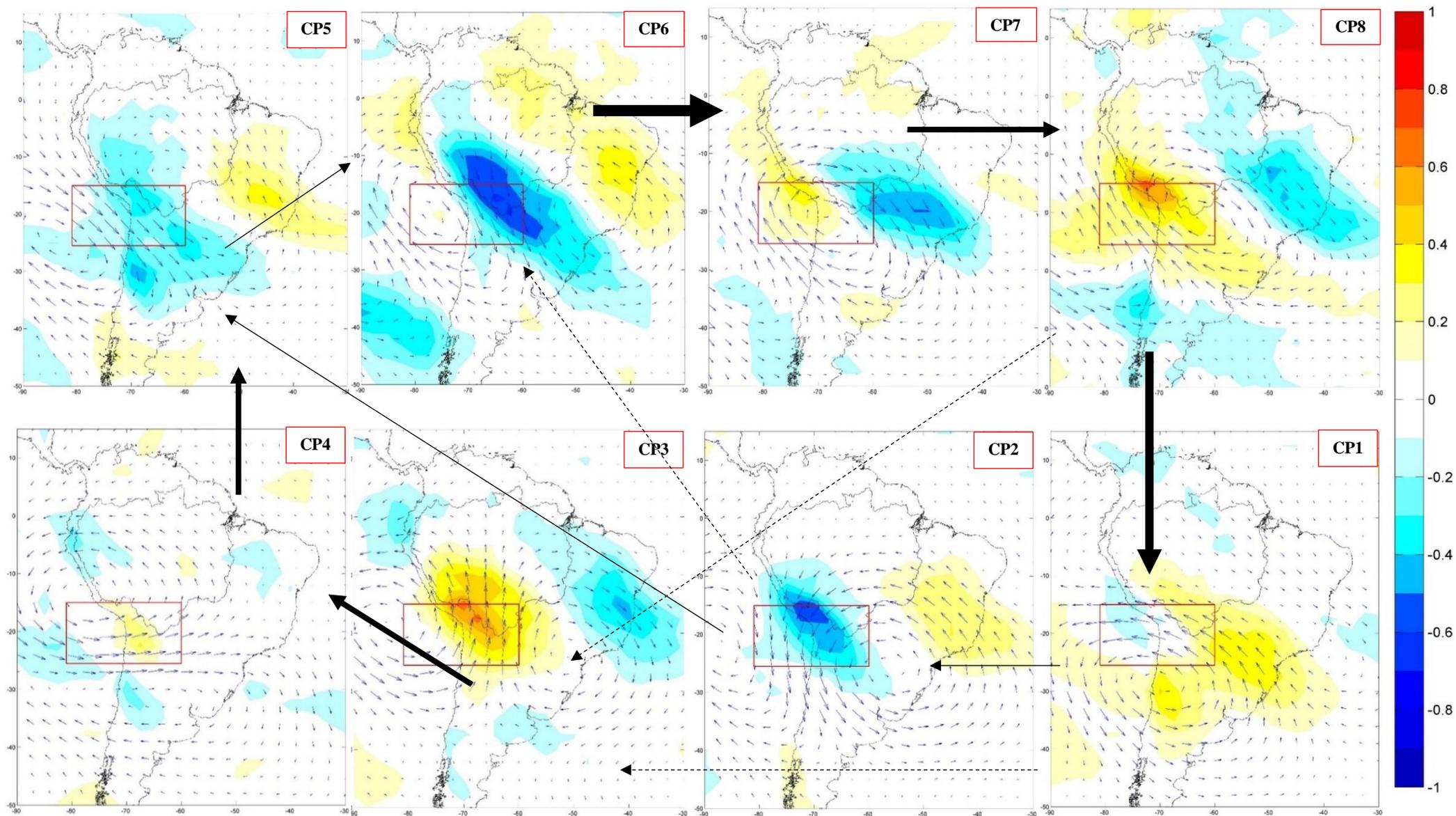


Figura 28: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia.

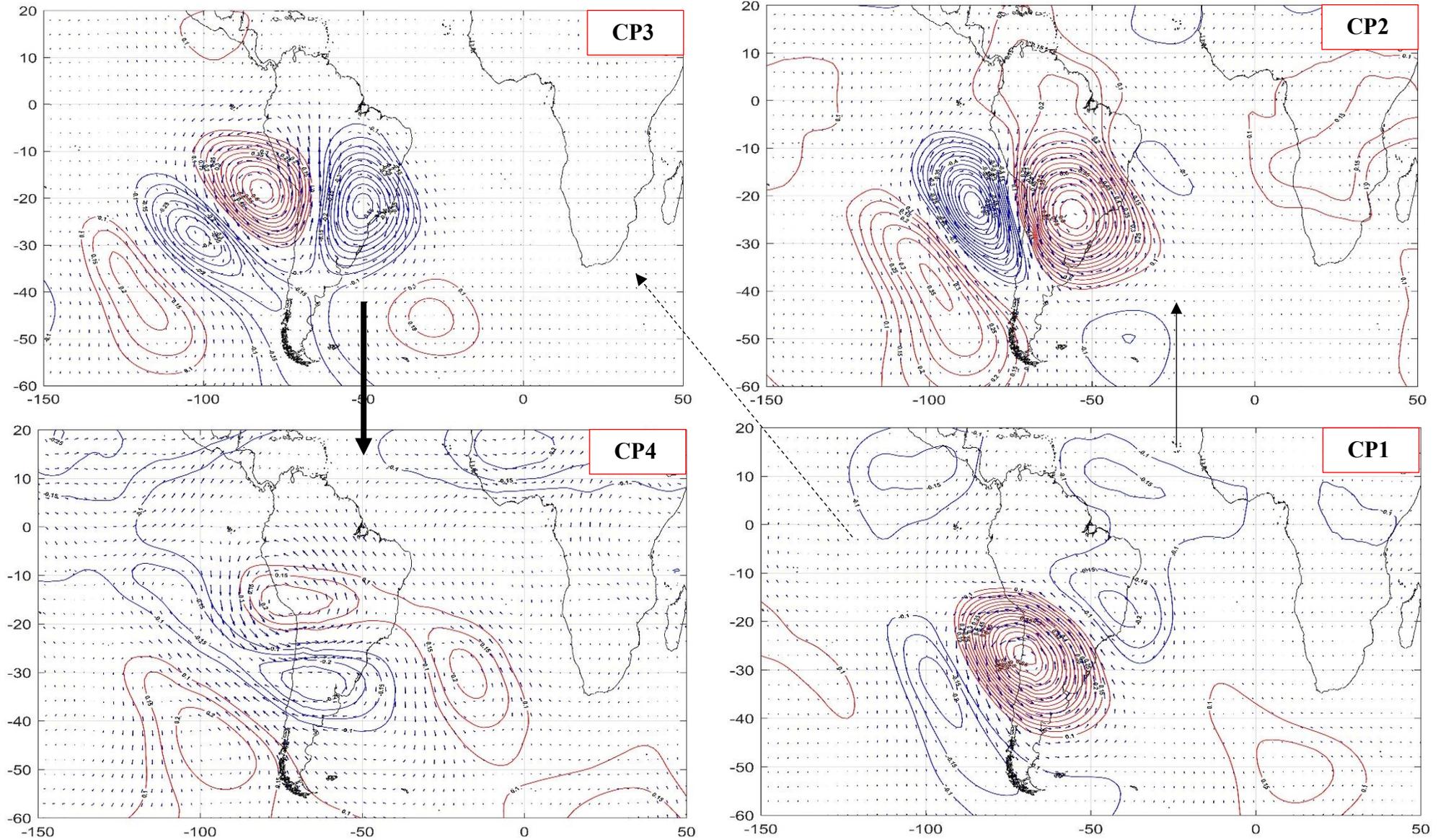


Figura 29: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa.

Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno. (Continuación)

FUENTE: Elaboración propia.

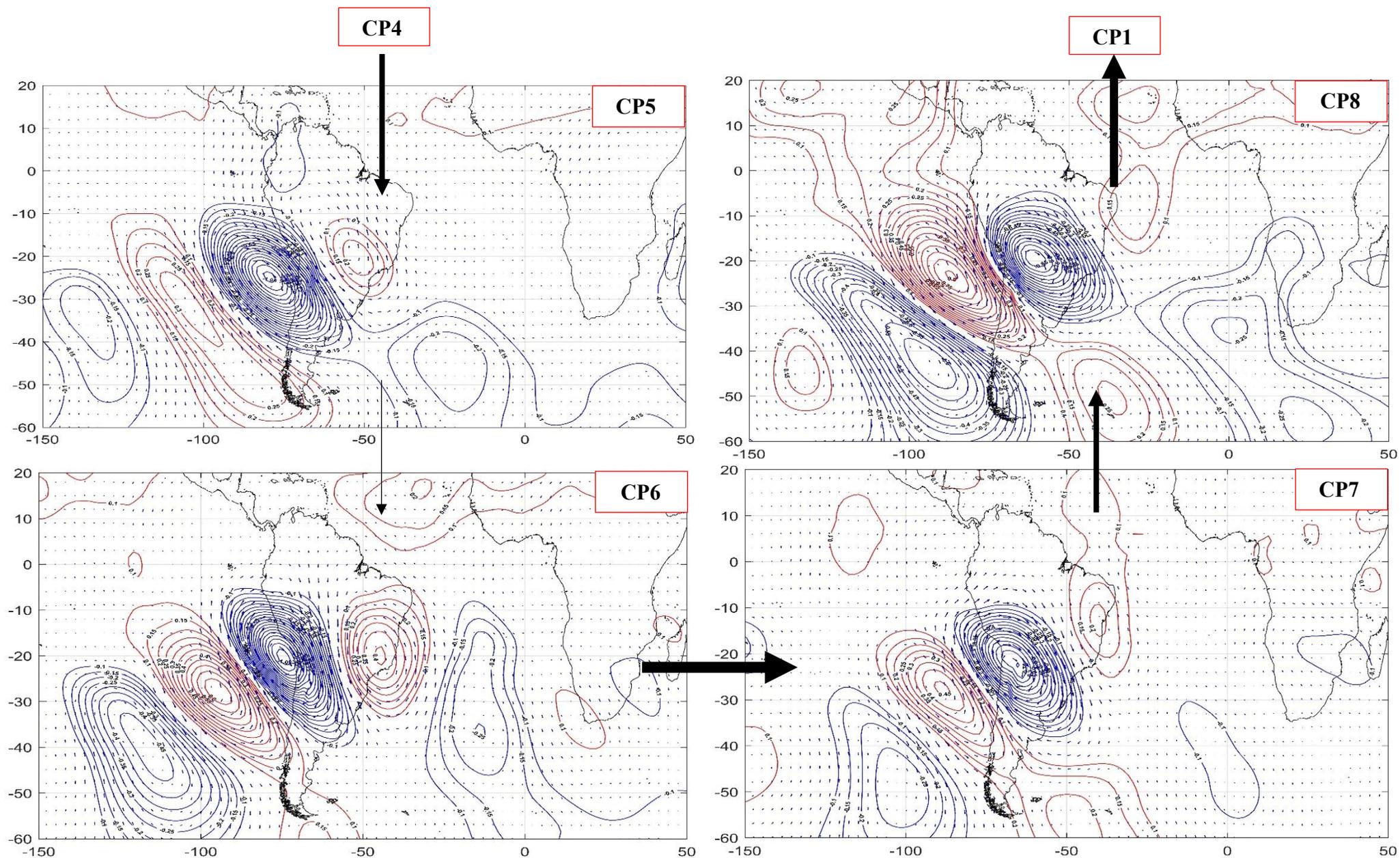


Figura 29: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 200 hPa.

Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.

FUENTE: Elaboración propia.

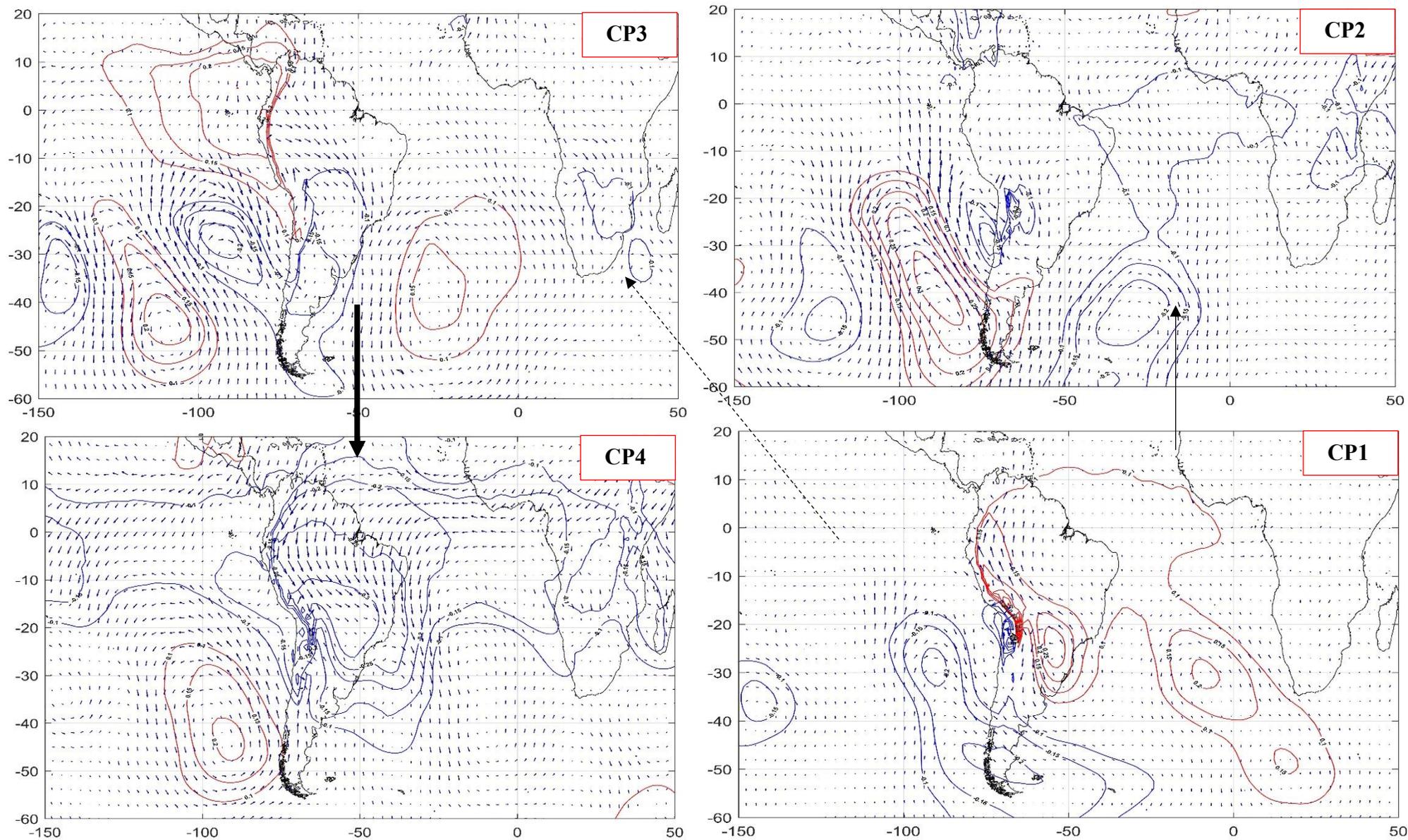


Figura 30: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno. (Continuación)

FUENTE: Elaboración propia.

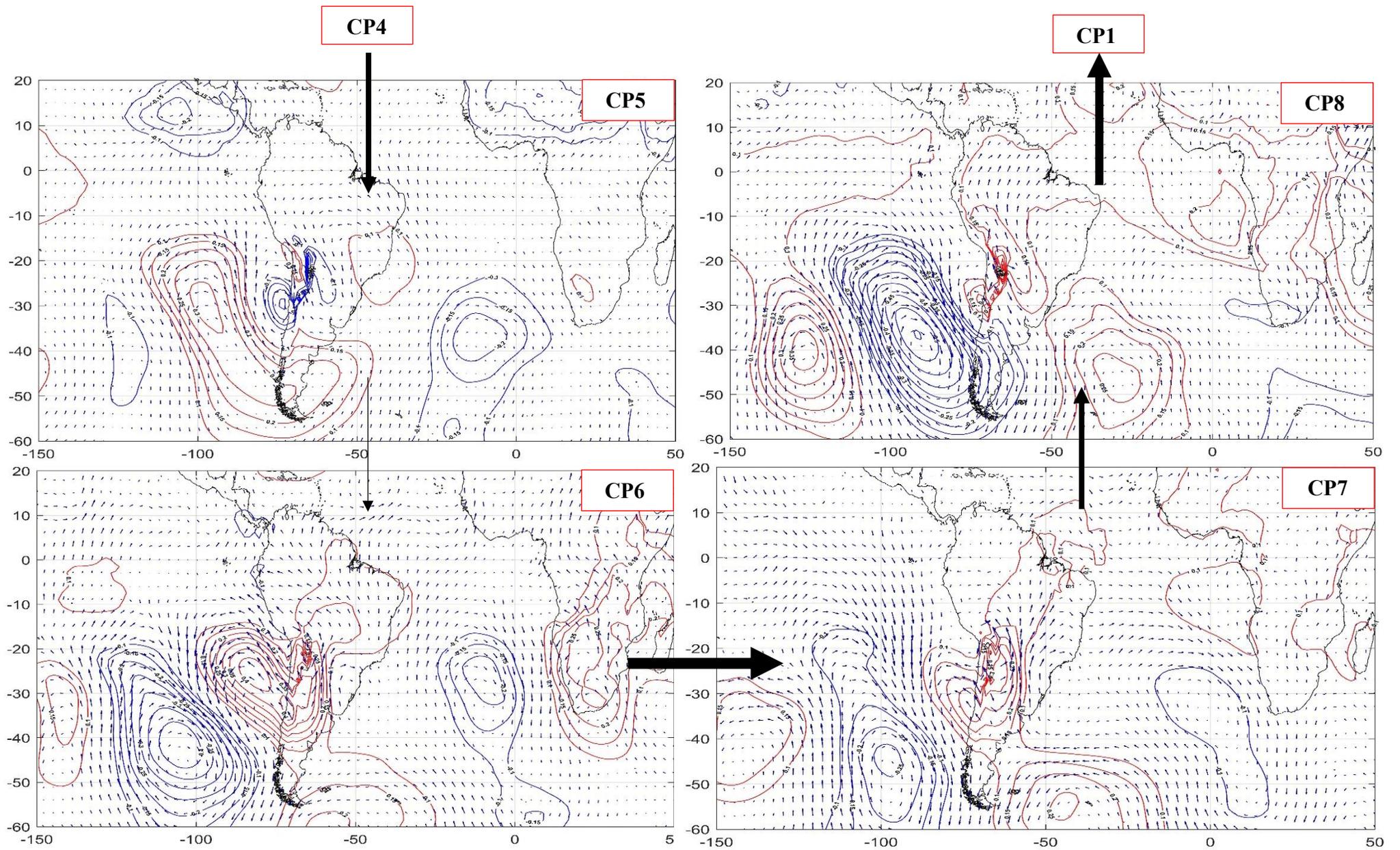


Figura 30: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de altura geopotencial y vientos a 850 hPa.

Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la altura geopotencial en líneas de contorno.

FUENTE: Elaboración propia.

4.3. Identificación de la persistencia (duración de cada patrón) y transición (probabilidad de ocurrencia) de cada uno de los patrones

4.3.1 Verano - DEF

A continuación, se presentan las características temporales de los patrones para la estación de verano de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia o transición y persistencia o duración de cada patrón. Se determinó la probabilidad que al día siguiente de ocurrido el CP, pase al siguiente patrón o CP, esta es la transición, o se mantenga un día más, siendo esta la persistencia. En la Figura 31 se muestra el orden de los patrones de circulación basado en el porcentaje de persistencia y la transición para DEF. Se consideró como la tercera probabilidad mayor o igual al 11 por ciento significativa al 90 por ciento. En este caso, el patrón CP1 es el primer patrón obtenido, estos escenarios predominantes cumplen con un ciclo temporal definido y tienen una duración de entre 3 a 8 días al analizar las transiciones y persistencias adjuntas en el Anexo 1.

El ciclo definido empieza con el patrón CP1 que presenta un 51 por ciento de persistir un día más mientras que tiene un 18 por ciento de pasar al CP4, el CP4 muestra un 57 por ciento de persistencia y un 11 por ciento de pasar al CP2, el CP2 tiene un 51 por ciento de continuar un día más o de pasar al CP5 con una transición de 26 por ciento, una vez en el CP5 la persistencia es del 72 por ciento y la transición es del 17 por ciento para el CP6, mientras el CP6 muestra un 65 por ciento de mantener el comportamiento un día más y de pasar al CP3 un 8 por ciento y retornar al CP4 es de 12 por ciento, ya en el patrón CP3 la persistencia es de 54 por ciento y de transición del 19 por ciento al CP4. Una de las alternativas al comportamiento cíclico de verano es el ciclo con la tercera probabilidad más alta que puede ir al CP1, CP2, CP5, CP4 y nuevamente al CP1.

En el Anexo 1, se pueden observar las persistencias y transiciones para dos, tres y cuatro días posteriores a los eventos definidos. La Figura 43 muestra que la circulación es muy similar a la presentada en la Figura 31, para los días posteriores (ver Figura 44 y Figura 45) el patrón CP4 es el patrón central respecto a los patrones CP1, CP3 y CP6, con hasta una probabilidad de transición de hasta un 23 por ciento.

La Tabla 2 muestra el porcentaje de días y el número de días correspondiente a cada patrón de circulación. Estos están relacionados a la frecuencia con la cual se presentan los patrones de circulación atmosférica respecto al total de días de la estación de verano.

Tabla 2: Porcentaje de días distribuidos entre los patrones de circulación atmosféricos (DEF).

PATRÓN	PORCENTAJE DE DÍAS	NÚMERO DE DÍAS
CP1	11%	367
CP2	13%	434
CP3	8.9%	297
CP4	20.7%	692
CP5	25.5%	852
CP6	20.9%	698
Total: 6	100	3340

FUENTE: Elaboración propia.

4.3.2 Otoño - MAM

En la Figura 32 se muestra el orden de los patrones de circulación basado en el porcentaje de persistencia y transición de cada uno de los CPs y la probabilidad de ocurrencia un día después. En el caso de MAM, se consideró como la tercera probabilidad mayor o igual al 15 por ciento significativa al 90 por ciento. En este caso, el CP1 es el primer patrón obtenido, estos escenarios predominantes tienen una duración de entre 4 a 11 días como máximo.

El ciclo definido empieza con el patrón CP1 que presenta un 43 por ciento de persistir un día más mientras que tiene un 12 por ciento de pasar al CP3, el CP3 muestra un 49 por ciento de persistencia y un 17 por ciento de pasar al CP4, el CP4 tiene un 54 por ciento de continuar un día más o de pasar al CP6 con una transmitancia de 18 por ciento, una vez en el CP2 la persistencia es del 42 por ciento y la transmitancia es del 21 por ciento para el CP5, mientras el CP5 muestra un 48 por ciento de mantener el comportamiento un día más y de pasar al

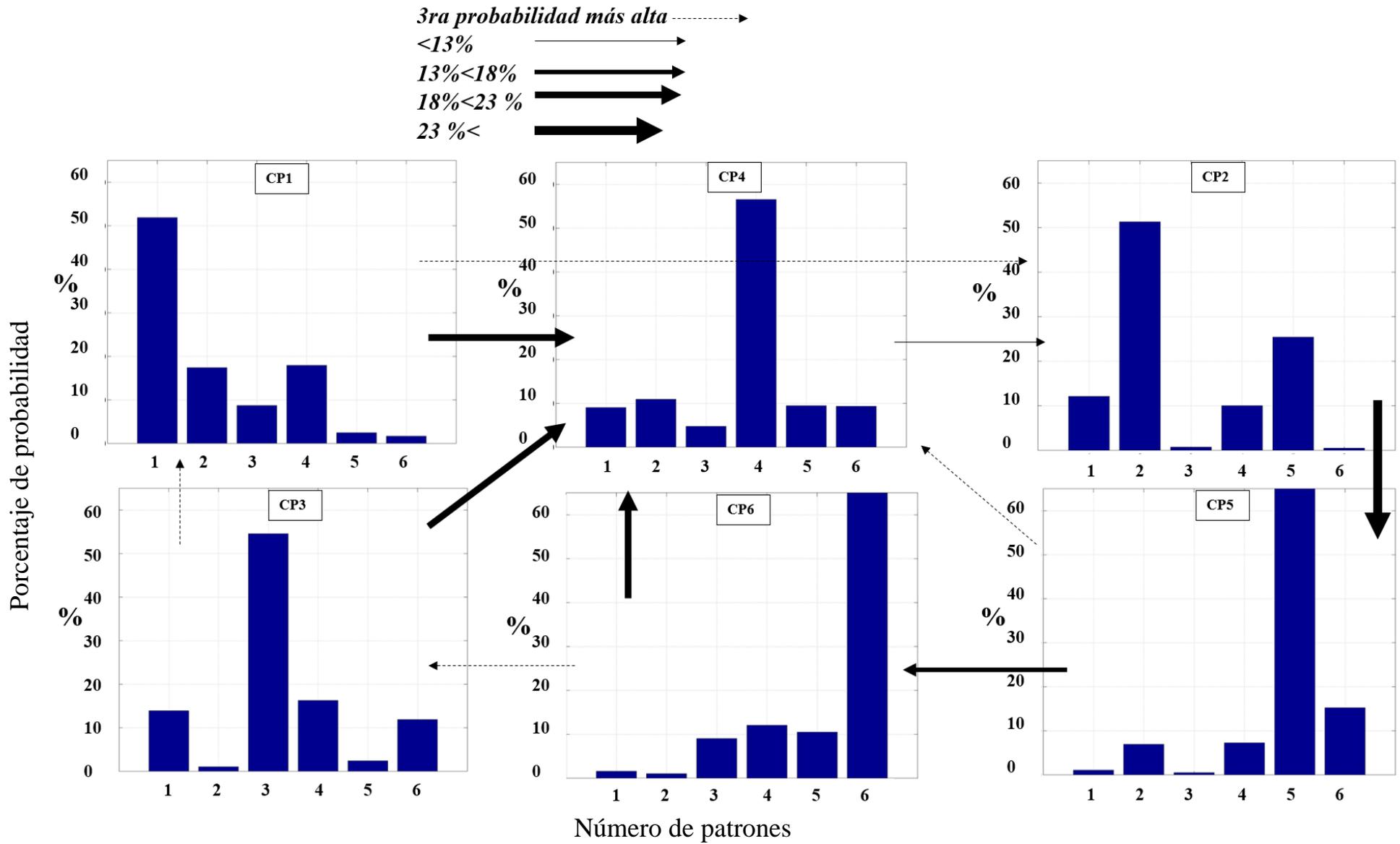


Figura 31: Probabilidad de persistencias y transiciones para el día posterior de cada patrón de circulación clasificado en DEF.
 FUENTE: Elaboración propia.

CP7 un 28 por ciento, ya en el patrón CP7 la persistencia es de 58 por ciento y de transición del 19 por ciento al CP3. Una de las alternativas al comportamiento cíclico de verano es el ciclo con la tercera probabilidad más alta que puede ir al CP2, CP6, CP4, CP3, CP7 y nuevamente al CP2.

En el Anexo 1, se pueden observar las persistencias y transiciones para dos, tres y cuatro días posteriores a los eventos definidos. La Figura 46 muestra que la circulación es muy similar a la presentada en la Figura 32, para los días posteriores (ver Figura 47 y Figura 48) los patrones que presentan una mayor probabilidad van del patrón CP2, CP5, CP7 y CP3 con probabilidades de entre 25 por ciento y 33 por ciento, y para los eventos con 4 días posteriores se observa una probabilidad mayor entre CP7, CP3 y CP4 de hasta 25 por ciento.

La Tabla 3 muestra el porcentaje de días y el número de días correspondiente a cada patrón de circulación.

Tabla 3: Porcentaje de días distribuidos entre los patrones de circulación atmosféricos (MAM).

PATRÓN	PORCENTAJE DE DÍAS	NÚMERO DE DÍAS
CP1	14.5%	507
CP2	11.5%	402
CP3	16.9%	591
CP4	14.9%	521
CP5	11.2%	392
CP6	14.2%	496
CP7	16.8%	587
Total: 7	100	3496

FUENTE: Elaboración propia.

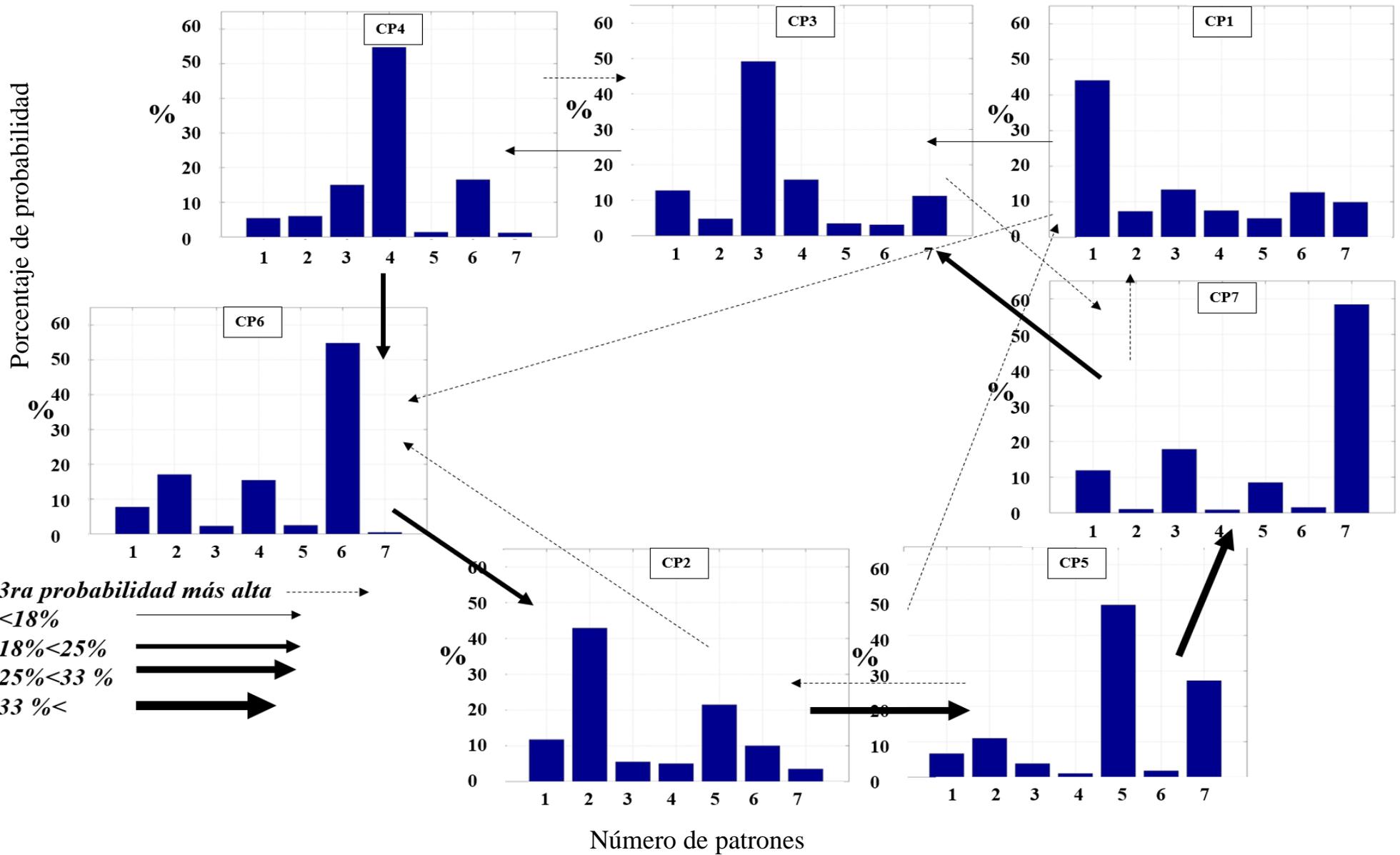


Figura 32: Probabilidad de persistencias y transiciones para el día posterior de cada patrón de circulación clasificado en MAM.
 FUENTE: Elaboración propia.

4.3.3 Invierno - JJA

La Figura 33 muestra la probabilidad de ocurrencia con un día posterior y la tercera probabilidad mayor o igual al 12 por ciento significativa al 90 por ciento. En este caso, se consideró como patrón CP7 el primer patrón obtenido, estos escenarios predominantes tienen una duración de entre 3 a 11 días como máximo.

El ciclo definido empieza con el patrón CP7 que presenta un 58 por ciento de persistir un día más mientras que tiene un 22 por ciento de pasar al CP3, el CP3 muestra un 38 por ciento de persistencia y un 36 por ciento de pasar al CP4, el CP4 tiene un 37 por ciento de continuar un día más o de pasar al CP5 con una transición de 31 por ciento, una vez en el CP5 la persistencia es del 42 por ciento y la transición es del 39 por ciento para el CP6, mientras el CP6 muestra un 54 por ciento de mantener el comportamiento un día más y de pasar al CP1 un 22 por ciento, ya en el patrón CP1 la persistencia es de 41 por ciento y de pasar al CP7 del 28 por ciento, siendo la carta de JJA la que presenta un comportamiento bien definido comparado a las otras cartas que presentan caminos alternativos. La carta que no muestra un comportamiento vinculado dentro del ciclo es el CP2, que usualmente se presenta en casi todas las cartas como la tercera probabilidad posible, pero solo en dos de ellas es significativa. Ello puede estar relacionado a un patrón recurrente o característico de esta estación.

En el Anexo 1, se pueden observar las persistencias y transiciones para dos, tres y cuatro días posteriores a los eventos definidos. La Figura 49 muestra circulación atmosférica muy similar a la presentada en la Figura 33, para los días de hasta tres y cuatro días posteriores, como muestra en la Figura 50 y Figura 51, se observa la persistencia del ciclo con probabilidades de entre 20 por ciento y 30 por ciento.

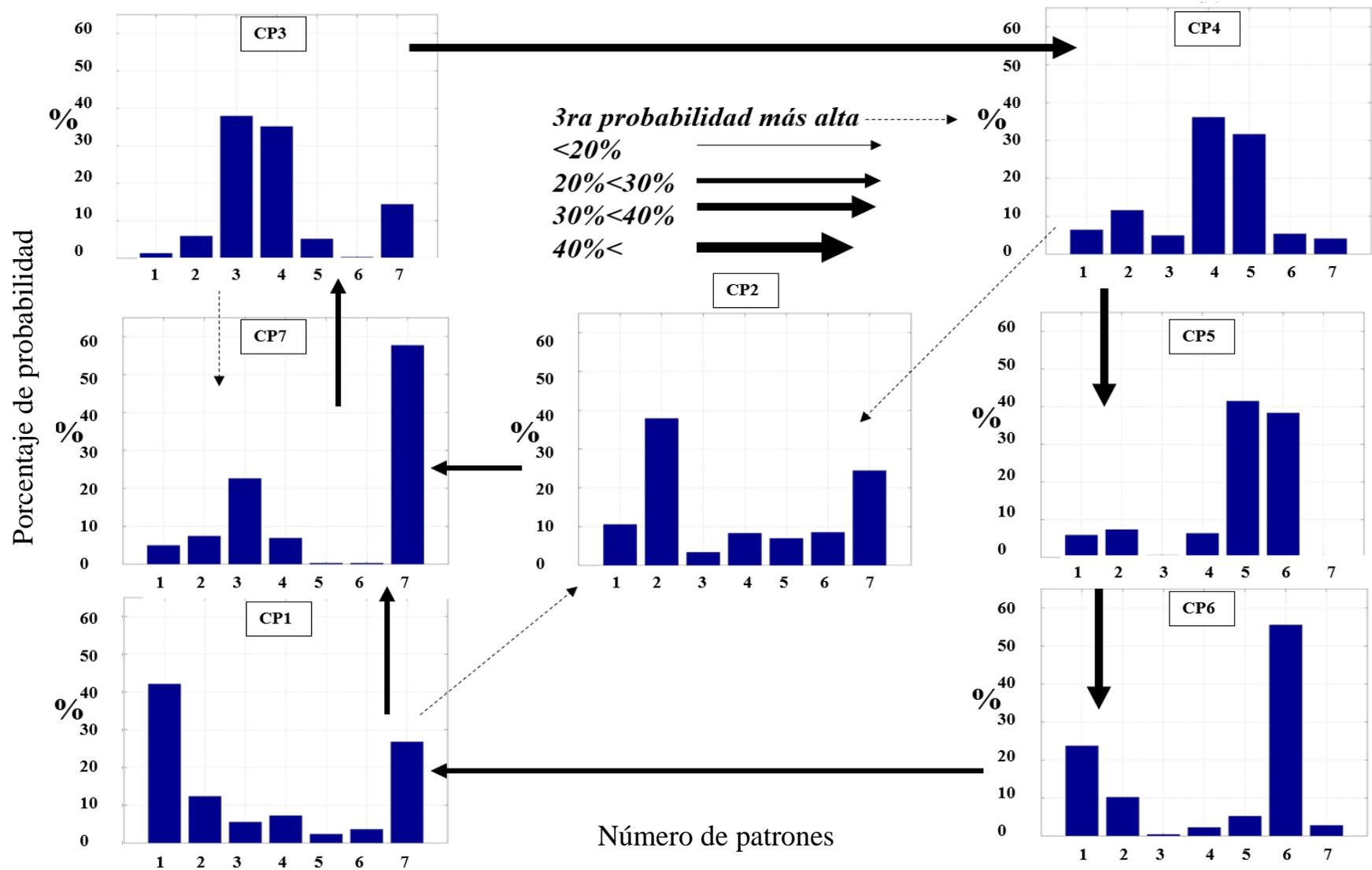


Figura 33: Probabilidad de persistencias y transiciones en días posteriores al evento clasificado en JJA.

FUENTE: Elaboración propia.

La Tabla 4 muestra el porcentaje de días y el número de días correspondiente a cada patrón de circulación.

Tabla 4: Porcentaje de días distribuidos entre los patrones de circulación atmosféricos (JJA).

PATRÓN	PORCENTAJE DE DÍAS	NÚMERO DE DÍAS
CP1	13.7%	479
CP2	12.9%	451
CP3	11.1%	388
CP4	13.4%	469
CP5	11.9%	416
CP6	15.0%	524
CP7	22.0%	769
Total: 7	100	3496

FUENTE: Elaboración propia

4.3.4 Primavera - SON

La Figura 34 muestra la información respecto a la clasificación del número de patrones correspondiente. La probabilidad de ocurrencia un día posterior al evento seleccionado y la tercera probabilidad mayor o igual al 16 por ciento significativa al 90 por ciento. En este caso, se consideró como patrón CP8 el primer patrón obtenido, estos escenarios predominantes tienen una duración de entre 3 a 8 días como máximo debido al número de patrones.

El ciclo definido empieza con el patrón CP8 que presenta un 64 por ciento de persistir un día más mientras que tiene un 13 por ciento de pasar al CP6, el CP6 muestra un 59 por ciento de persistencia y un 17 por ciento de pasar al CP4. El CP7 tiene un 57 por ciento de continuar un día más o de pasar al CP5 con una transición del 21 por ciento, una vez en el CP5 la persistencia es del 39 por ciento y la transición es del 18 por ciento para el CP4, mientras el CP4 muestra un 43 por ciento de mantener el comportamiento un día más y de pasar al

CP3 un 16 por ciento, el CP3 tiene una persistencia de 46 por ciento y una transmitancia del 48 por ciento al CP2, ya en el patrón CP2 la persistencia es de 39 por ciento y transición del 21 por ciento al CP1.

En el Anexo 1, se pueden observar las persistencias y transiciones para dos, tres y cuatro días posteriores a los eventos definidos. La Figura 52 La circulación es muy similar a la presentada en 34, para los días posteriores (ver Figura 53 y Figura 54) los patrones que presentan una mayor probabilidad van del patrón CP3, CP2, CP1, CP8, CP6 y CP5 con probabilidades de entre 25 por ciento y 30 por ciento, y para los eventos con 4 días posteriores se observa una probabilidad mayor entre CP1, CP8, CP6 y CP5 de hasta 25 por ciento.

La Tabla 5 muestra el porcentaje de días y el número de días correspondiente a cada patrón de circulación.

Tabla 5: Porcentaje de días distribuidos entre los patrones de circulación atmosféricos (SON).

PATRÓN	PORCENTAJE DE DÍAS	NÚMERO DE DÍAS
CP1	6.74%	233
CP2	11.8%	408
CP3	7.26%	251
CP4	12%	415
CP5	14.9%	515
CP6	12.9%	446
CP7	15.9%	550
CP8	18.5%	640
Total: 8	100	3458

FUENTE: Elaboración propia.

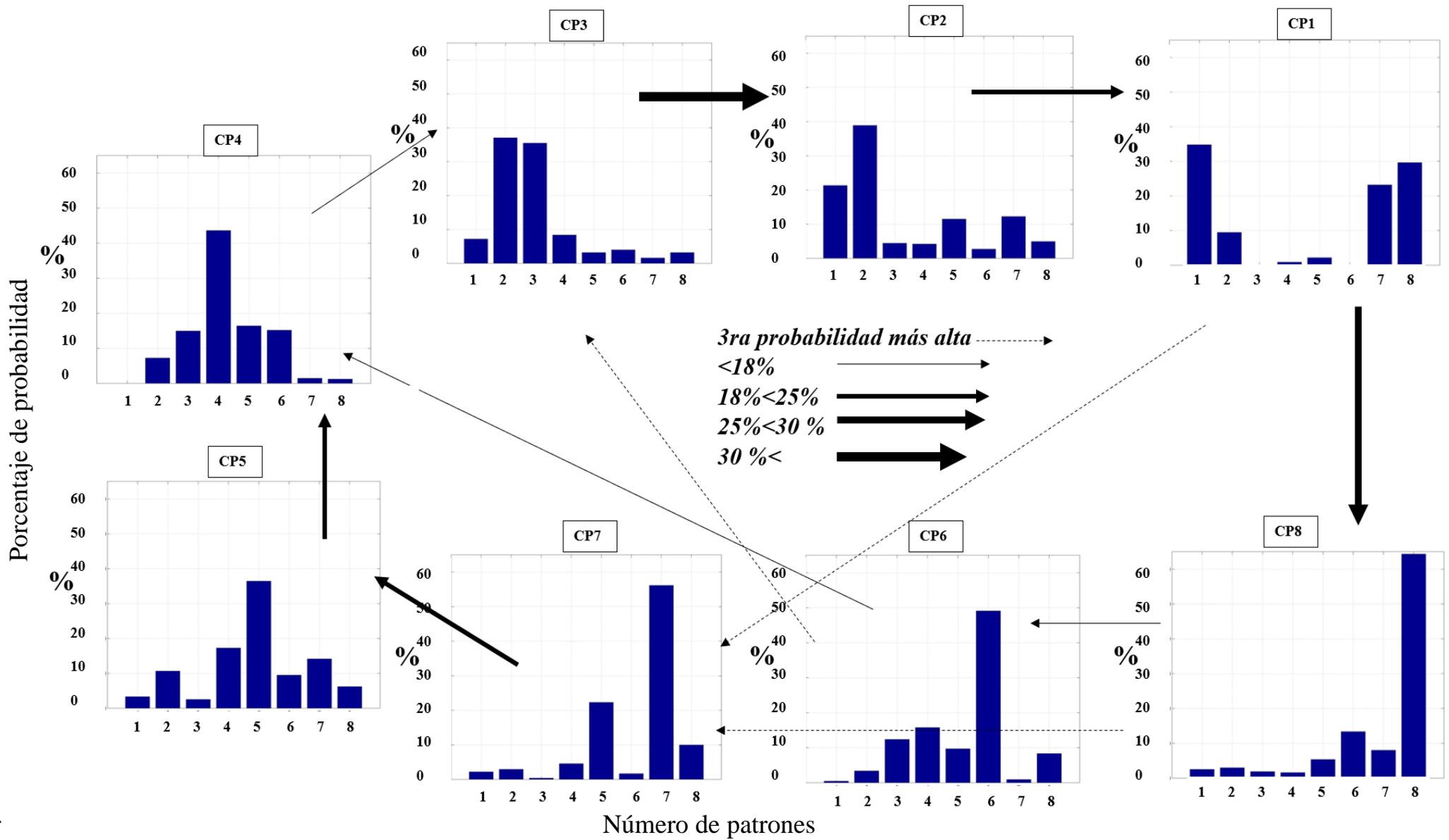


Figura 34: Probabilidad de persistencias y transiciones en días posteriores al evento clasificado en SON.

FUENTE: Elaboración propia.

4.4. Determinación de la influencia de los patrones de circulación en la precipitación

4.4.1 Verano - DEF

La Figura 35 muestra los valores de las anomalías porcentuales de precipitación de las estaciones meteorológicas para el DEF (ej. Minvielle y Garreaud, 2011). En la imagen 1, muestra una mayor influencia en las estaciones en la base amazónica, esta precipitación disminuye progresivamente (ver imagen 2). La imagen 3 muestra la presencia de precipitación en las estaciones ubicadas en el área de interés, este patrón podría considerarse un patrón de abundantes precipitaciones en esta estación del año, estas condiciones continúan en la imagen 4 donde disminuye la precipitación en las estaciones ubicadas a menor altitud. En la imagen 5 se observa la disminución de la precipitación en toda el área, mientras que en la imagen 6, disminuye aún más en los Andes, esta ausencia de precipitación es notoria comparada con la precipitación en las estaciones de la Amazonía, mostrando un sistema dual característico debido a la presencia del Alta de Bolivia que se comprueba en la imagen 1 y 4, como lo mencionan Espinoza et al. (2014). Las imágenes 2 y 5 muestran un comportamiento asociada a la circulación de la SACZ o Zona de Convergencia del Atlántico Sur, esto muestra confluencia de vientos en el este de la cuenca amazónica, ausencia de precipitaciones en el Altiplano y predominancia de las anomalías de vientos del oeste, lo cual es típico de una configuración de la SACZ intenso, de acuerdo con lo descrito en Carvalho *et al.*, (2002; 2005).

La Figura 36 complementa lo mostrado para las estaciones meteorológicas, pues se representan los valores de anomalías de vientos a 850 hPa y OLR en colores sólidos, en el CP1 muestra una confluencia de vientos sobre el continente, propiciando la precipitación sobre el llano amazónico del área de interés, las anomalías estandarizadas de vientos provenientes del noroeste se intensifican y predominan vientos que transportan humedad al noreste de la cuenca amazónica (ver CP2) e intensifican las condiciones secas en la zona de interés. En CP3 se observa una circulación ciclónica sobre el continente, estos sistemas se debilitan, un sistema de baja presión intensificándose sobre el continente (ver CP4), progresivamente estos vientos predominantes son vientos del este sobre el altiplano, desplazando los núcleos convectivos (CP5), que progresivamente se intensifican sobre el continente, como se observa en CP6 (ver Figura 13).

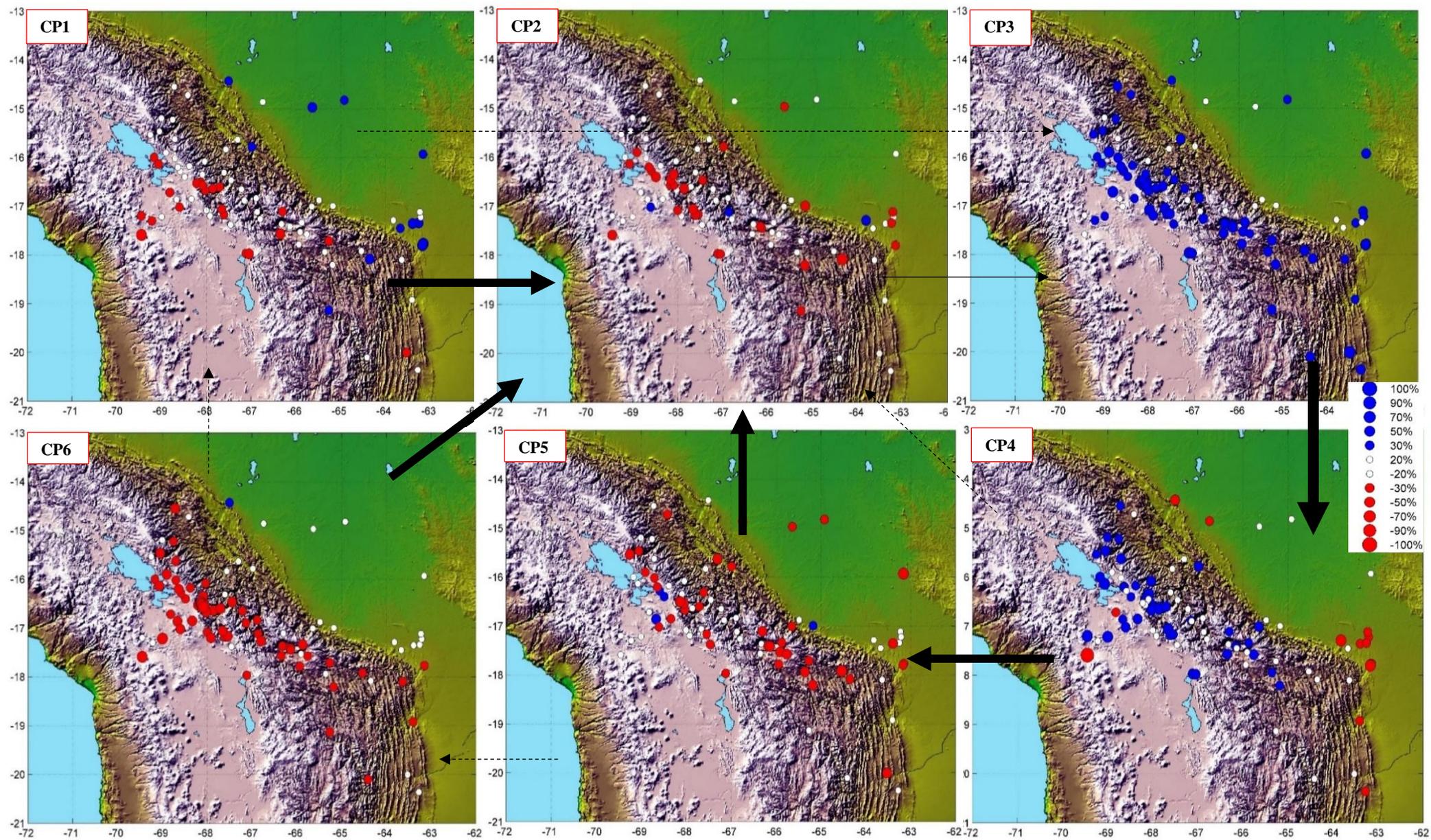


Figura 35: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el DEF.

FUENTE: Elaboración propia.

De acuerdo con lo mencionado en Wang y Fu (2002) estos sistemas son descritos como régimen del norte y régimen del sur que influyen en el transporte de humedad a bajos niveles. CP1, CP2, CP3 y CP5 cumplen con un régimen del norte, mientras que las cartas CP4 y CP6 pertenecen a un régimen predominante del sur.

Estos resultados son complementados con la información en el Anexo 2 donde se realizó el análisis usando la data de PISCO hasta el año 2015 que muestran la influencia de vientos en bajos niveles. Estos resultados pueden ser revisados en el Anexo 2, Figura 55 y Figura 56.

Adicional a ello, se puede decir que, los sistemas mostrados cumplen con las condiciones características conocidas (Gan *et al.*, 2004), en cuanto a la circulación de bajos niveles con la presencia de vientos del noreste como consecuencia de la influencia de los vientos alisios desviados hacia el sureste por la presencia de la cordillera de los Andes y la convergencia de vientos provenientes del Atlántico subtropical para finalmente transportar masa de aire hacia Brasil y Argentina, estas condiciones son mencionadas por Marengo *et al.* (2004), para la descripción de SALLJ, la fase madura del SAMS y la presencia del Alta de Bolivia en altos niveles. (Espinoza *et al.*, 2011).

Respecto a los patrones relacionados con eventos extremos, los días relacionados a precipitaciones mínimas o sequías es el CP6 en verano.

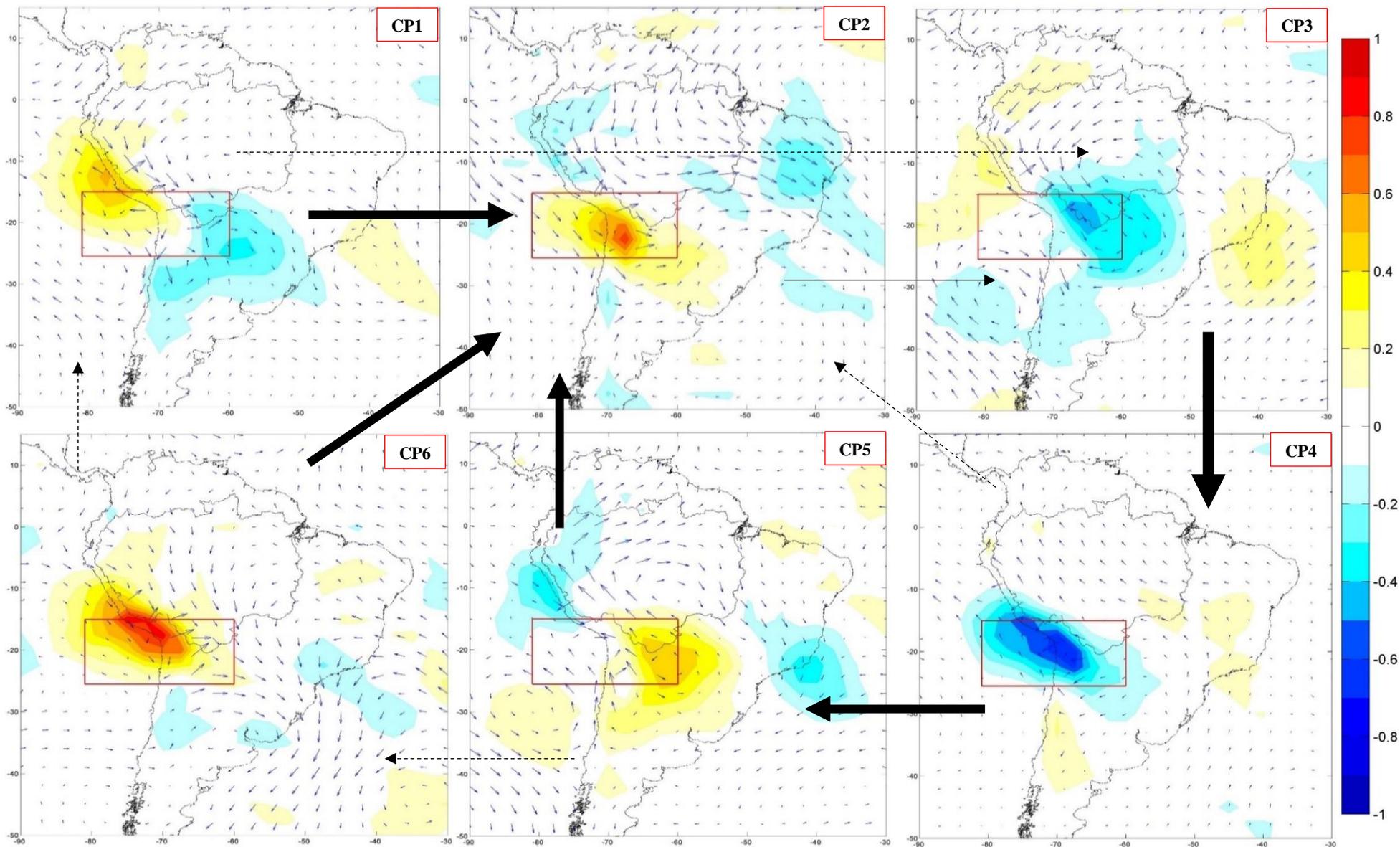


Figura 36: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia.

4.4.2 Otoño – MAM

La Figura 37 muestra la precipitación en el área de interés y la contribución porcentual de precipitación significativa al 90 por ciento. En la imagen 1, se muestra días con déficit de precipitación, esta precipitación aumenta progresivamente (ver imagen 2 e imagen 3) sobre las estaciones ubicadas en los Andes y déficit en las estaciones de la Amazonía en el área del altiplano peruano-boliviano y ubicadas a menor altitud. La imagen 4 e imagen 5, muestran ausencia de precipitación en las estaciones de los Andes e incremento de las precipitaciones en la Amazonía mostrando un sistema dual, ello es debido al sistema de baja y alta presión y confluencia de vientos del noroeste en bajos niveles y en altos niveles por la incursión de una onda atmosférica, mientras que la imagen 6 e imagen 7 pueden considerarse como patrones de sequías en esta estación, ya que muestra ausencia de precipitaciones en casi todas las estaciones, esto está relacionado al sistema de altas presiones posicionado en el continente que se van intensificando y debilitando en un tren de ondas que se va disipando en continente.

El patrón relacionado a eventos más secos son el CP6 y CP7. Mientras que los patrones más húmedos son CP2 y CP3.

La Figura 38 muestra la anomalía estandarizada de vientos a 850 hPa y OLR, en los CPs relacionados con sistemas convectivos en el altiplano, como el CP3 y CP4 que muestra una confluencia de vientos en bajos niveles, se determinó que en algunos días la velocidad de la componente vertical del viento cumplía con el valor establecido en el criterio de Bonner y la presencia de un sistema de alta presión más débil. Los patrones que presentan días secos y anomalías de OLR positivas muestran divergencia de vientos en el área de interés, donde el sistema de alta presión se debilita (ver CP5, CP6 y CP7).

Estos resultados son complementados con la información en el Anexo 2 donde se realizó el análisis usando la data de PISCO hasta el año 2015. Estos resultados pueden ser revisados en el Anexo 2, Figura 57 y Figura 58.

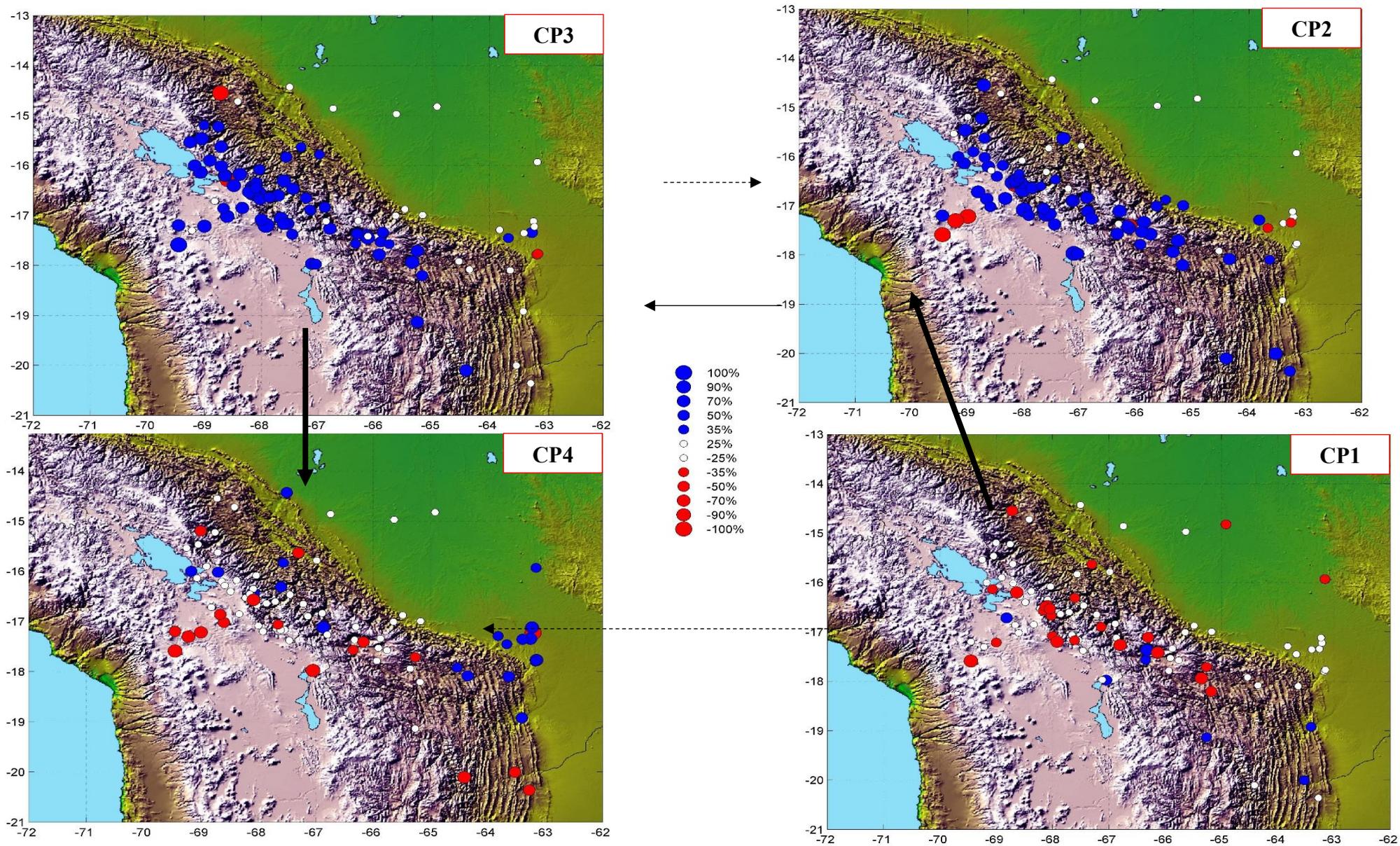


Figura 37: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el MAM. (Continuación).
 FUENTE: Elaboración propia.

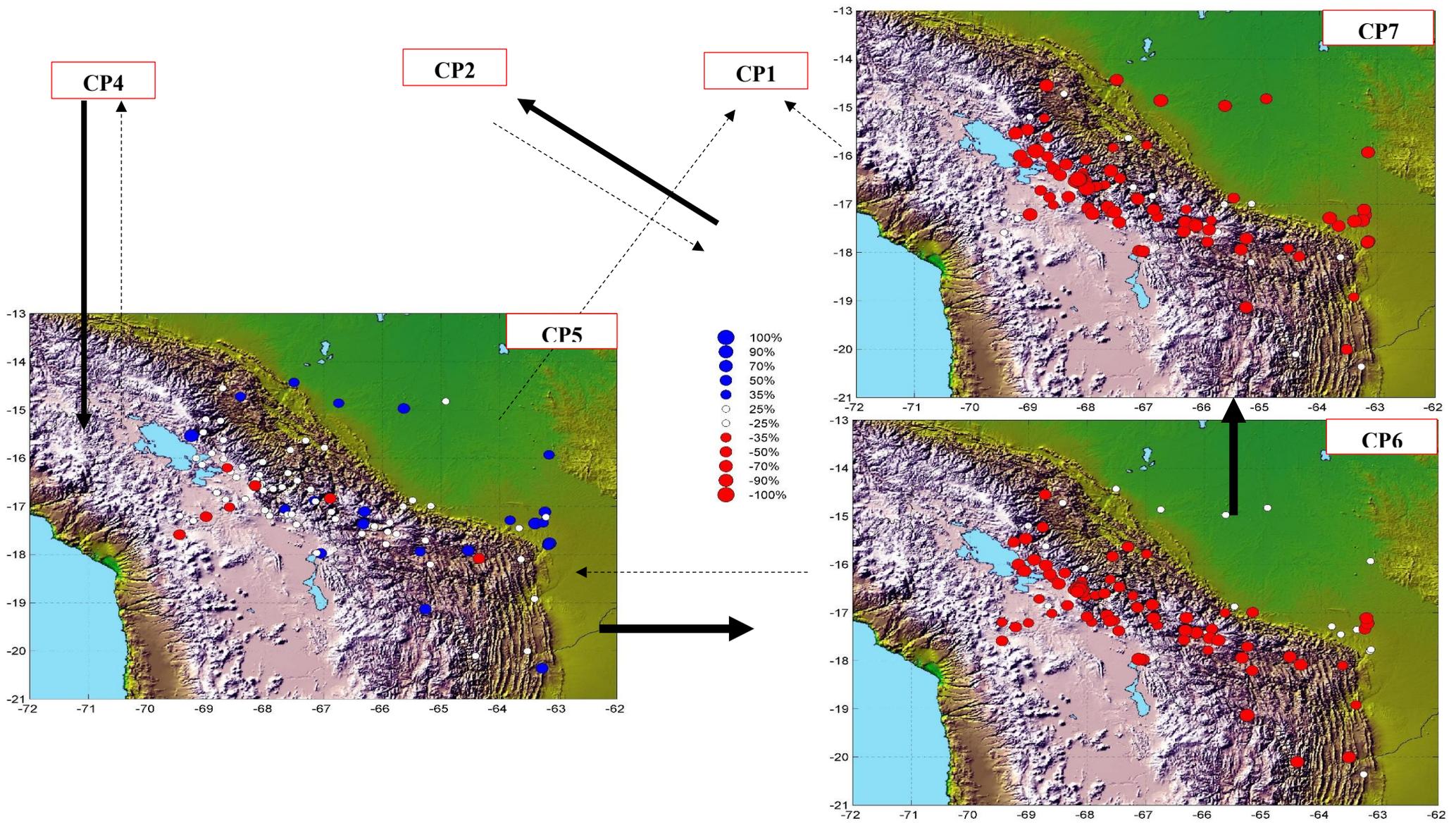


Figura 37: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el MAM.
 FUENTE: Elaboración propia.

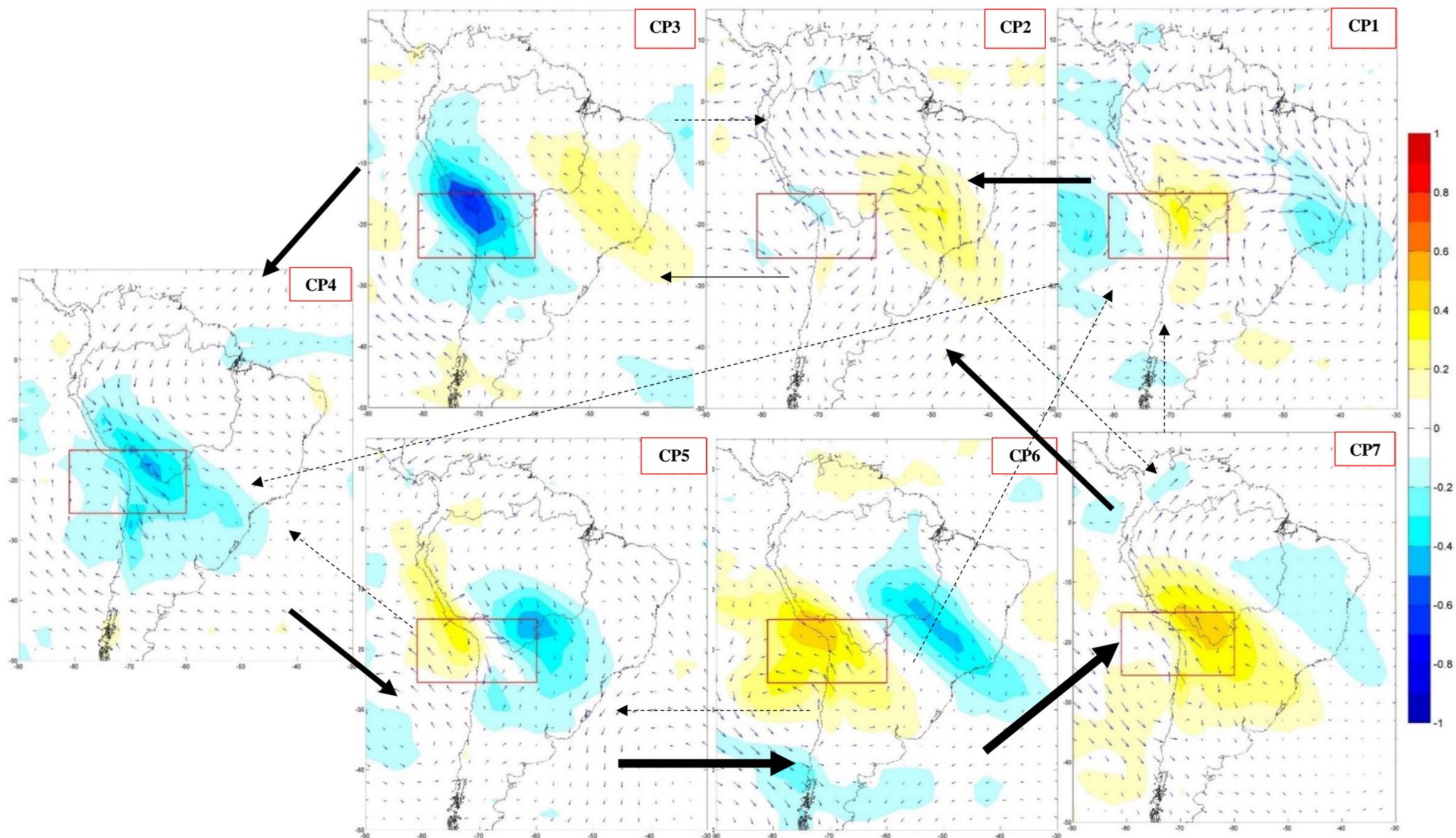


Figura 38: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia.

4.4.3 Invierno - JJA

La Figura 39 muestra la precipitación en el área de interés y la contribución porcentual de precipitación significativa al 90 por ciento. En la imagen 1, se muestra días con déficit de precipitación que aumenta progresivamente (ver imagen 2 e imagen 3) sobre las estaciones ubicadas en los Andes y déficit en las estaciones de la Amazonía y ubicadas a menor altitud en el área de interés. La imagen 4 e imagen 5, muestran ausencia de precipitación en las estaciones de los Andes e incremento de precipitaciones en la Amazonía mostrando un sistema dual, ello es debido al sistema de baja y alta presión y confluencia de vientos del noroeste en bajos niveles y en altos niveles la propagación de una onda atmosférica e incremento progresivo, mientras que la imagen 6 e imagen 7 pueden considerarse como patrones de sequías en esta estación, ya que muestra ausencia de precipitaciones en casi todas las estaciones, esto está relacionado al sistema de altas presiones posicionado en el continente que se van intensificando y debilitando en un tren de ondas que se va disipando en continente.

El patrón relacionado a eventos más secos son el CP6 y CP7. Mientras que los patrones más húmedos son CP2 y CP3.

En bajos niveles (ver la Figura 40) se muestra los sistemas acoplados de altas y bajas presiones sobre el continente, intensificándose y definiendo los patrones húmedos en esta estación, estos patrones húmedos están relacionados con días que presentan valores de precipitación sobre la media registrada, los CPs con sistemas convectivos en continente y el área de interés muestran sistemas acoplados de alta y baja presión en el continente, mientras que en los patrones de días secos prevalecen las condiciones inversas. En todas las cartas, para la estación de invierno prevalece el movimiento de ondas planetarias dirigidas hacia el continente en altos y bajos niveles.

Estos resultados son complementados con la información en el Anexo 2 donde se realizó el análisis usando la data de PISCO hasta el año 2015. Estos resultados pueden ser revisados en el Anexo 2, Figura 59 y Figura 60.

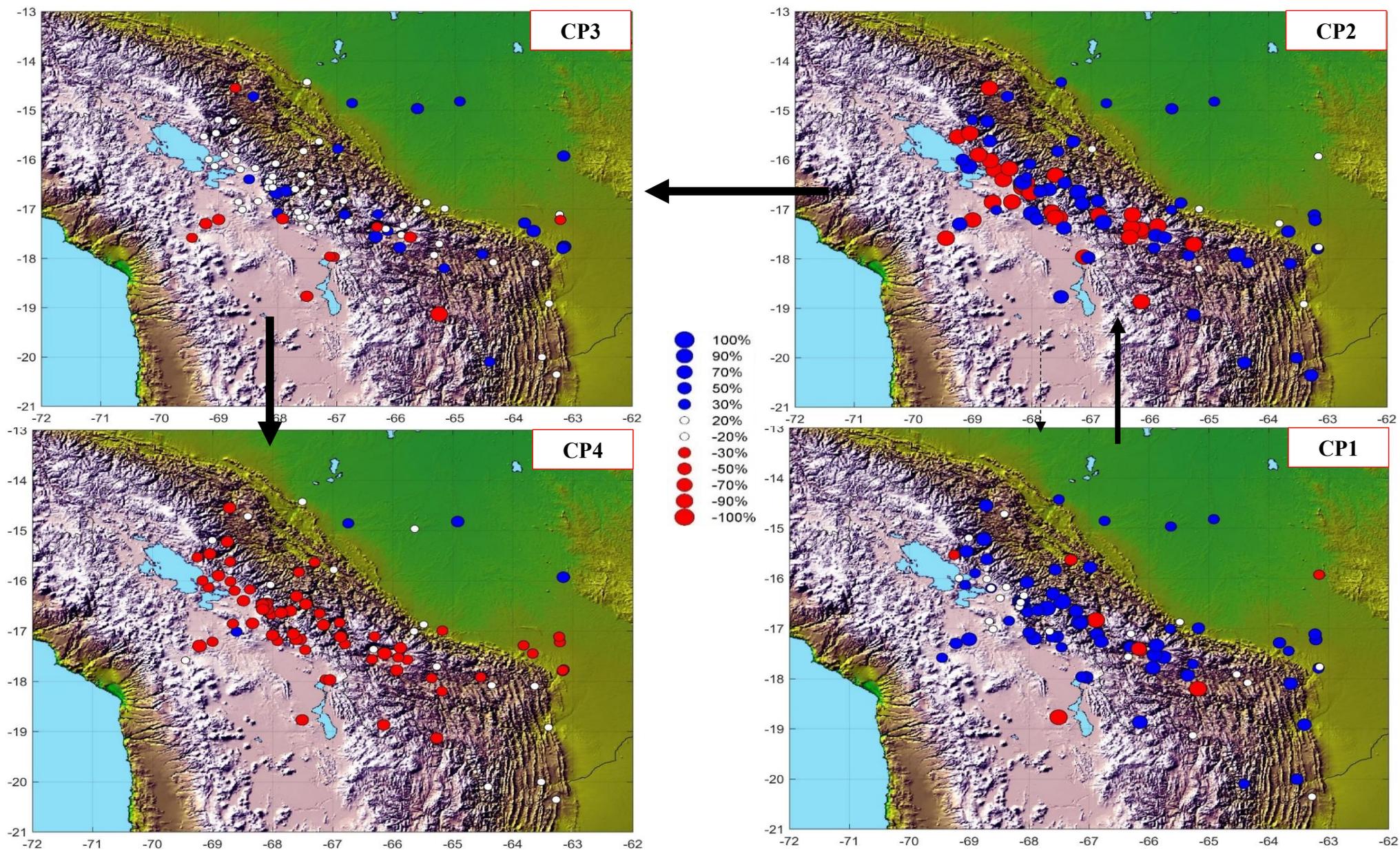


Figura 39: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el JJA. (Continuación)

FUENTE: Elaboración propia.

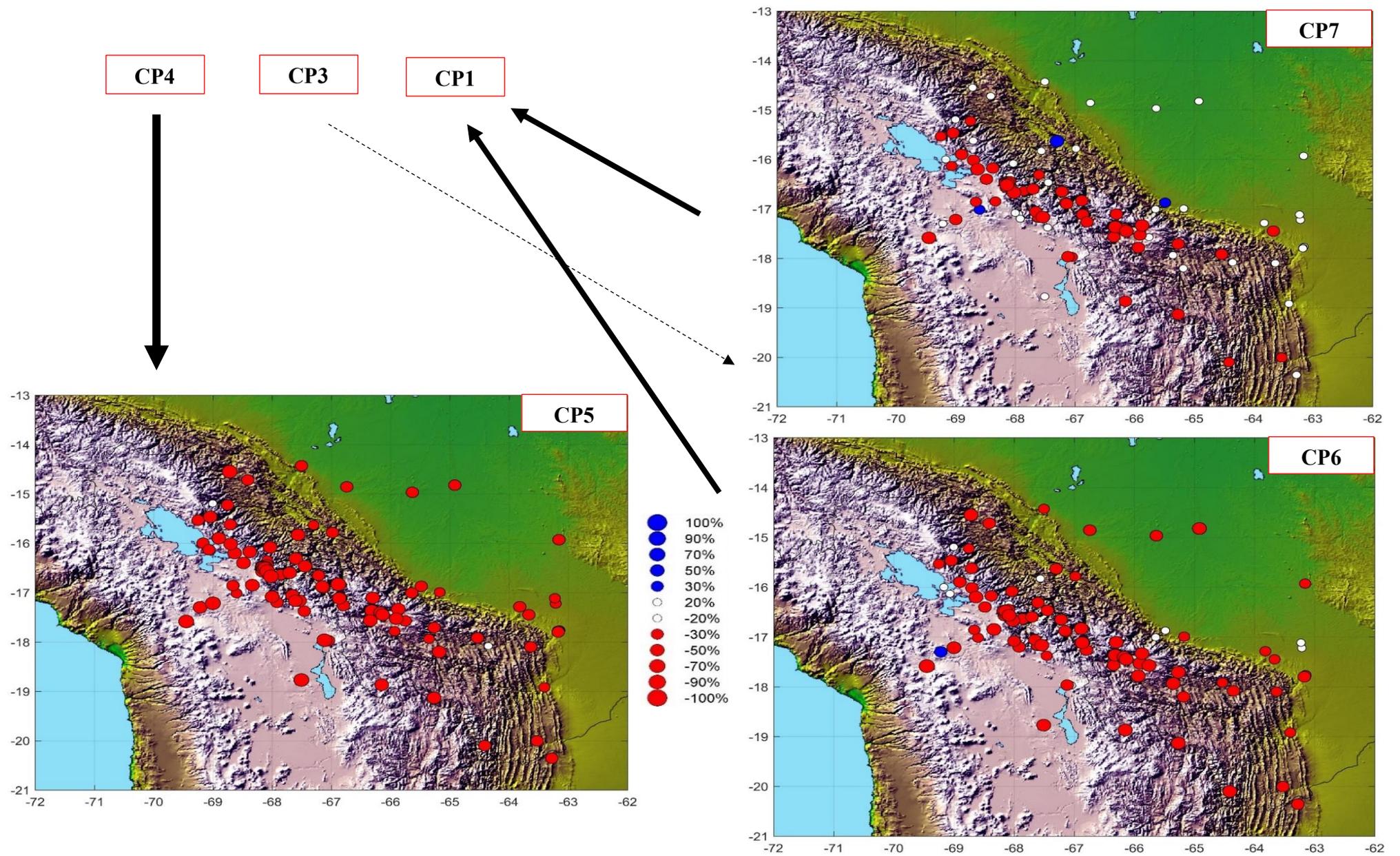


Figura 39: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el JJA.

FUENTE: Elaboración propia.

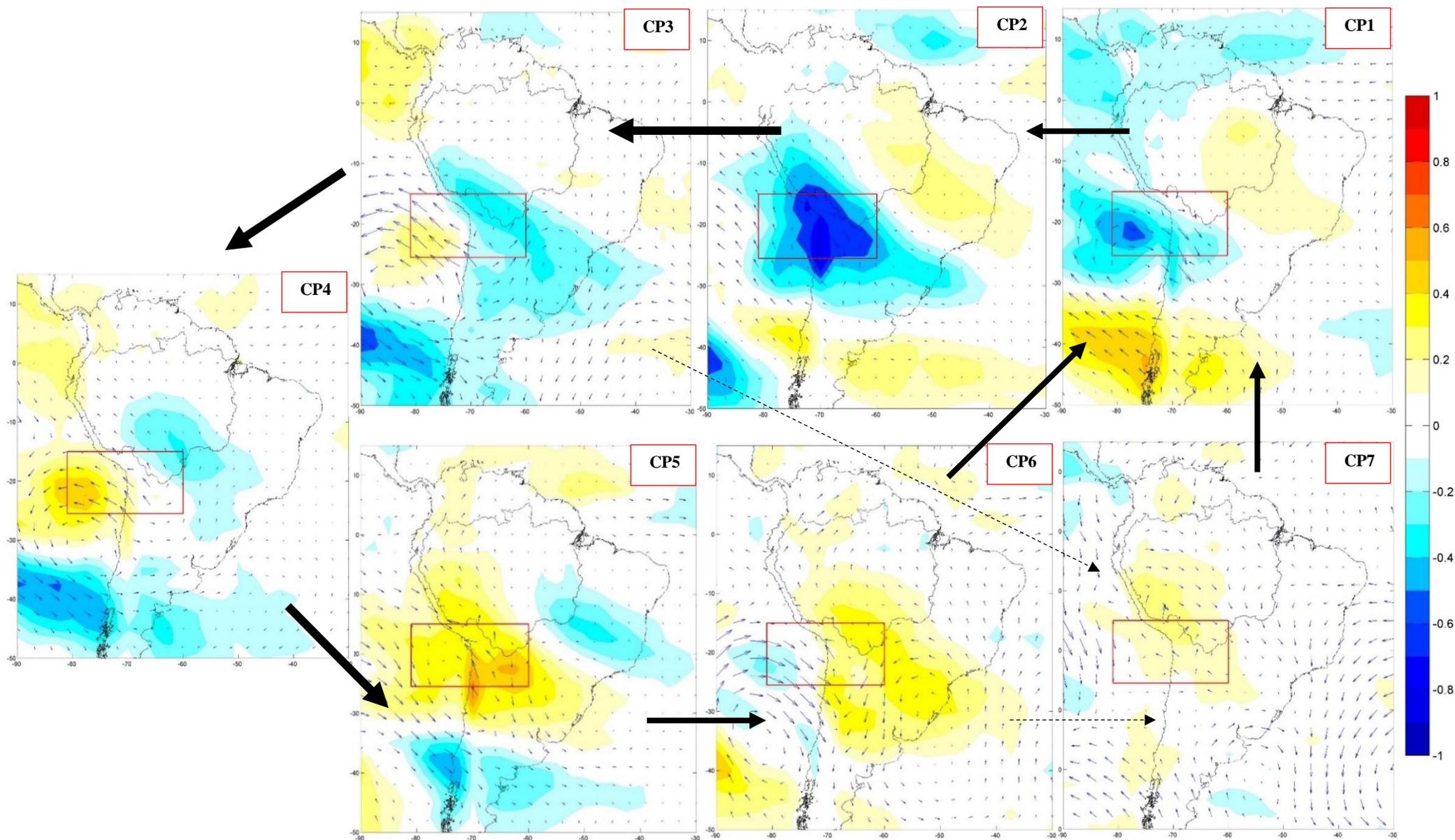


Figura 40: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia.

4.4.4 Primavera – SON

La carta de la Figura 41 muestra la precipitación en el área de interés y la contribución porcentual de precipitación significativa al 90 por ciento. En la imagen 1, se muestra días con déficit de precipitación tanto para los Andes como en el llano amazónico, esta precipitación aumenta progresivamente para los Andes (ver imagen 8 e imagen 7) sobre las estaciones. La imagen 6 muestra una ausencia de precipitaciones, estas condiciones van cambiando con el transcurso de los días, mostrando un incremento en las precipitaciones ubicadas en la Amazonía (ver imagen 5), este comportamiento es característico de verano y muestran ausencia de precipitación en las estaciones de los Andes, mientras que en la imagen 4 se observa una mayor contribución de precipitación para los Andes y disminución de precipitación en la Amazonía, que progresivamente se van incrementando (ver imagen 3) para que luego se observe una disminución en los Andes semejante a la imagen 5 (ver imagen 2).

Los patrones relacionados a eventos secos para la estación de primavera son el CP3 y CP8, los eventos húmedos son más comportamientos de vientos similares a verano definidos en CP2, CP5 y CP6.

La Figura 42 muestra la circulación asociada a cada patrón determinado en bajos niveles junto a la OLR y relaciona los posibles núcleos convectivos asociados. Estos resultados son complementados con la información en el Anexo 2 donde se realizó el análisis usando la data de PISCO hasta el año 2015. Estos resultados pueden ser revisados en el Anexo 2, Figura 61 y Figura 62.

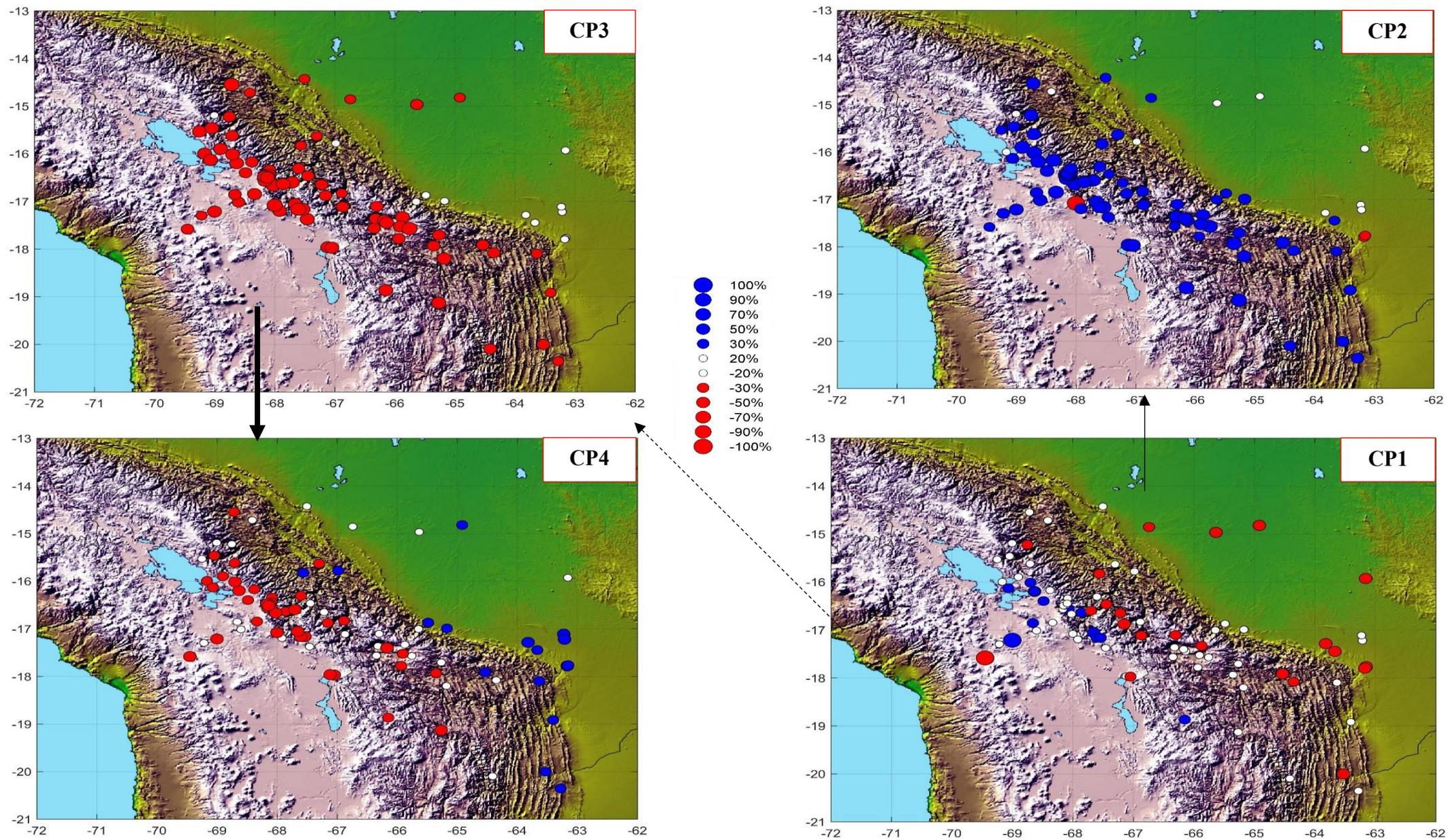


Figura 41: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el SON. (Continuación)

FUENTE: Elaboración propia.

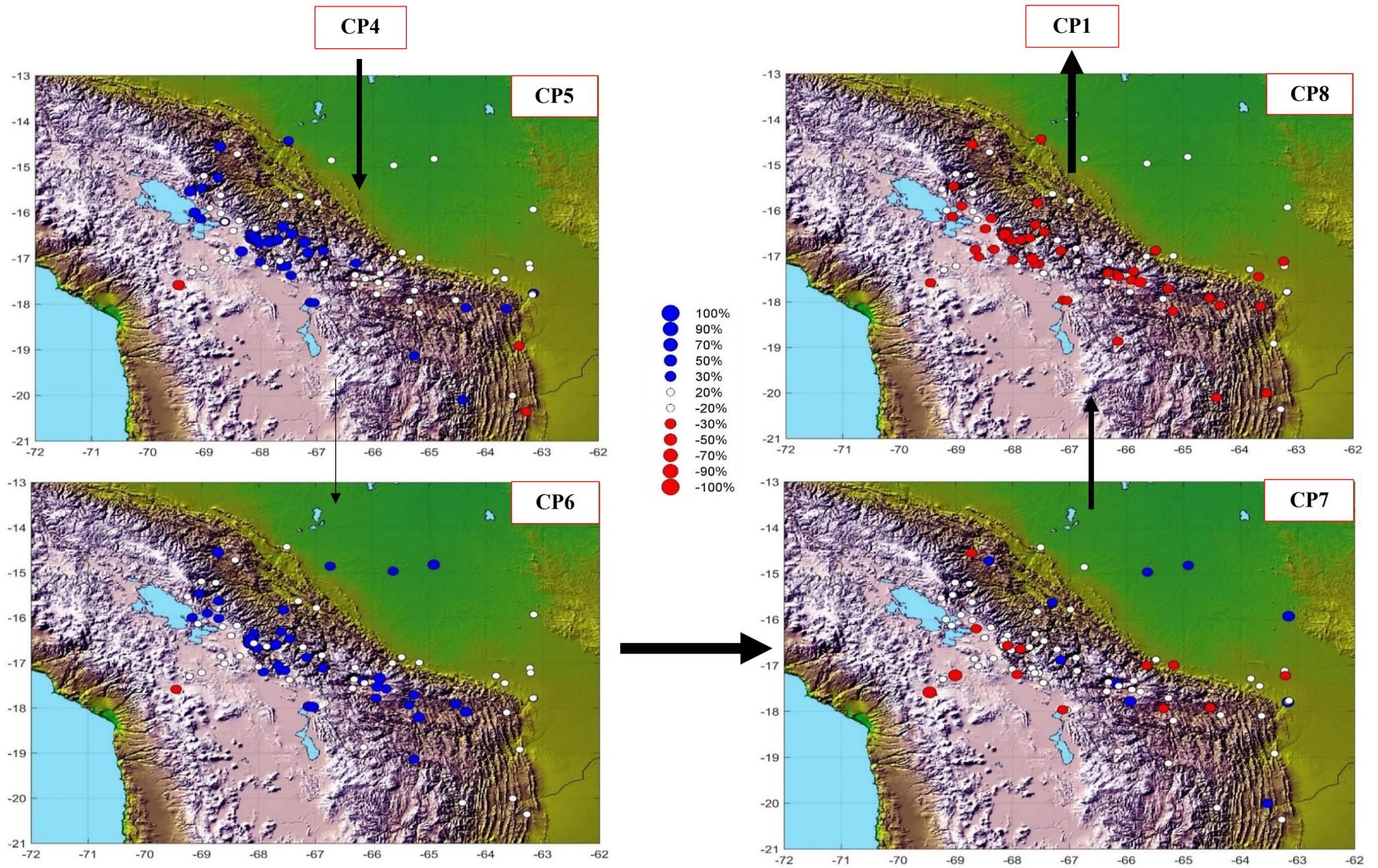


Figura 41: Porcentaje de anomalías de precipitación para las estaciones de la región del altiplano para el SON.

FUENTE: Elaboración propia.

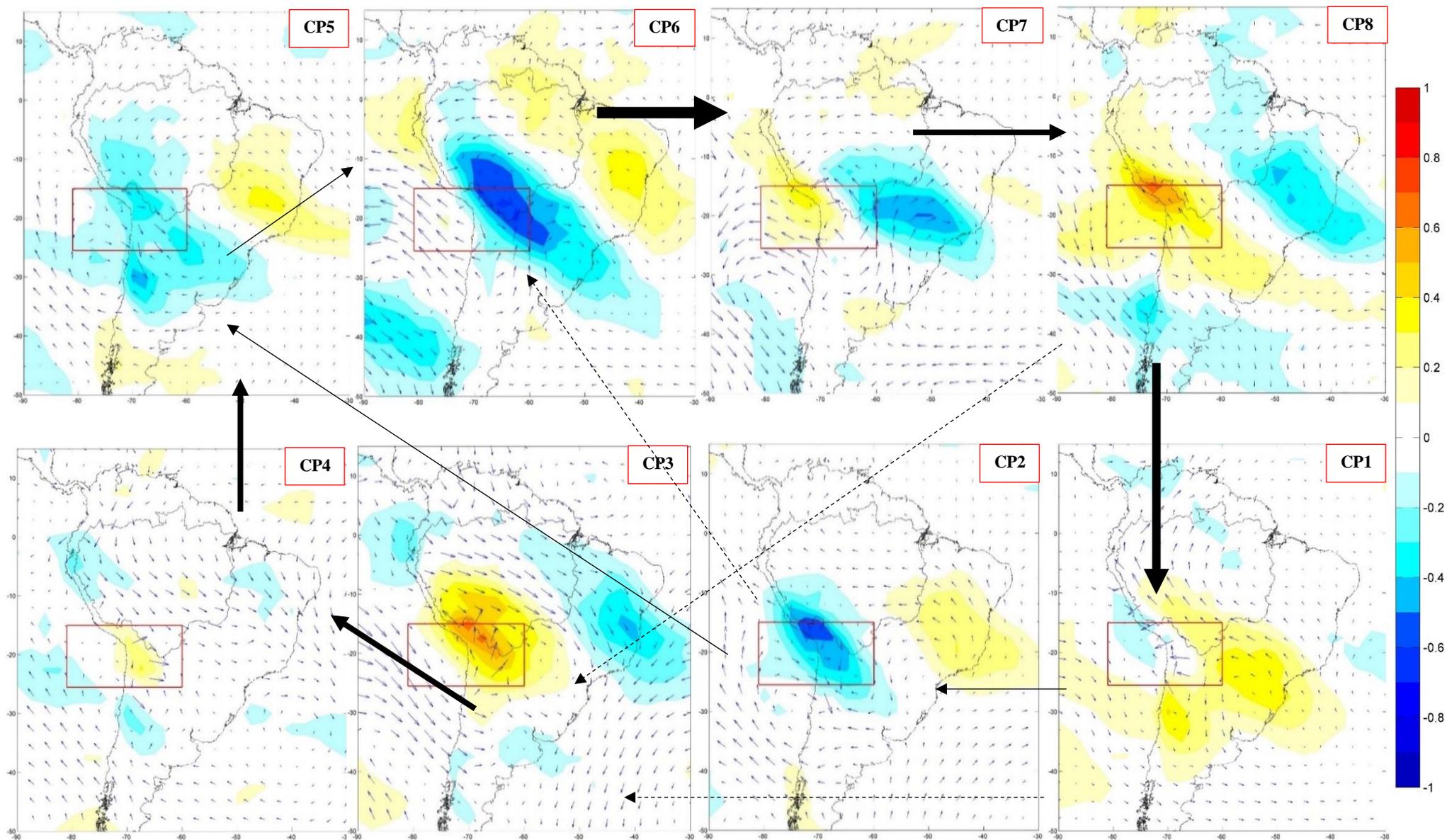


Figura 42: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y OLR. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

Las conclusiones principales de acuerdo con los objetivos específicos planteados:

1. Se determinaron patrones de circulación para las 4 estaciones del año usando datos de vientos horizontales a un nivel de 200 hPa en el área comprendida entre 15° S – 25° S y 80° W – 60° W, los patrones determinados agrupan los comportamientos característicos asociados a la circulación atmosférica. Para la estación de verano (DEF) se determinaron 6 patrones de circulación atmosférica, para otoño (MAM) 7 patrones de circulación atmosférica al igual que en invierno (JJA) y en primavera (SON) se determinaron 8 patrones de circulación.
2. De acuerdo con el segundo objetivo se identificaron los patrones de circulación atmosférica asociados. Para la estación de verano (DEF) se identificaron 6 patrones de circulación atmosférica asociados a vientos provenientes del oeste que se van intensificando, desplazando el núcleo convectivo al noreste de Brasil y parte del norte del Perú desde gran parte de la cuenca Amazónica y la cuenca de La Plata. Para otoño (MAM) 7 patrones de circulación atmosférica predominan vientos provenientes del sureste que se van intensificando en la región del altiplano, desplazando el núcleo convectivo de la cuenca Amazónica (noroeste y sureste) y Argentina para luego debilitarse e intensificar las precipitaciones al oeste de la cuenca amazónica y altiplano.
3. En invierno (JJA) se identificaron 7 patrones de circulación atmosférica relacionados con la confluencia de vientos en el área de interés provenientes del noreste (cuenca Amazónica) y noroeste (Océano Pacífico) propicia el desplazamiento de flujos de humedad hacia el continente posicionándose en el altiplano y el llano amazónico. Para primavera (SON) se identificaron 8 patrones de circulación atmosférica los cuales muestran que los días de interés presentan una circulación ciclónica con confluencia de

vientos provenientes del noroeste y noreste desplazando los sistemas convectivos hacia el noreste de Brasil.

4. Respecto al tercer objetivo específico, se identificaron las transiciones y persistencias para los patrones con hasta 4 días de posterioridad donde los resultados para cada estación del año (verano, otoño, invierno y primavera) donde se identificó la evolución temporal y espacial de los CPs, los patrones de circulación presentan una duración de hasta tres días consecutivos con el mismo comportamiento (persistencia), dependiendo de la época del año y su frecuencia, mientras que los ciclos de los CPs presentan una duración de hasta 11 días.

Para determinar la influencia de los patrones de circulación en la precipitación que corresponde al cuarto objetivo se sustenta a continuación:

5. En verano, hay un comportamiento dual entre los Andes y llano amazónico, el CP1 presenta precipitaciones en el llano amazónico, mientras que en las estaciones ubicadas en los Andes muestran un déficit de precipitación y el CP4 muestra un comportamiento inverso al del CP1, debido a la influencia de los vientos y el Alta de Bolivia sobre el continente, siendo este un comportamiento característico en verano, que concuerda con la presencia de la SACZ que se intensifica o debilita.
6. Para la estación de otoño, se muestra un comportamiento de núcleos convectivos desplazándose al continente, el CP3 presenta precipitaciones en las estaciones ubicadas en los Andes de la zona de interés, mientras que el patrón CP4 muestra precipitaciones en las estaciones ubicadas en el llano amazónico y próximas a la cordillera y en estaciones a menor altura ubicadas en los Andes. Mientras que, el CP6 y CP7 muestran un comportamiento inverso al CP3, es decir, déficit de precipitación en los Andes, debido al ingreso de vientos desde la cuenca de La Plata donde se intensifica la onda atmosférica que se desplaza en el continente en dirección noreste hacia la línea ecuatorial.

7. Para la estación de invierno (JJA), se considera como patrón húmedo al CP3 para las estaciones en la Amazonía y como patrón seco al CP6. En el CP1 se observa mayor porcentaje de precipitación en las estaciones de los Andes. Las cartas CP2, CP3 y CP4 muestran progresivamente el comportamiento dual característico entre los Andes y la Amazonía en el área de interés, este comportamiento es por la diferencia altitudinal y confluencia de vientos, debido a que los Andes actúan como barrera natural para el flujo de vientos y transporte de humedad.
8. Para el JJA, las ondas atmosféricas que se propagan a 200 hPa son intensas, posicionadas sobre el continente un sistema de baja presión para los CPs que muestran condiciones favorables para la precipitación, mientras que los sistemas de alta presión en el continente muestran días secos como los patrones CP5, CP6 y CP7. Este sistema está acoplado con los valores de altura geopotencial a 850 hPa en bajos niveles, propicia el proceso de mezcla en la vertical, favoreciendo el ascenso o descenso de vientos húmedos o secos. Los días húmedos para la estación de JJA, se muestran en los patrones CP1, CP2 y CP3 en toda el área de interés.
9. Para la estación de primavera (SON), el patrón CP2 muestra un comportamiento característico de verano. El patrón con días secos sería el CP3 y el CP8, mientras que el patrón CP6 sería un patrón de días húmedos, sin embargo, el CP2 presenta un mayor porcentaje de precipitación en las estaciones ubicadas en los Andes, debido a la propagación de ondas atmosféricas que posicionan sistemas de altas y bajas presiones en el continente que favorecen la precipitación o ausencia de esta variable en la región.
10. Los núcleos convectivos relacionados con la variación de la OLR y transporte del flujo de humedad hacia el área de interés se vinculan con el movimiento de ondas planetarias en la tropósfera que activan el movimiento vertical de los vientos a causa de las perturbaciones y transporte de energía. Estos trenes de ondas se observaron en todas las estaciones del año con diferentes intensidades en el continente.

VI. RECOMENDACIONES

La técnica utilizada es muy rica en cuanto a agrupamiento y reconocimiento de comportamientos característicos, en especial si se trabaja con datos de alta resolución, es recomendable tener a disposición equipamiento computacional adecuado.

Para analizar de mejor manera los patrones que presenta días secos y días húmedos, se debe de analizar otro tipo de variables como humedad y variación de velocidad vertical a diferentes niveles de presión.

Se propone que a futuro este análisis se pueda acoplar a un modelo estadístico que sirva para la predicción.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Aceituno, P. 1988. On the functioning of the southern oscillation in the South American sector: surface, climate (en línea). *Monthly Water Review* (116) :505–524. Consultado 12 ene. 2015. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/citedby/10.1175/1520-0493%281988%29116%3C0505%3AOTFOTS%3E2.0.CO%3B2>
2. Aceituno, P; Montecinos, A. 1993. Circulation anomalies associated with dry and wet periods in the South American Altiplano. *In International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography* (4, 29 March – 2 , Hobart, Australia). Proceedings. Boston, MA, American Meteorological Society. p. 330-331.
3. Alvarez, M; Vera, C; Kiladis, N. 2013. Intraseasonal variability in South America during the cold season. *Climate Dynamics* (42):3253–3269. Consultado 24 jul. 2018. Disponible en DOI:1007/s00382-013-1872-z.
4. Bell, G; Bosart, L. 1993. A case study diagnosis of the formation of an upper – level cutoff cyclonic circulation over the eastern United States. *Monthly Weather Review* (121):1635-1655. Consultado 12 ene. 2015. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%281993%29121%3C1635%3AACSDOT%3E2.0.CO%3B2>
5. Bettolli, M; Penalba, O; Vargas, W. 2010. Synoptic weather types in the south of South America and their relationship to daily rainfall in the core crop-producing region in Argentina. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 60 (1):37-48. Consultado 24 jul. 2018. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/279713531_Synoptic_weather_types_in

the_South_of_South_America_and_their_relationship_to_daily_rainfall_in_the_core_production_region_of_crops_in_Argentina

6. Bishoff, S; Vargas, W. 2003. The 500 and 1000 hPa weather type circulations and their relationship with some extreme climatic conditions over Southern South America. *International Journal of Climatology* 23(5):541-556. Consultado 13 mar. 2015. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/230528093_The_500_and_1000_hPa_weather_circulations_and_their_relationship_with_some_extreme_climatic_conditions_over_southern_South_America
7. Boers, N; Bookhagen, B; Marwan, N; Kurths, J. 2013. Complex networks identify spatial patterns of extreme rainfall events of the South American monsoon system. *Geophysical Research Letters* 40(16):4386-4392. Consultado 18 ene. 2015. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/261011211_Complex_networks_identify_spatial_patterns_of_extreme_rainfall_events_of_the_South_American_Monsoon_System
8. Bonner, W. 1968. Climatology of the low-level jet. *Monthly Water Review* 96(12): 833–850. Consultado 23 abr. 2015. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-493%281968%29096%3C0833%3ACOTLLJ%3E2.0.CO%3B2>
9. Carvalho L; Jones, C; Ambrizzi, T. 2005. Opposite phases of the Antarctic oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. *Journal of Climate* 18:702–718. Consultado 23 abr. 2015. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JCLI-3284.1>
10. Carvalho, L; Jones, C; Liebmann, B. 2002. Extreme precipitation events in Southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate* 15:2377-2394. Consultado 05 de may. 2016. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%282002%29015%3C2377%3AEPEISS%3E2.0.CO%3B2>
11. Cavazos, T. 1999. Large-scale circulation anomalies conducive to extreme precipitation events and derivation of daily rainfall in Northeastern Mexico and Southeastern Texas. *Journal of Climate* 12:1506-1523. Consultado 08 jun. 2016.

- Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281999%29012%3C1506%3ALSCACT%3E2.0.CO%3B2>
12. Colle, B; Mass, C. 1995. The structure and evolution of cold surges East of the Rocky Mountains. *Monthly Weather Review* 123:2577–2610. Consultado 14 may. 2015. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%281995%29123%3C2577%3ATSAEOC%3E2.0.CO%3B2>
 13. Debortoli, N; Dubreuil, V; Funatsu, B. 2015. Rainfall patterns in the southern Amazon: a chronological perspective (1971 - 2010). *Climatic Change* 130:1480-1573. Consultado 18 jul. 2017. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/275970564_Rainfall_Patterns_in_the_Southern_Amazon_a_chronological_perspective_1970-2010
 14. Dickinson, R.E. 1987. The geophysiology of Amazonia: vegetation and climate interactions. New York, USA, Wiley. 526 p.
 15. Douglas, M; Nicolini, M; Saulo, C. 1999. The low-level jet at Santa Cruz, Bolivia, during the January–March 1998, pilot balloon observations and model comparison. Preprints. *In* 10th Conference on Global Change Studies (1, 1999, Dallas, Estados Unidos). America Meteorological Society. p. 11–12.
 16. Espinoza, J; Ronchail, J; Guyot, J. 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brasil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology* 29(11):1574- 594. Consultado 07 may. 2018. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/227733124_Spatio-temporal_rainfall_variability_in_the_Amazon_basin_countries_Brazil_Peru_Bolivia_Colombia_and_Ecuador
 17. Espinoza JC. (2009). Climate variability impacts on the hydrology of the Amazon Basin. (Impact de la variabilité climatique sur l'hydrologie du bassin amazonien). Tesis Ph.D. París, Francia, Université Pierre et Marie Curie. Consultado 10 feb. 2015. Disponible en https://ff148839-a-62cb3a1a-sites.googlegroups.com/site/jhancarloespinoza/publicaciones/ESPINOZA_THESE.pdf?attachauth=ANoY7cqPxSxq0Tpnd6xhxxcy8prUgfVI23PovCuWtVawA9OJ5pYZ0j9EUWc2AxHqqnH2Ih-7SuDk2ULerXpbYmq9A6US8PNGFQnWB9UsmnP

6hsfrUBg6osUy7yGNNVYVoSWX9MOPfEbnm4Aljt5fZLxNPxznU7ZcNhUM
WfPmzLQnFJhyMXvBAL0KmwGIhB_yXzPrI9bOpJ5oA0tDwoDx7sC mMtyh
8rU9F3QQG8KYswyEAf6Vk1AjdDjyPxQwLGC07K0a1Dgxy8&attredirects=0

18. Espinoza, JC; Chavez, S; Ronchail, J; Junquas, C; Takahashi, K; Lavado, W. 2015. Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with largescale atmospheric circulation. *Water Resources Research* 51(5): 3459-3475. Consultado 22 ago. 2017. Disponible en http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/2015/Espinoza_etal_2015_WRR.pdf
19. Espinoza, JC, Lengaigne, M; Ronchail, J; Janicot, S. 2012. Large-scale circulation patterns and related rainfall in the Amazon Basin: a neuronal networks approach. *Climate Dynamics*, 38(1):121-140. Consultado 12 abr. 2017. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/226473296_Large-scale_circulation_patterns_and_related_rainfall_in_the_Amazon_Basin_A_neuronal_networks_approach
20. Espinoza, JC; Marengo, AJ; Ronchail, J; Carpio, J; Guyot, J. 2014. The Extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters*, 9(12):124007. Consultado 23 jul. 2016. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/271850007_The_extreme_2014_flood_in_South-Western_Amazon_basin_The_role_of_Tropical-ubtropical_South_Atlantic_SST_gradient
21. Espinoza JC; Ronchail, J; Frappart, F; Lavado, W; Santini, W; Guyot, JL. 2013. The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970–2012 period: A focus on the 2012 flood. *Journal of Hydrometeorology*, 14:1000-1008. Consultado 24 jul. 2016. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/236345801_The_Major_Floods_in_the_Amazonas_River_and_Tributaries_Western_Amazon_Basin_during_the_1970-2012_Period_A_Focus_on_the_2012_Flood
22. Espinoza JC; Ronchail J; Guyot J; Junquas C; Vauchel P; Lavado W; Drapeau G; Pombosa R. 2011. Climate variability and extremes drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): understanding the exceptional 2010 drought.

- Geophysical Research Letters. 38:L13406. Consultado 04 ene. 2017. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/233835747_Climate_variability_and_extreme_drought_in_the_upper_Solimoes_River_western_Amazon_Basin_Understanding_the_exceptional_2010_drought
23. Espinoza, JC; Ronchail, J; Lengaigne, M. 2012. Revisiting wintertime cold air intrusions at the east of the Andes: propagating features from subtropical Argentina to Peruvian Amazon and relationship with large-scale circulation patterns. *Climate Dynamics* 41(7-8):1983–2002. Consultado 05 feb. 2017. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/253342089_Revisiting_wintertime_cold_air_intrusions_at_the_east_of_the_Andes_Propagating_features_from_subtropical_Argentina_to_Peruvian_Amazon_and_relationship_with_large-scale_circulation_patterns
 24. ERA-Interim (Atmospheric Data). 1979 – 2016. ERA Interim, Daily (en línea). Unión Europea, ECMWF. Consultado 22 mar. 2017. Disponible en <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>
 25. Falvey, M; Garreaud R. 2005. Moisture variability over the South American Altiplano during the SALLJEX observing season. *Journal of Geophysical Research*,110:D22105. Consultado 10 ene. 2016. Disponible en http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/altiplano_saljjex.pdf
 26. Ferreira, L; Venticinque, E; Almeida, S. 2005. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. *Dossiê Amazônia brasileira I, Estudos Avançados*, 19(53):157–166. Consultado 08 may. 2018. Disponible en http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142005000100010
 27. Gan, M; Kousky, V; Ropelewski, C. 2004. The South American monsoon circulation and its relationship to Rainfall over West-Central Brasil. *Journal of Climate* 17: 47–66. Consultado 15 set. 2017. Disponible en http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/04.22.11.10/doc/Gan_The%20South%20America%20monsoon.pdf

28. Garreaud, R. 1999. Cold air incursions over subtropical and tropical South American: a numerical case study. *Monthly Weather Review*, 127:2823-2853. Consultado 10 ene. 2016. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-493%281999%29127%3C2823%3ACAIOSA%3E2.0.CO%3B2>
29. Garreaud, R. 1999. Cold air incursions over subtropical South America: mean structure and dynamics. *Monthly Weather Review*, 128:2544-2559. Consultado 10 ene. 2016. Disponible en http://www.dgf.uchile.cl/rene/PUBS/OTHERS/cusrges_clima_MWR.pdf
30. Garreaud, R. 2000. Intraseasonal variability of moisture and rainfall over the South American altiplano. *Notes and Correspondence*, 128:3337-3346. Consultado 08 may. 2018. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/cea8/57b831f30a08944f4876bab0bd587d93a27a.pdf>
31. Garreaud, R; Aceituno, P. 2001. Interannual rainfall variability over the South American altiplano. *Journal of Climate*, 14:2779-2789. Consultado 10 ene. 2016. Disponible en http://met.dgf.uchile.cl/~rgarreau/PUBS/Altiplano_inter_JCL.pdf
32. Garreaud, R; Rutllant, J. 1996. Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el periodo 1991-1993. *Atmosfera*, 9(4):251-271. Consultado 10 ene. 2016. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/565/56509403.pdf>
33. Garreaud, R; Vuille M; Clements, A. 2003. The climate of the altiplano: observed current conditions and past change mechanisms. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 194(1):5-22. Consultado 08 may. 2018. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/247811522_The_climate_of_the_Altiplano_observed_current_conditions_and_mechanisms_of_past_changes_Palaeogeography_Palaeoclimatology_Palaeoecology_194_5-22

34. Garreaud, R; Wallace, J. 1998. Summertime incursions of midlatitudes air into subtropical and tropical South America. *Monthly Weather Review*, 126: 2713-2733. Consultado 08 may. 2018. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/15200493%281998%29126%3C2713%3ASIOMAI%3E2.0.CO%3B2>
35. Godoy, A; Campetella, C; Possia, N. 2011. Un caso de baja segregada en niveles altos en el sur de Sudamérica: descripción del ciclo de vida y su relación con la precipitación. *Revista Brasileira de Meteorología*, 26(3): 491-502. Consultado 11 nov. 2017. Disponible en http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-77862011000300014&script=sci_abstract&lng=es
36. Hewitson B; Crane R. 2002. Self-organizing maps: applications to synoptic climatology. *Climate Research*, 22(1):13-26. Consultado 07 may. 2017. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/235753687_Self-Organizing_Maps_Applications_to_synoptic_climatology
37. Hidalgo, E. 2014. Cambios en la recurrencia e intensidad de las masas de aire frío-friaje y su efecto en el comportamiento de los peces de la actividad piscícola en la carretera Iquitos - Nauta. Tesis Ing. Agro. Iquitos, Perú, UNAP. Consultado 20 oct. 2015. Disponible en http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/3345/Lisset_Tesis_Titulo_2014.pdf?sequence=1
38. Hoskins, B; Ambrizzi, T. 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50(12):1661-1671. Consultado 07 may. 2017. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0469%281993%29050%3C1661%3ARWPOAR%3E2.0.CO%3B2>
39. Hoskins, B; McIntyre, M; Robertson, W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(470):877-946. Consultado 07 may. 2017. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/227793222_On_the_use_and_significanc_e_of_isentropic_potential_vorticity_maps

40. Kohonen, T. 1984. Self-organizing and associative memory. 4th ed. Berlin, Springer-Verlag (en línea). 326 p. Consultado 14 abr. 2017. Disponible en <https://archive.org/details/SelfOrganizationAndAssociativeMemory/mode/2up>
41. Kohonen, T. 2001. Self-organizing maps. 3rd ed. Berlin, Springer-Verlag, Springer Series. 30 p.
42. Lu, E; Chan, J.1999. A unified monsoon index for South China. Journal of Climate, 12:2375-2385. Consultado 17 ago. 2017. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281999%29012%3C2375%3AAUMIFS%3E2.0.CO%3B2>
43. Marengo, J; Cornejo, A; Satyamurty, P; Nobre, C. 1997. Cold surges in the tropical and extratropical South America. The strong event in June 1994. Monthly Weather Review, 125:2759-2788,1997B. Consultado 20 oct. 2015. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%281997%29125%3C2759%3ACSTITAE%3E2.0.CO%3B2>
44. Marengo, J; Wagner, R. 2004. Climatology of the low-level jet eats of the Andes as derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: characteristics and temporal variability. Journal of Climate, 17:2261-2278. Consultado 20 oct. 2015. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%282004%29017%3C2261%3ACOTLJE%3E2.0.CO%3B2>
45. Minvielle, M; Garreaud, R. 2011. Projecting rainfall changes over the south American altiplano. Journal of Climate, 24:4577-4583. Consultado 20 oct. 2015. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JCLI-D-11-00051.1>
46. Nogues-Peagle, J; Mo, K. 1997. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. Monthly Weather Review, 125: 279-291. Consultado 22 oct. 2017. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%281997%29125%3C0279%3AAWADCO%3E2.0.CO%3B2>
47. OLR (Interpolated Outgoing Longwave Radiation, USA). 1979 – 2013. NOAA Databasic (en línea). Washington DC., USA, NOAA. Consultado 04 ene. 2017. Disponible en https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.interp_OLR.html

48. Paccini, L. 2016. Patrones de circulación atmosférica intraestacionales de macroescala en bajos niveles asociados a lluvias en la cuenca amazónica. Tesis Ing. Meteorólogo. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. Consultado 20 nov. 2017. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2015>

49. PISCO (Peruvian Interpolate data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations). 1981 – 2015. Data: Perú SENAMHI PISCO Database (en línea). Lima, Perú, SENAMHI. Consultado 10 feb. 2017. Disponible en <http://ons.snirh.gob.pe/SOURCES/.Peru/.SENAHMI/.PISCO/.Precipitation/.Monthly/.Precipitation/dataselection.html>

50. Satyamurty, P; Nobre, CA; Silva Díaz, P. 1998. Tropics South America. *In* Karoly DJ; Vincent DG. (eds.) *Meteorology and hydrology of the Southern hemisphere*. Boston, USA. *Meteorology Monograph*, 49:119-139. Consultado 23 jun. 2017. Disponible en https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-935704-10-2_5

51. Segura, H; Espinoza, J; Junquas, C; Takahasi, K. 2016. Evidencing decadal and interdecadal hydroclimatic variability over the Central Andes. *Environmental Research Letters*, 11(9):1-8. Consultado 06 ago. 2017. Disponible en <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/9/094016/pdf>

52. Seluchi, M; Saulo, C.1997. Simulación de 10 episodios de ciclogénesis costeras sobre Sudamérica utilizando un modelo regional (Simulation of 10 episodes of coastal cyclogenesis over South America using a regional model). *Meteorologica*, 22:49–66.

53. Seluchi, M; Marengo, J. 2000. Tropical-midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: climate aspects and examples of intense events. *International Journal of Climatology*, 20(10):1167-1190. Consultado 22 abr. 2017. Disponible en [https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/1097-0088\(200008\)20:10%3C1167::AID-JOC526%3E3.0.CO;2-T](https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/1097-0088(200008)20:10%3C1167::AID-JOC526%3E3.0.CO;2-T)

54. SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Bolivia)1979 – 2016. Record y ubicación de estaciones (disponible en línea). Bolivia, SENAMHI. Consultado 11 feb. 2017. Disponible en http://senamhi.gob.bo/index.php/record_estaciones

55. Sicart JE; Espinoza J; Queno L; Medina M. 2015. Radiative properties of clouds over a tropical Bolivian glacier: seasonal variations and relationship with regional atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 36:3116-3128. Consultado 22 abr. 2017. Disponible en <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/joc.4540>
56. Vesanto, J; Himberg, J; Alhoniemi, E; Parhankangas, J. 2000. SOM toolbox for Matlab 5. Report A57. Helsinki, Helsinki University of Technology, Finland. Consultado 10 ene. 2014. Disponible en: <http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox/>
57. Velazco, I; Fritsch, M. 1987. Mesoscale convective complexes in the Americas. *Atmospheric Science Letters*, 92:9591–9613. Consultado 28 mar. 2016. Disponible en DOI:10.1002/asl.401.
58. Vera, I; Vigliarolo, P. 2000: A diagnostic study of cold-air outbreaks over South America. *Monthly Weather Review*, 128:3–24. Consultado 15 may. 2018. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%282000%29128%3C0003%3AADSOCA%3E2.0.CO%3B2>
59. Wheeler, M; Kidalid, G; Webster, P. 2000. Large – scale dynamics fields associated with convectively coupled equatorial waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(5):613-640. Consultado 19 nov. 2017. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0469%282000%29057%3C0613%3ALSDFAW%3E2.0.CO%3B2>
60. Vuille, M; Ammann, C. 1997. Regional snowfall patterns in the high, arid Andes. *Climatic Change*, 36(3):413–423. Consultado 11 nov. 2016. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/226589337_Regional_Snowfall_Patterns_in_the_High_Arid_Andes
61. Vuille, M; Bradley, R; Keimig, F. 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research*, 105:12447-12460. Consultado 15 may. 2018. Disponible en <http://www.geo.umass.edu/faculty/bradley/vuille2000b.pdf>

62. Wang, H; Fu, R. 2002. Cross - equatorial flow and seasonal cycle of precipitation over South America. *Journal of Climate*, 15:1591-1608. Consultado 26 abr. 2017. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%282002%29015%3C1591%3ACEFASC%3E2.0.CO%3B2>
63. Wu, M; Chan, J. 1994. Surface features of winter mooson surges over South China. *Monthly Weather Review*, 123:662–680. Consultado 26 abr. 2017. Disponible en <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%281995%29123%3C0662%3ASFOWMS%3E2.0.CO%3B2>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1:

Evolución temporal de los patrones de circulación atmosféricos a 200 hPa en las diferentes estaciones del año

En este Anexo se observa la evolución temporal de los patrones a partir de las persistencias y transiciones para dos, tres y cuatro días posteriores a los eventos definidos para el DEF, MAM, JJA y SON. En el capítulo de Resultados se muestra las persistencias y las transiciones para cada una de las estaciones. Para el DEF muestra la persistencia y transición un día después de sucedido el evento en la Figura 31, la Figura 32 corresponde a MAM, en JJA la Figura 33 y el SON correspondiente a la Figura 34.

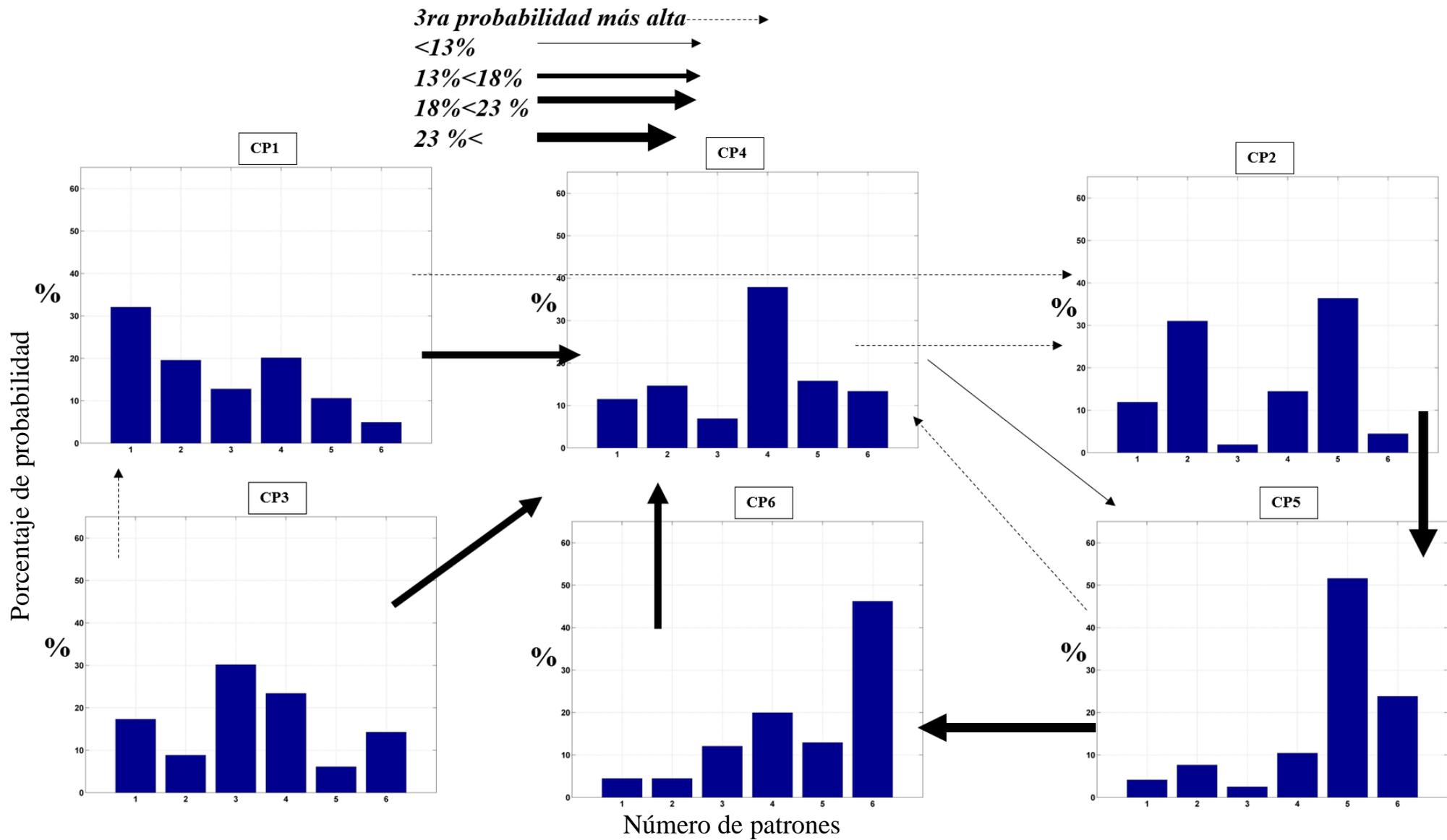


Figura 43: Probabilidad de persistencias y transiciones para dos días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en DEF. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

3ra probabilidad más alta ----->
 <13% ----->
 13%<18% ----->
 18%<23 % ----->
 23 %< ----->

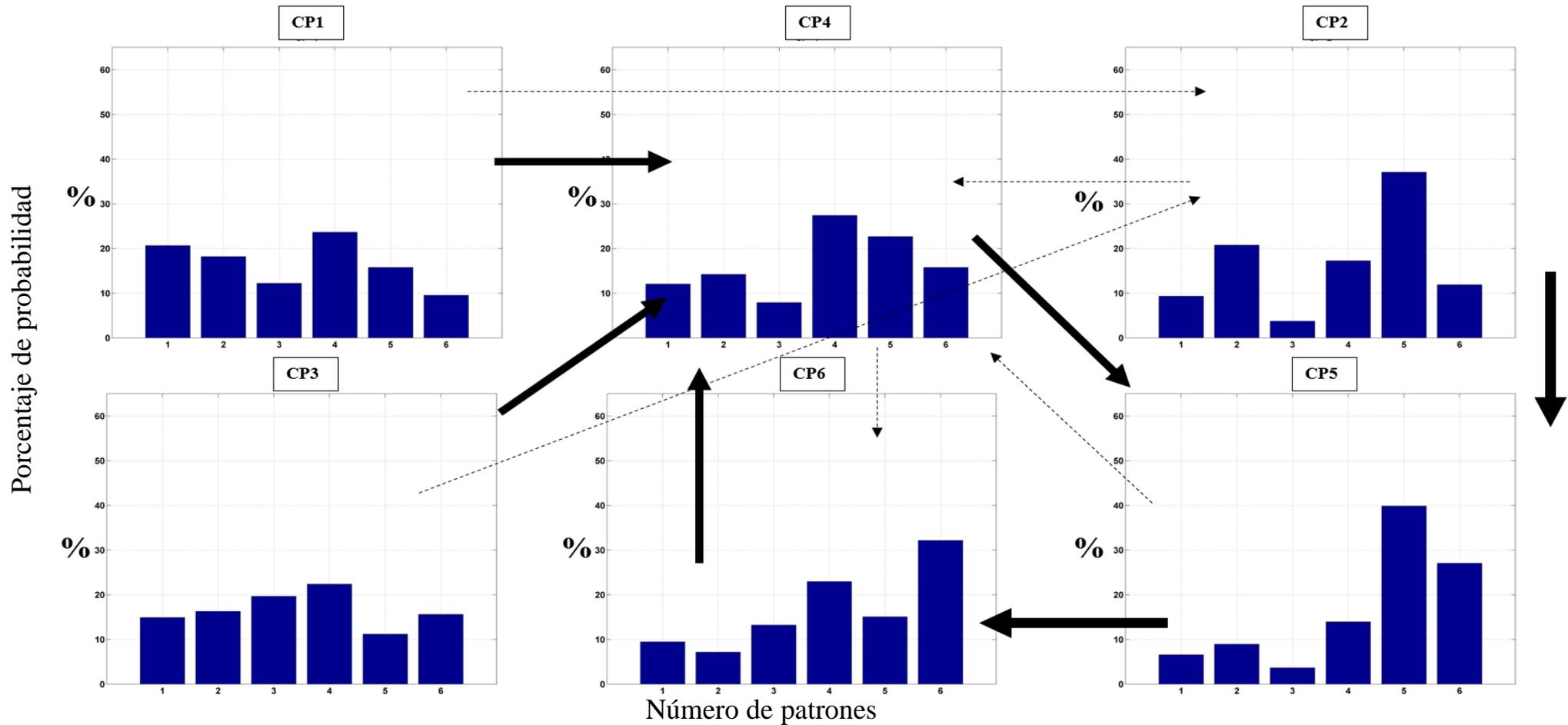


Figura 44: Probabilidad de persistencias y transiciones para tres días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en DEF. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

3ra probabilidad más alta ----->
 <13% ----->
 13%<18% ----->
 18%<23 % ----->
 23 %< ----->

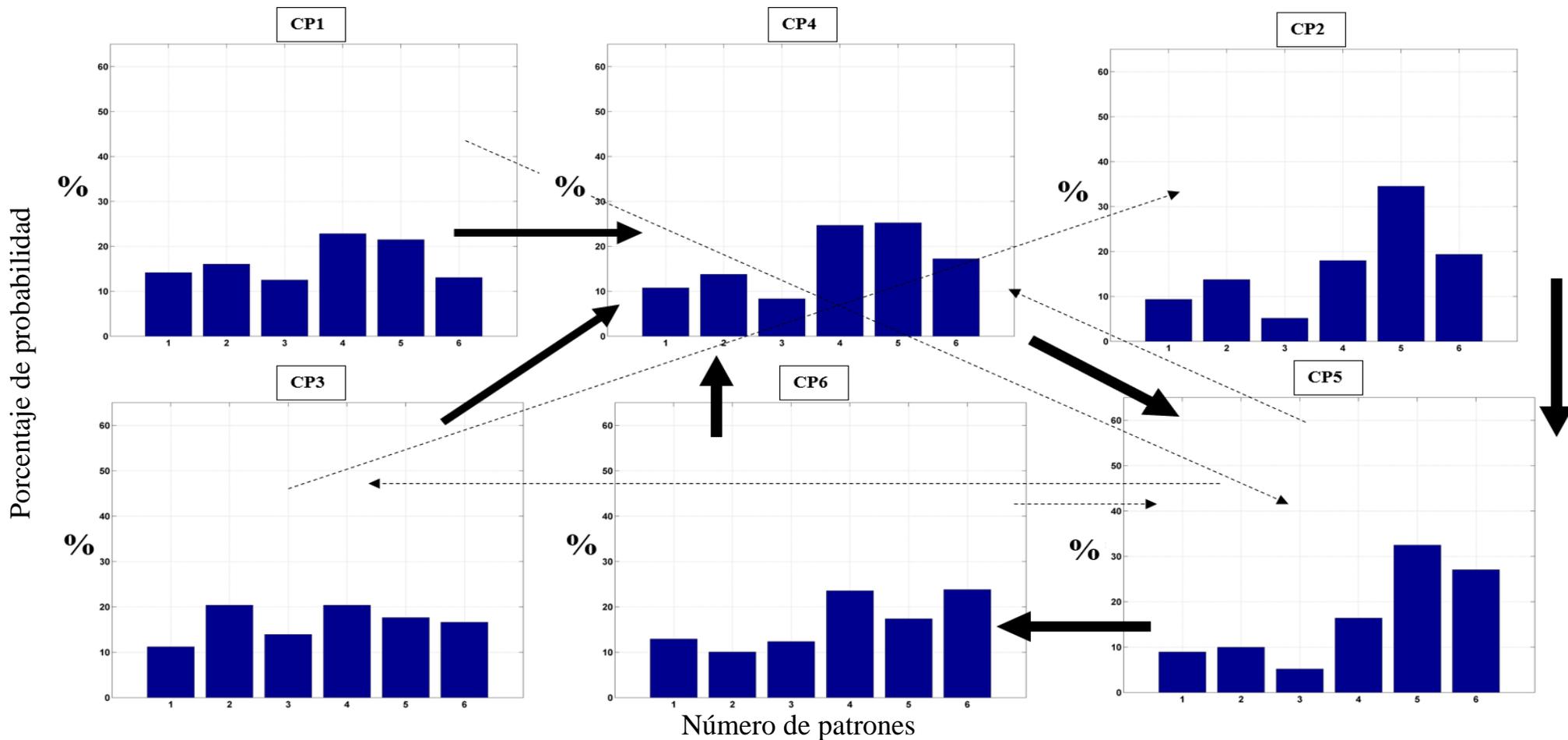


Figura 45: Probabilidad de persistencias y transiciones para cuatro días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en DEF. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

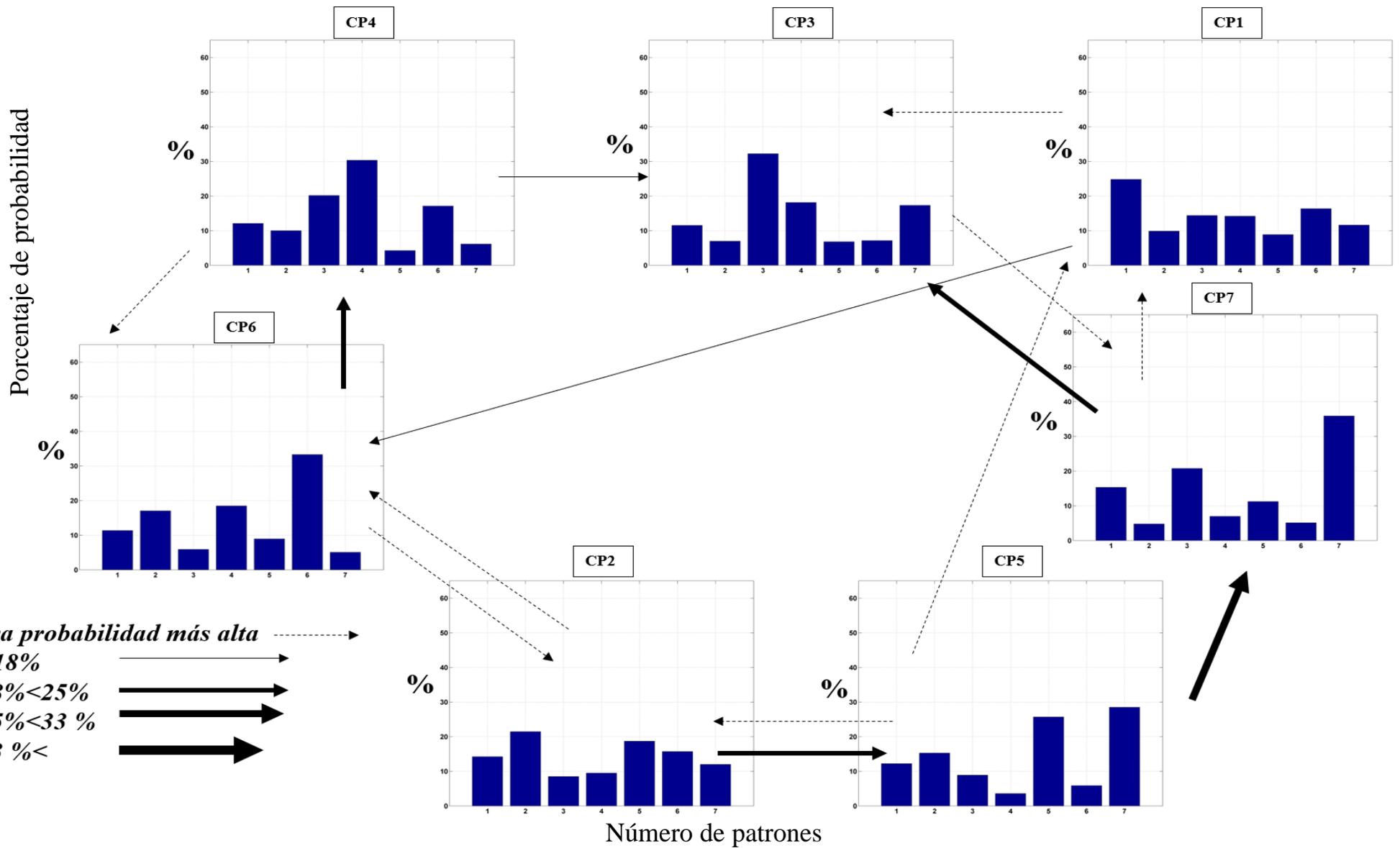


Figura 46: Probabilidad de persistencias y transiciones para dos días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en MAM. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

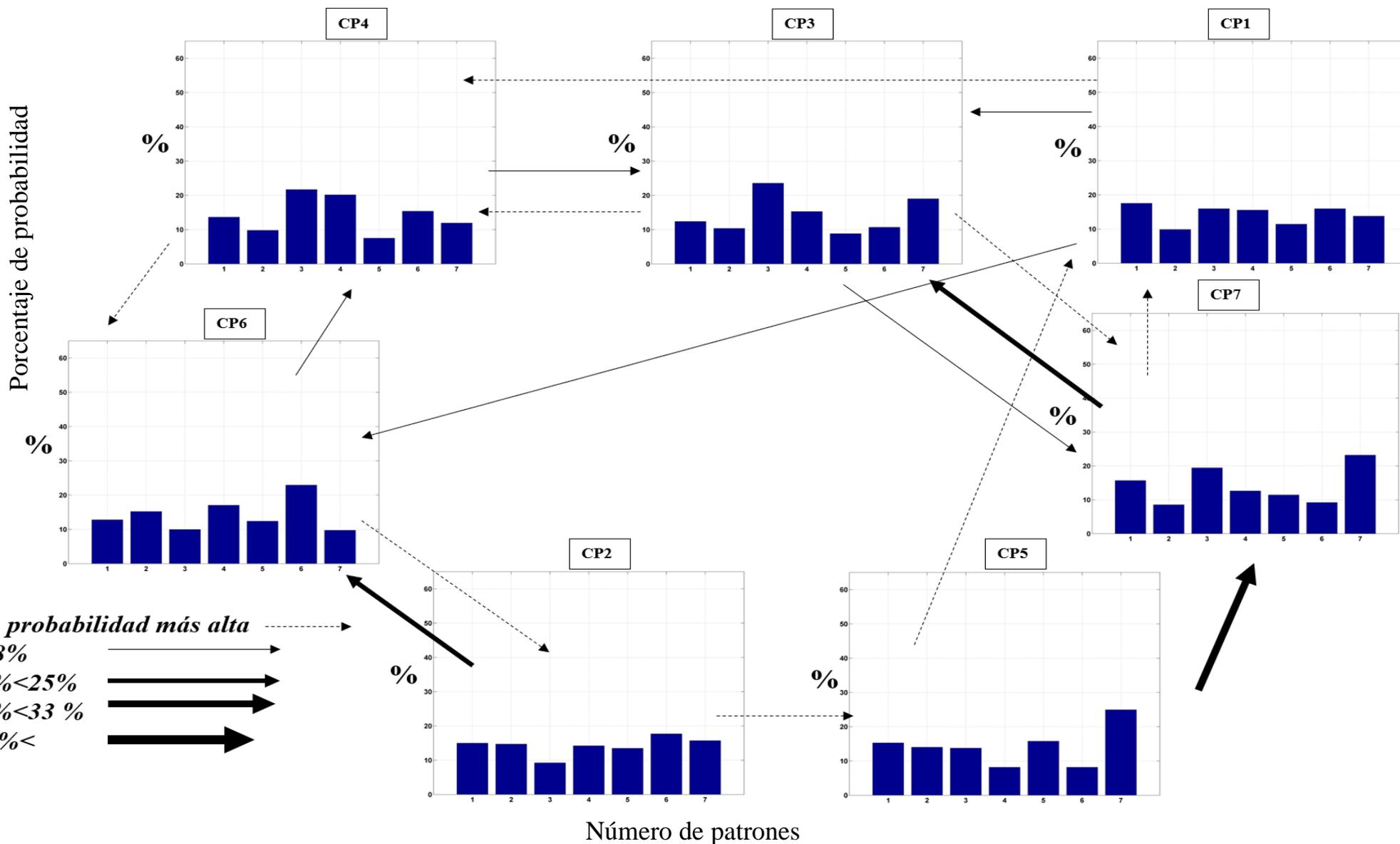


Figura 47: Probabilidad de persistencias y transiciones para tres días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en MAM. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

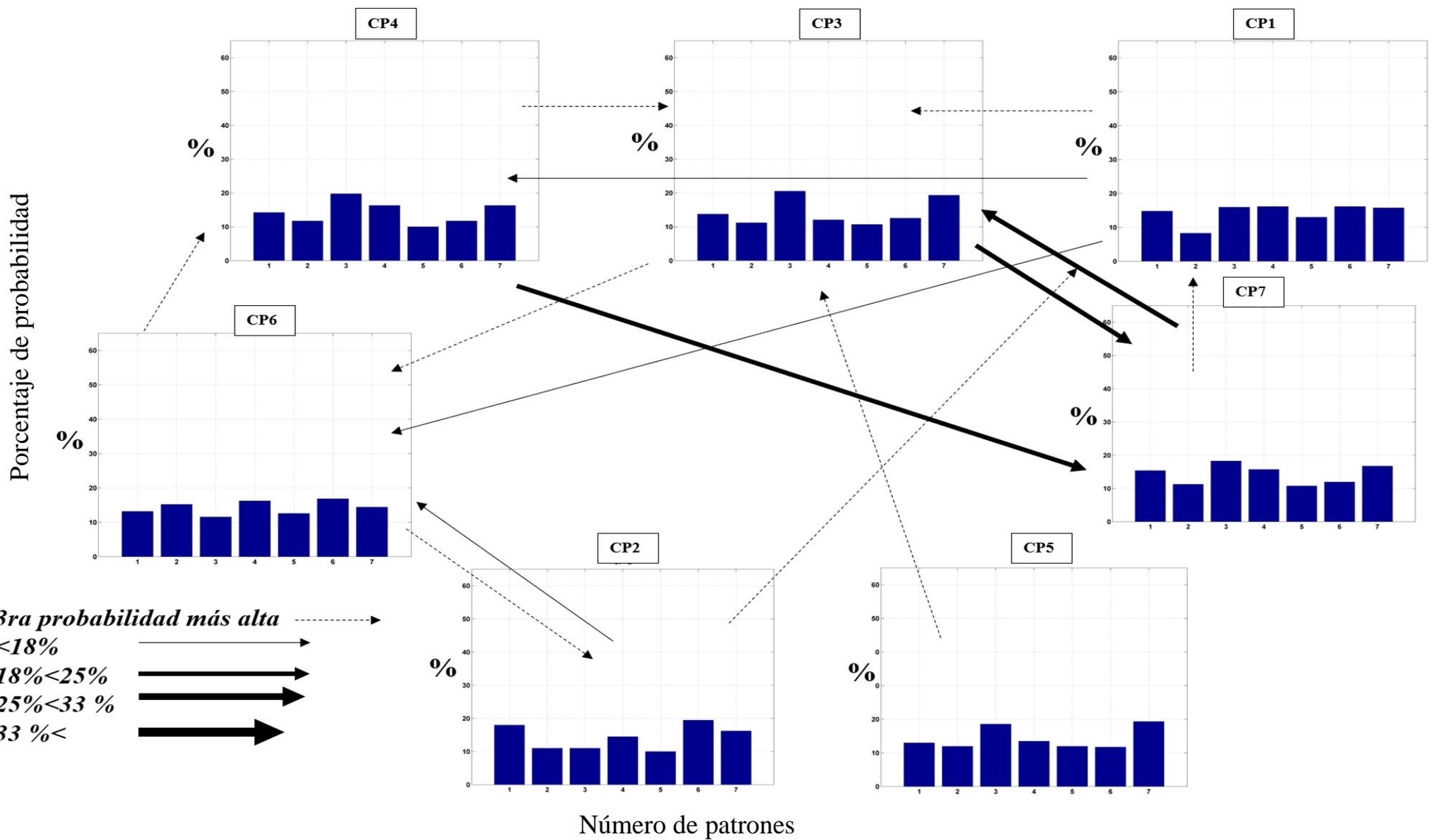


Figura 48: Probabilidad de persistencias y transiciones para cuatro días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en MAM. Tomando como referencia el CP1 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

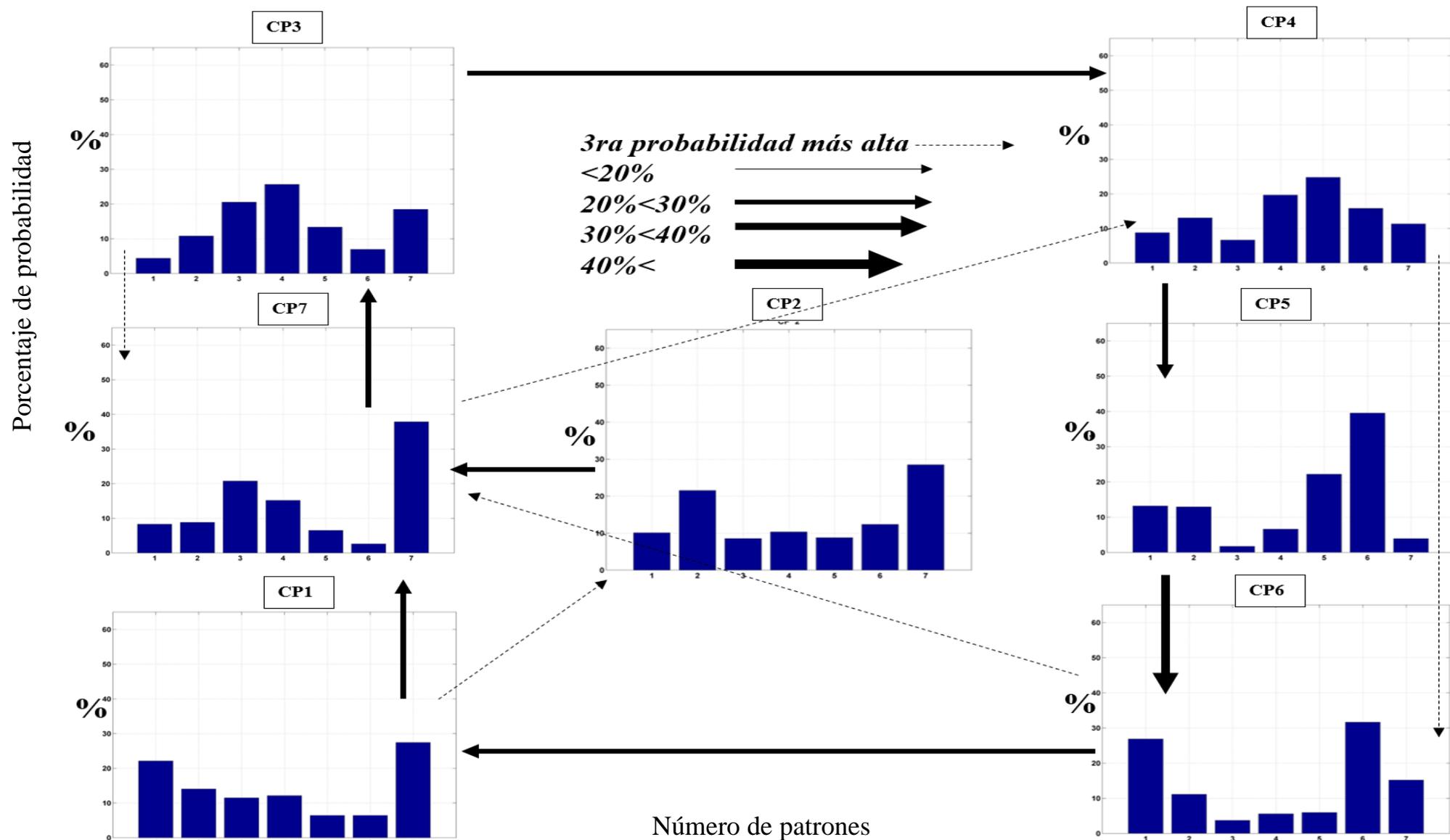


Figura 49: Probabilidad de persistencias y transiciones para dos días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en JJA. Tomando como referencia el CP7 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

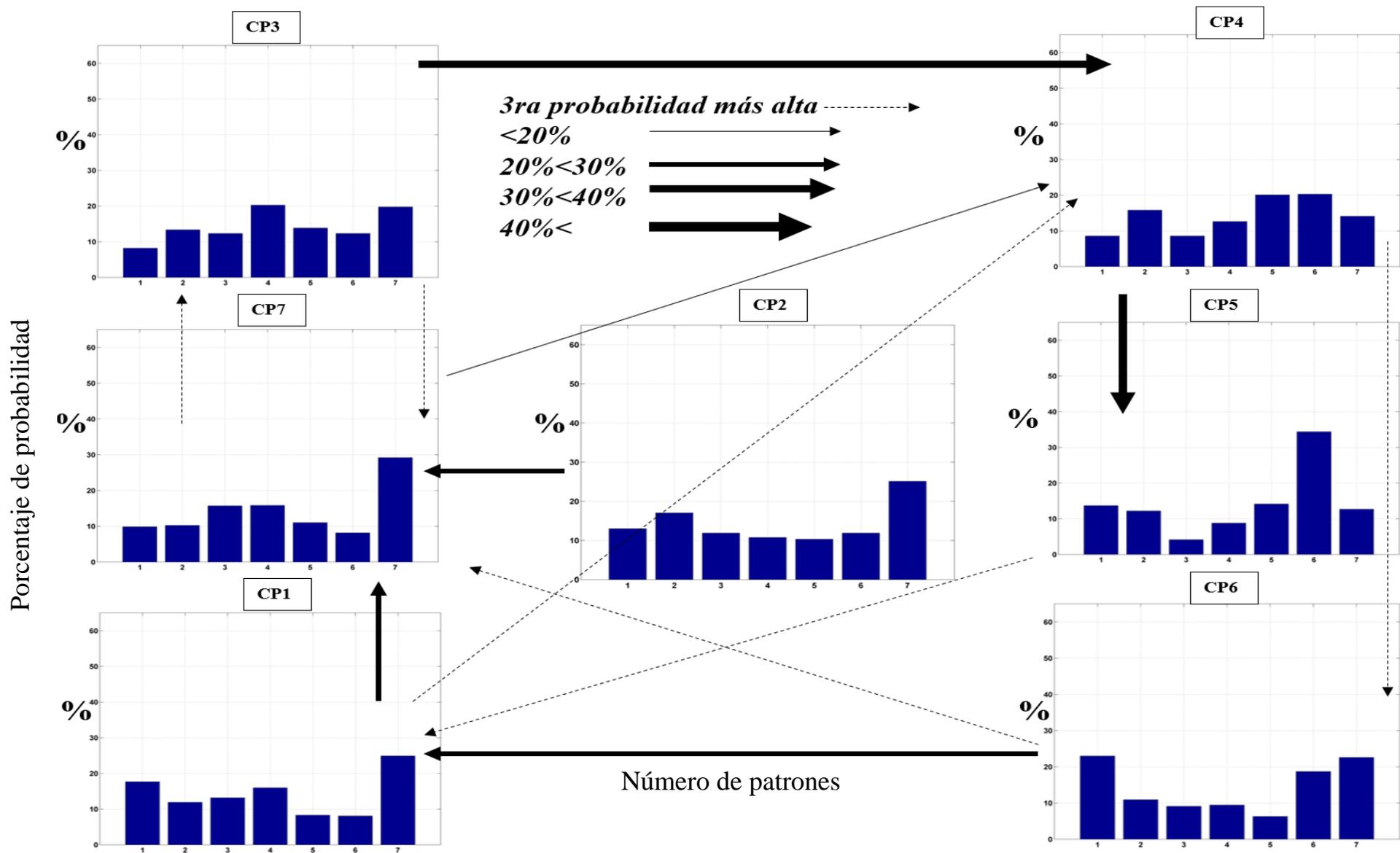


Figura 50: Probabilidad de persistencias y transiciones para tres días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en JJA. Tomando como referencia el CP7 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

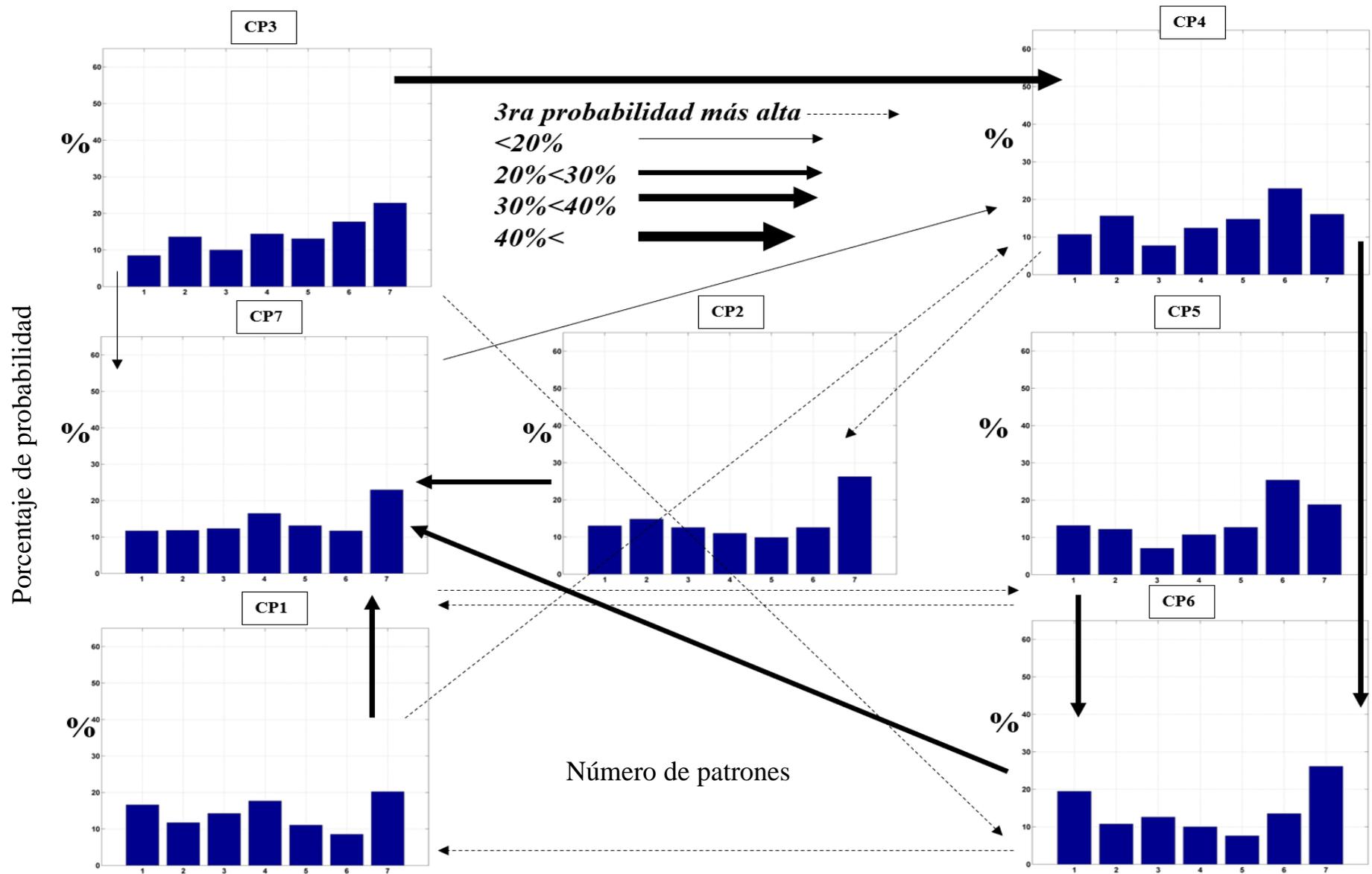


Figura 51: Probabilidad de persistencias y transiciones para cuatro días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en JJA. Tomando como referencia el CP7 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

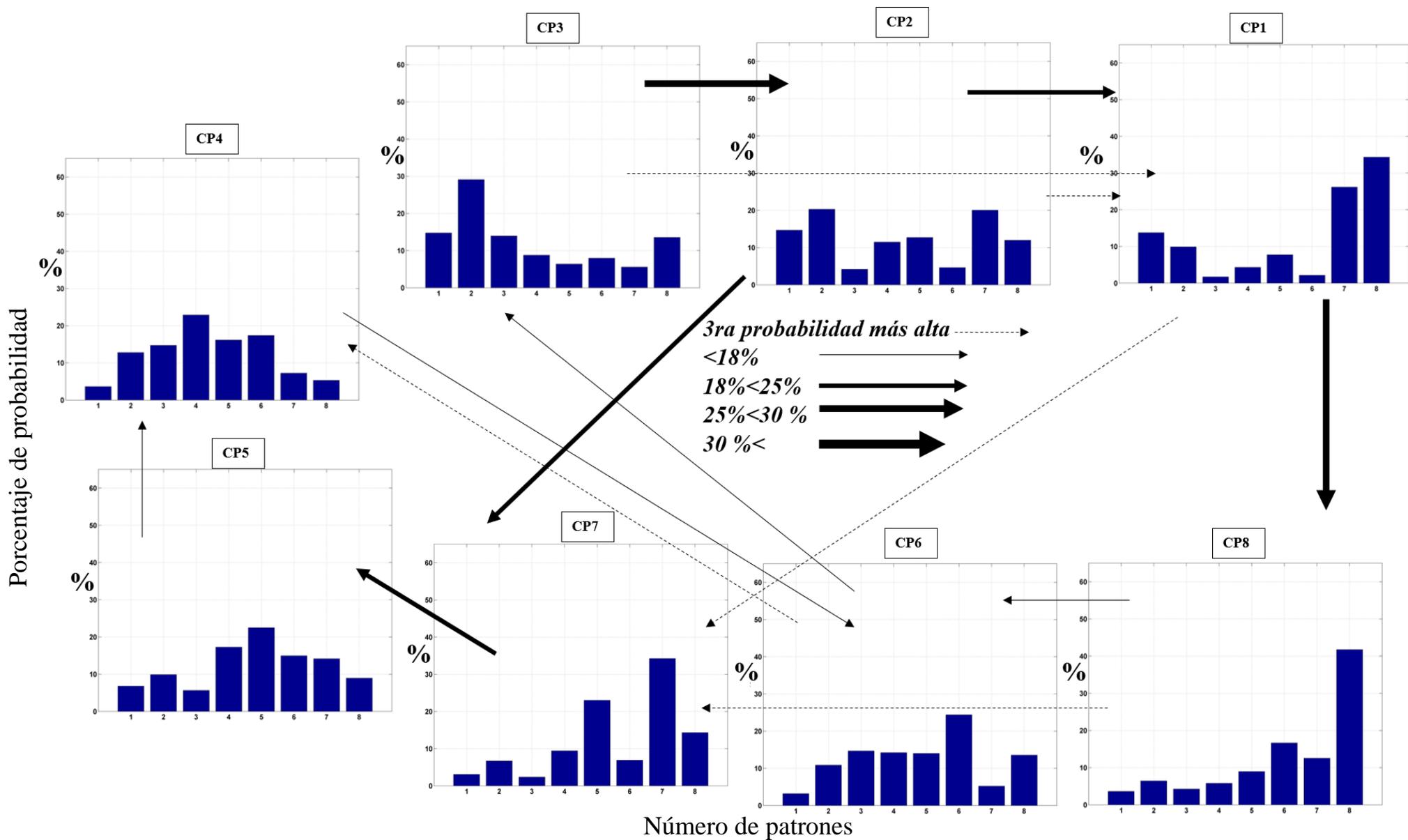


Figura 52: Probabilidad de persistencias y transiciones para dos días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en SON. Tomando como referencia el CP8 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

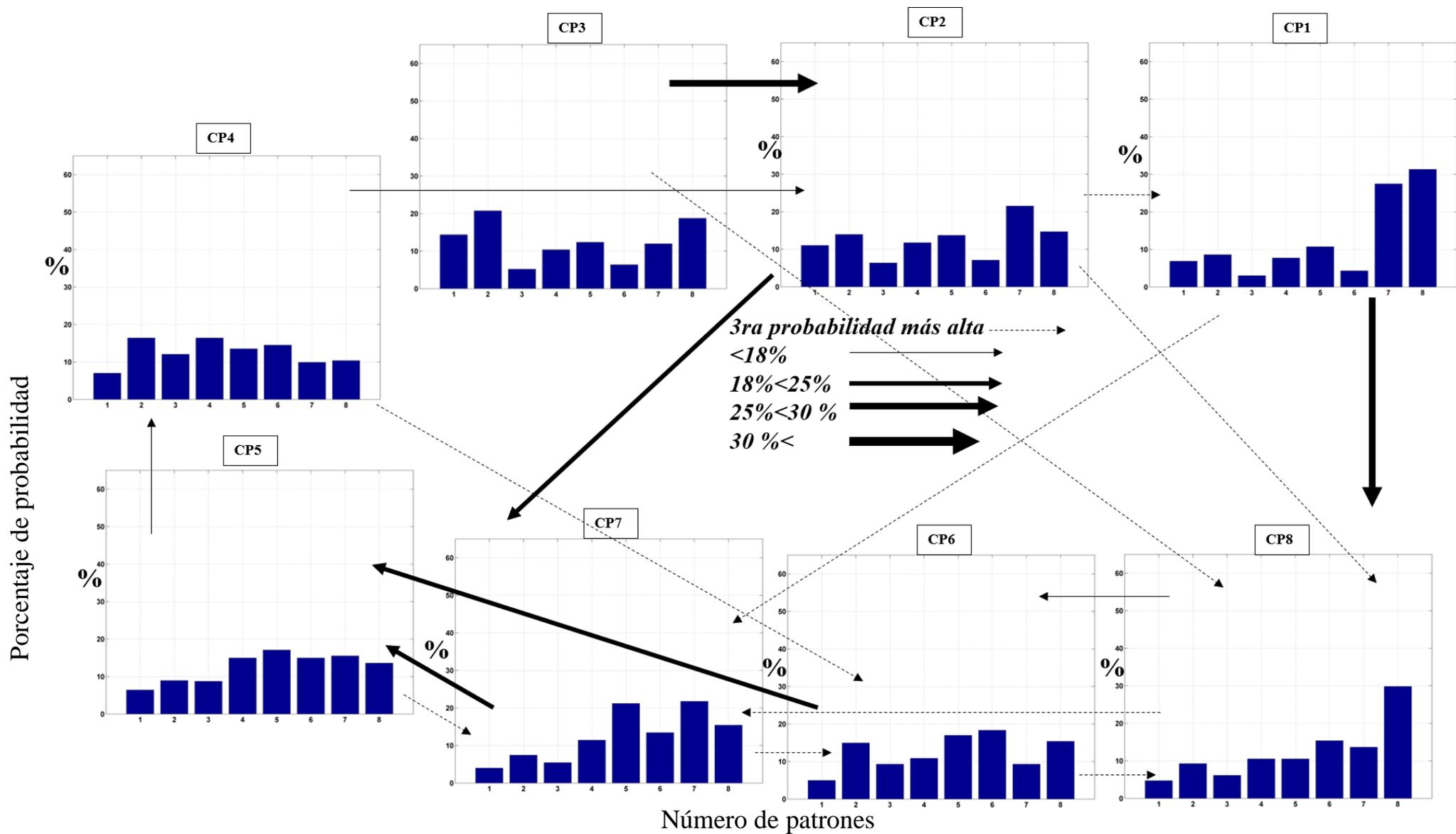


Figura 53: Probabilidad de persistencias y transiciones para tres días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en SON. Tomando como referencia el CP8 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

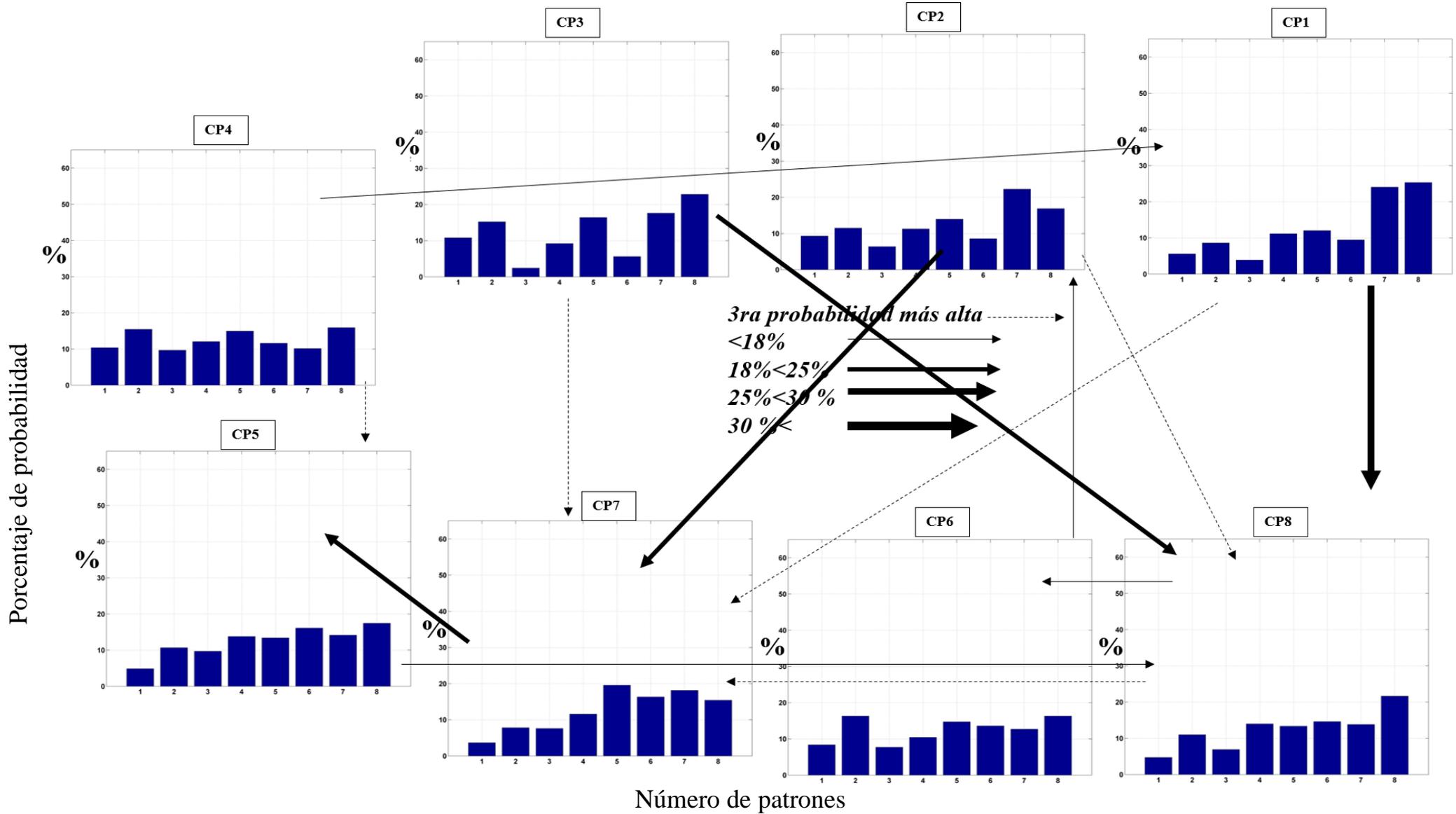


Figura 54: Probabilidad de persistencias y transiciones para cuatro días posteriores de cada patrón de circulación clasificado en SON. Tomando como referencia el CP8 como primer patrón.

FUENTE: Elaboración propia

ANEXO 2:

Análisis de precipitaciones utilizando datos de anomalía estandarizada de la base de datos PISCO - SENAMHI y anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y 850 hPa.

Analizando las condiciones de precipitación para el DEF, MAM, JJA y SON se muestra que la anomalía de precipitación estandarizada para el producto PISCO usando anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y 850 hPa respectivamente, estos valores se complementan con lo mostrado en las Figura 19 y Figura 36 para el verano, la Figura 22 y Figura 38 para el otoño, la Figura 25 y Figura 40 para el invierno y, Figura 28 y Figura 42 para la primavera.

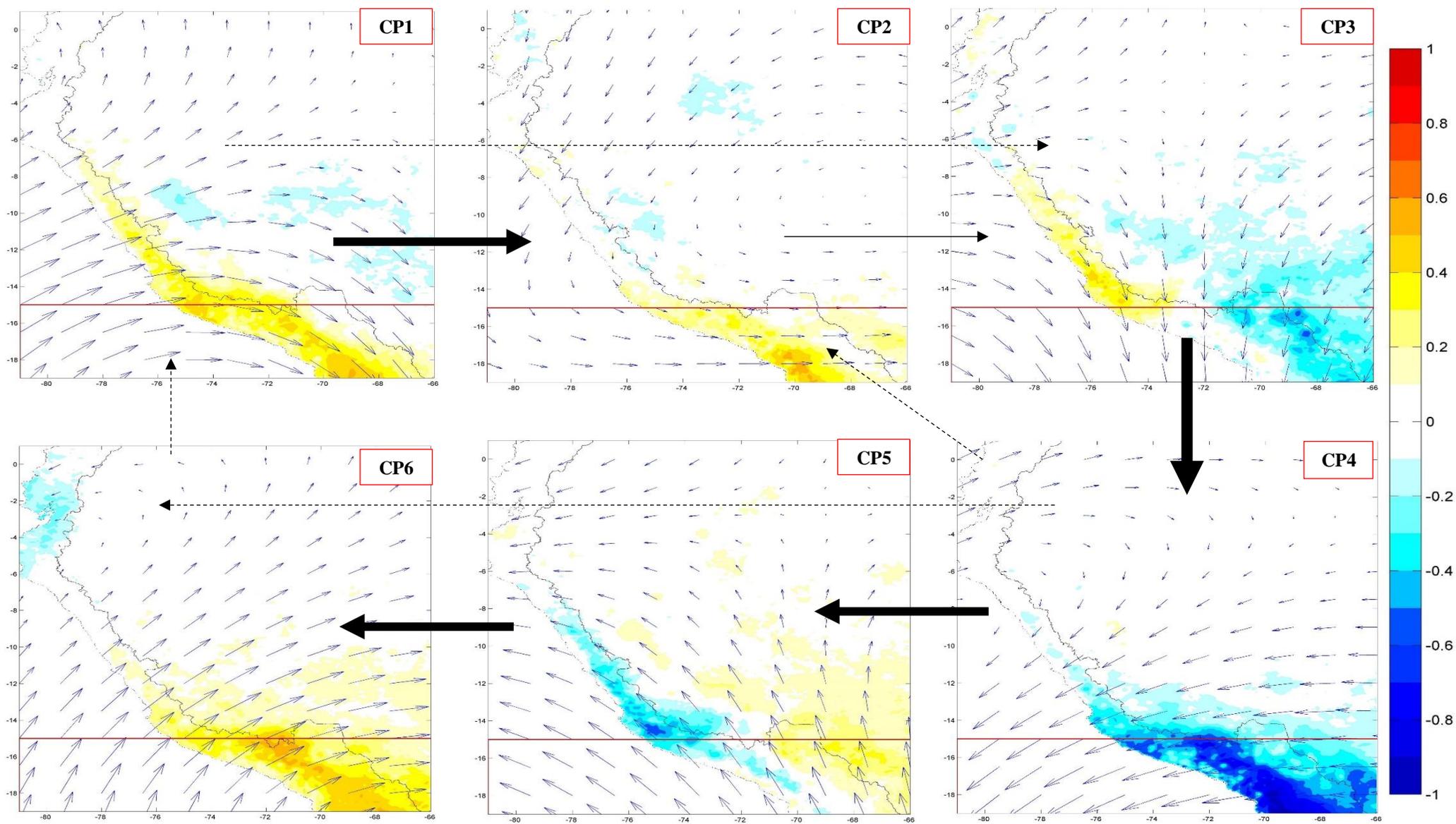


Figura 55: Patrones de circulación **atmosférica** para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y PISCO en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia

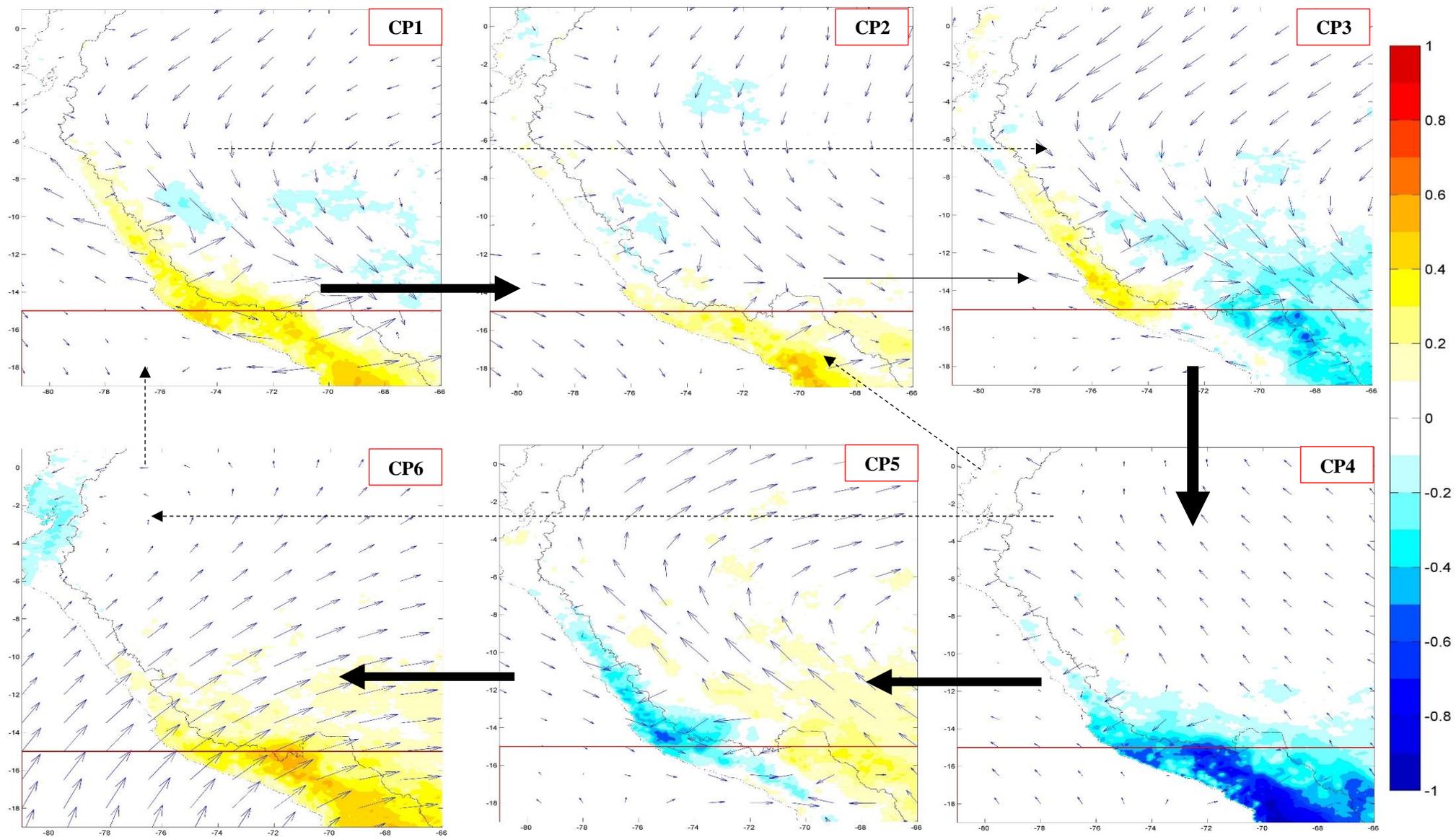


Figura 56: Patrones de circulación atmosférica para el verano (DEF) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y PISCO en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia

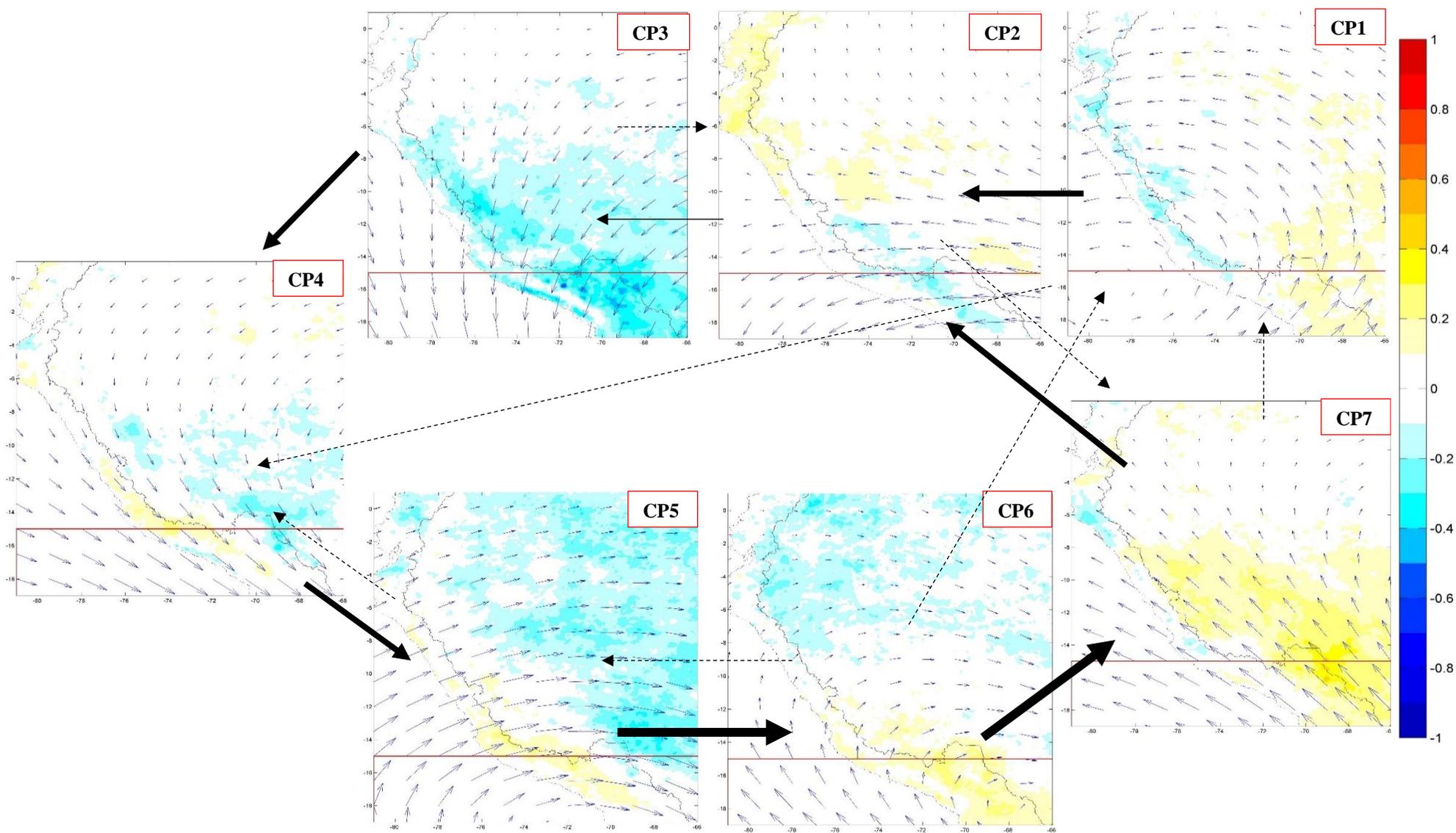


Figura 57: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y PISCO en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia

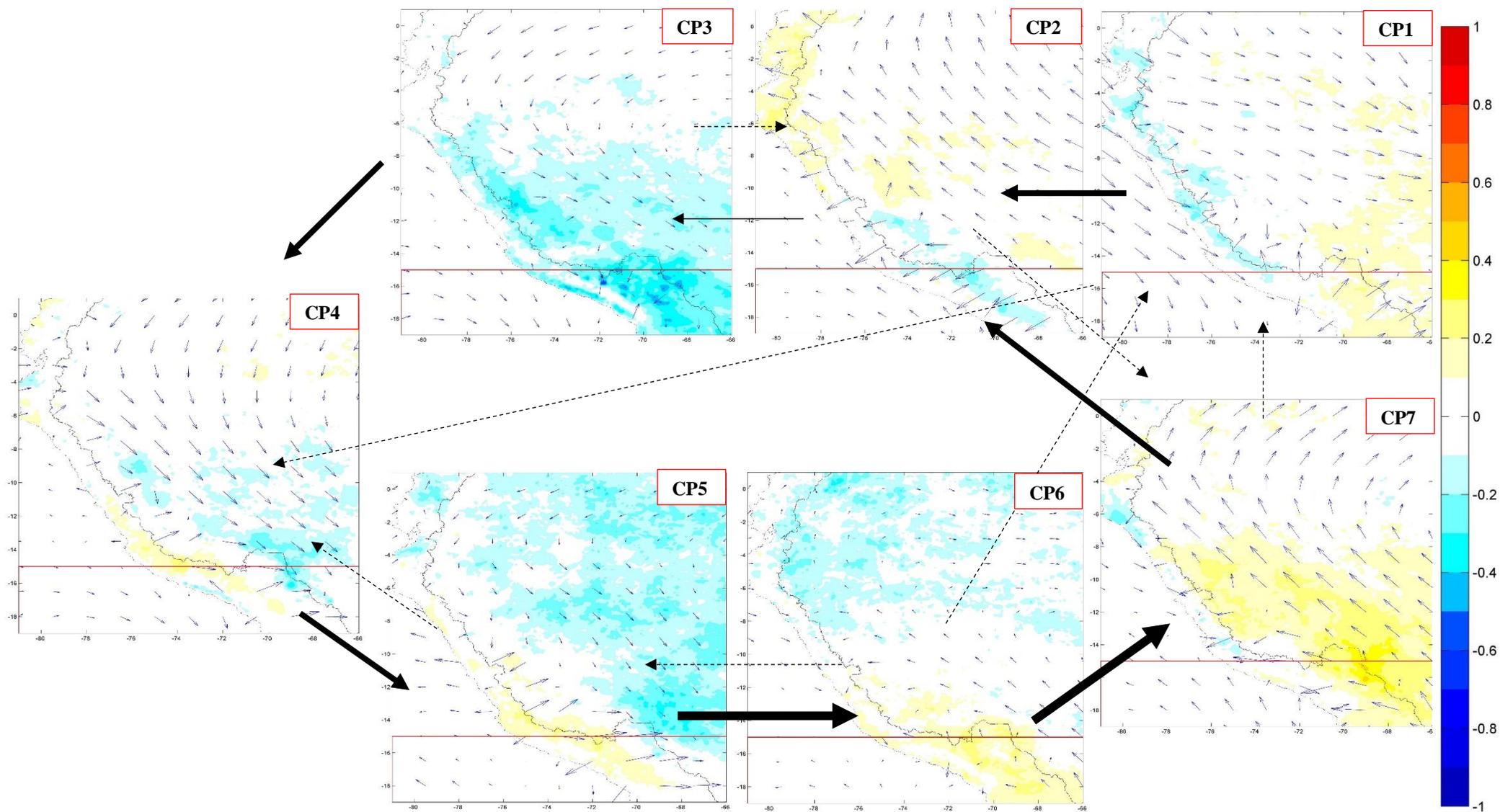


Figura 58: Patrones de circulación atmosférica para el otoño (MAM) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y PISCO en colores sólidos.
 FUENTE: Elaboración propia

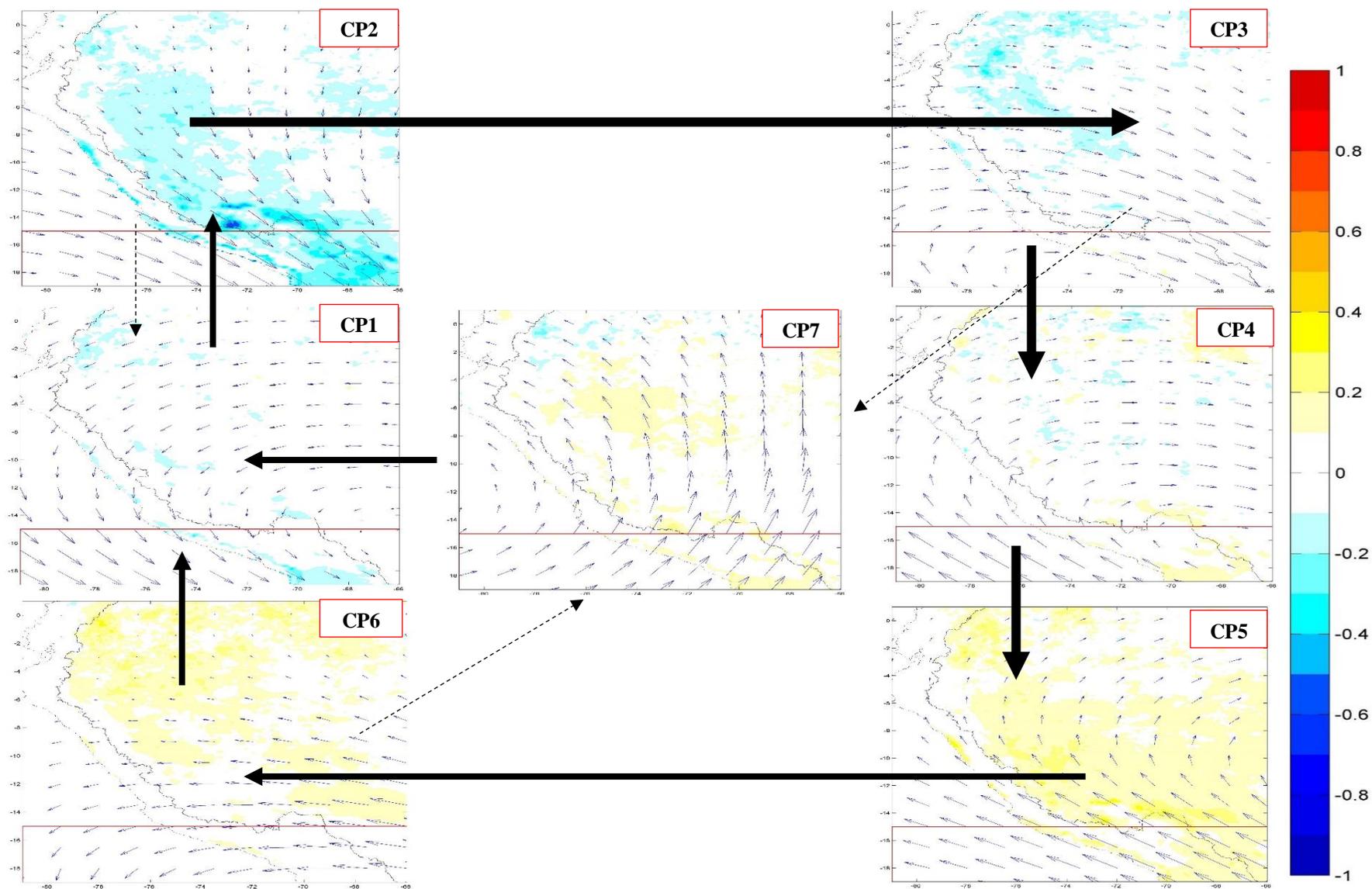


Figura 59: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia

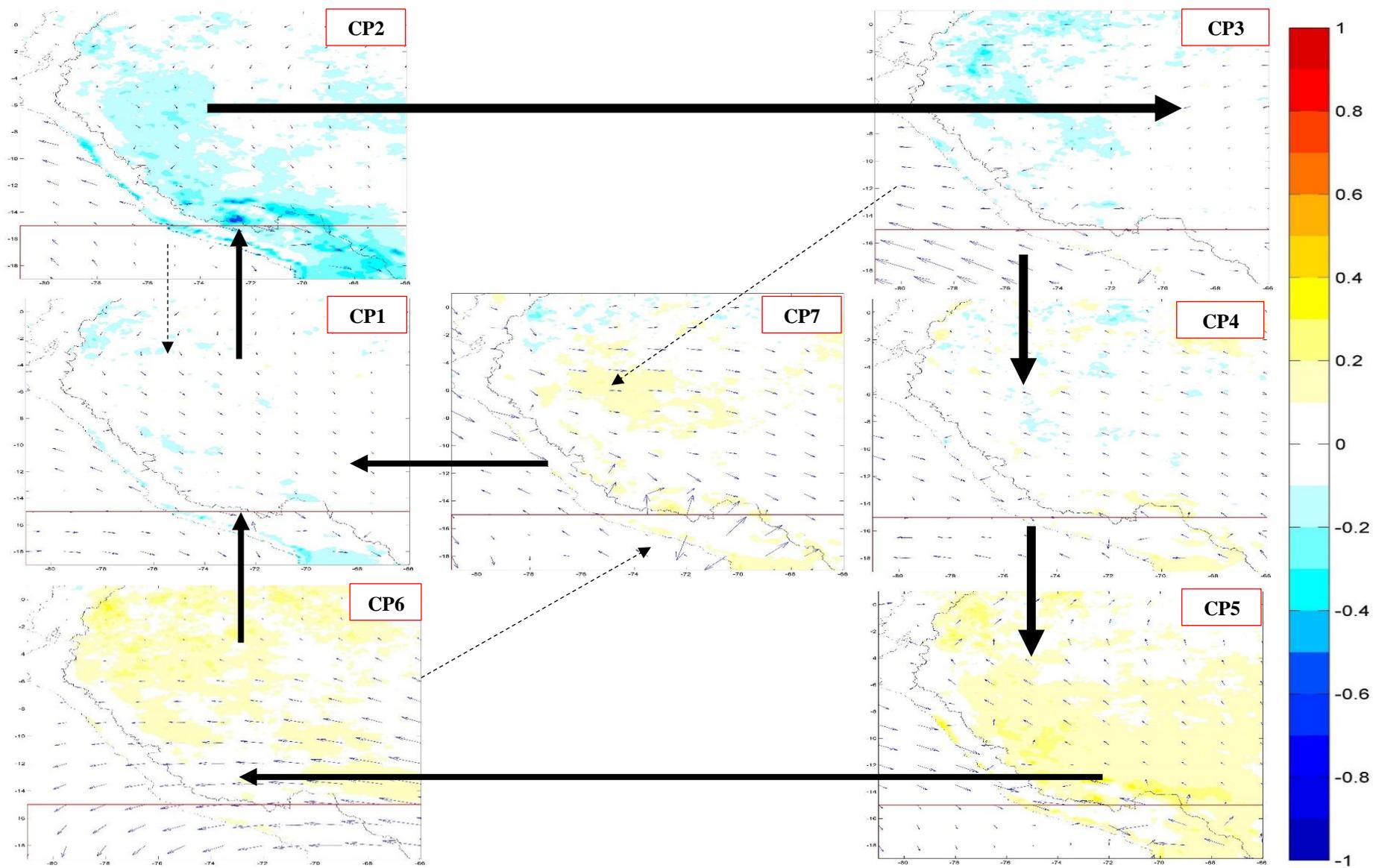


Figura 60: Patrones de circulación atmosférica para el invierno (JJA) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.
 FUENTE: Elaboración propia

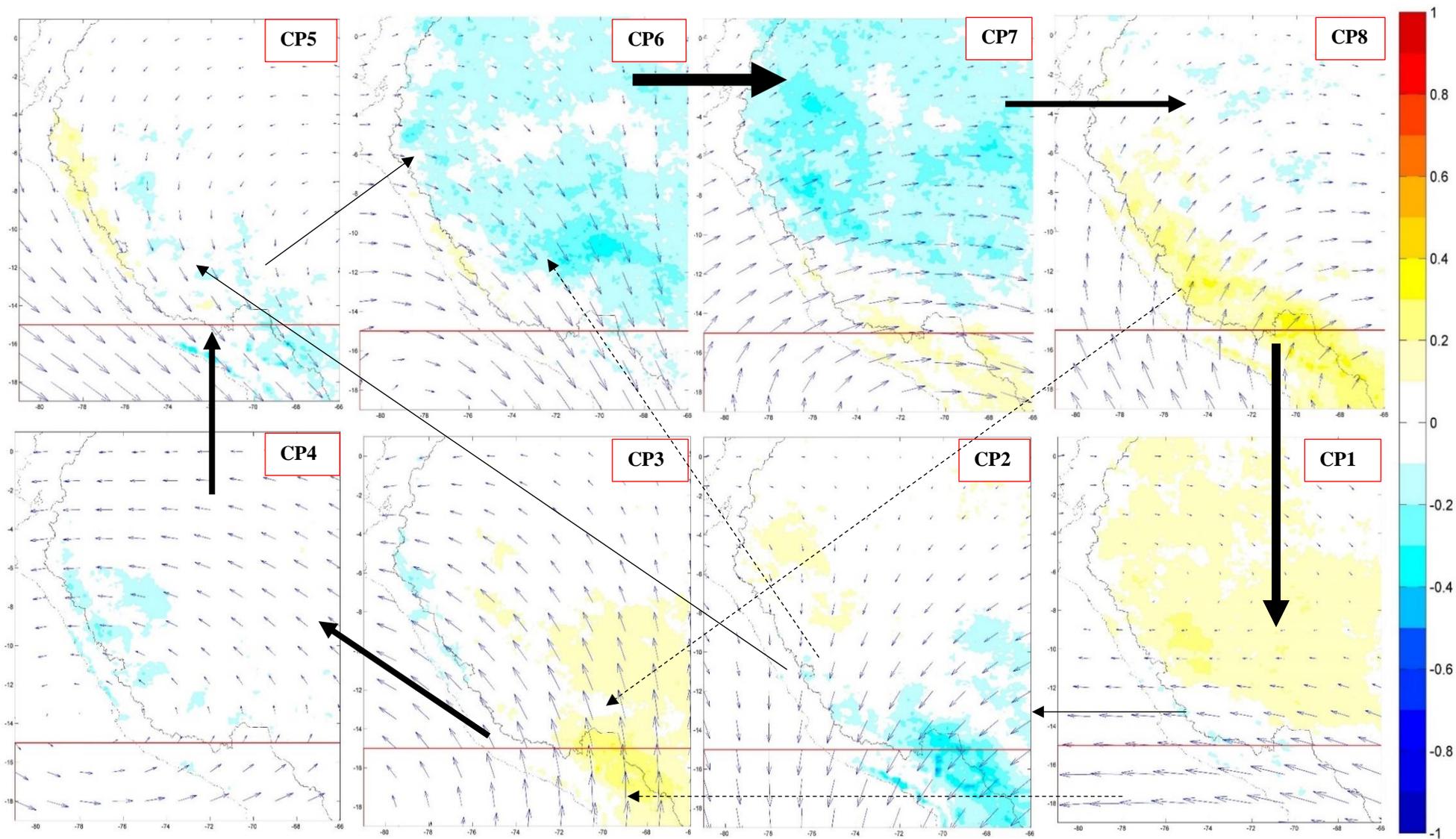


Figura 61: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de vientos a 200 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólidos.

FUENTE: Elaboración propia

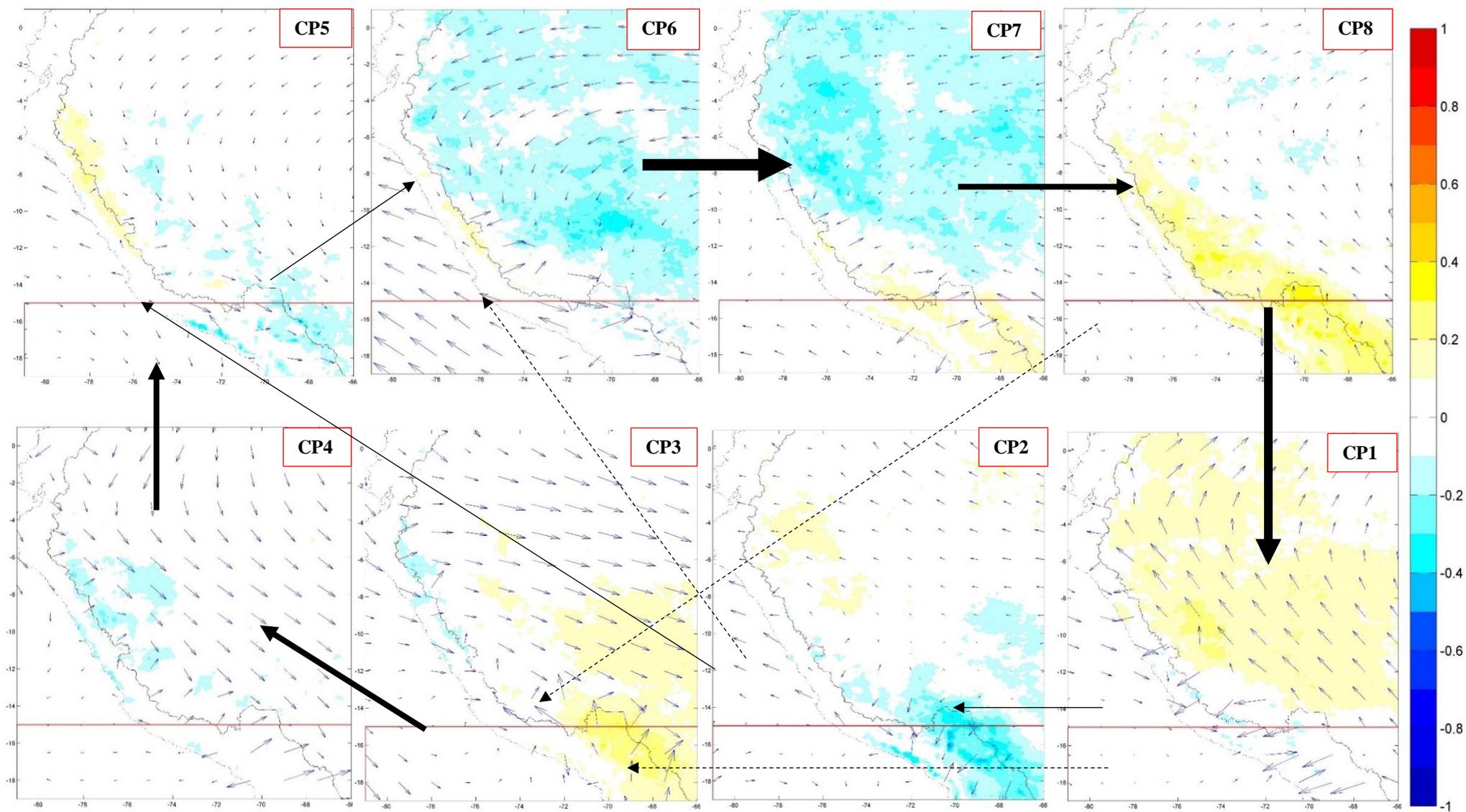


Figura 62: Patrones de circulación atmosférica para la primavera (SON) de anomalías estandarizadas de vientos a 850 hPa y precipitaciones del producto PISCO – SENAMHI. Los valores estandarizados de vientos se representan en vectores y la OLR en colores sólido.

FUENTE: Elaboración propia

ANEXO 3:

Relación de estaciones meteorológicas:

Se dispone con datos de precipitación de 173 estaciones meteorológicas de la región de estudio pertenecientes a Perú y Bolivia de 1979 al 2016 que son proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) – Bolivia y Perú con hasta el 33% de datos faltantes para cada una de las estaciones meteorológicas en la región de 14°S – 18°S Y 70°W – 62.5°W, con alturas variables desde 156 m hasta 4 460 m.

Tabla: Relación de estaciones meteorológicas en el área de interés.

ESTACIONES	LONGITUD	LATITUD	ALTURA (msnm)
ACHACACHI	-63°24'15"	-18°55'10"	440
AGUALLAMAYA	-69°0'0"	-17°13'0"	3880
ACHOCALLA	-69°0'0"	-17°13'0"	3880
AGUARAYCITO	-68°9'44"	-16°34'12"	3764
AIQUILE	-66°7'58"	-17°24'59"	2600
ALALAY	-68°9'44"	-16°34'12"	3764
ALCOCHE	-66°7'58"	-17°24'59"	2600
ANCO HUMA (ANCOHOMA)	-68°54'0"	-15°54'0"	3882
ANCOHAQUI	-65°10'43"	-18°12'11"	2255
ANGOSTODELBALA	-68°54'0"	-15°54'0"	3882
ANTAQUILLA	-65°55'58"	-17°47'0"	3762
APACHETA	-68°24'42"	-14°43'12"	3020
ARACA	-65°45'16"	-17°34'24"	1406
ARANI	-65°55'58"	-17°47'0"	3020
ARAPATA HUAYCUNI	-63°9'27"	-15°55'47"	2767
ASCENCIONDEGUARAYO	-68°24'42"	-14°43'12"	1406
ATISPAYA (MARAVILLAS)	-65°45'16"	-17°34'24"	2767
AUCAPATA	-68°0'0"	-17°4'59"	3888
AYOAYO	-63°9'27"	-15°55'47"	247
AYO AYO	-66°8'57"	-18°52'10"	3700
AYOMA	-64°24'35"	-20°6'1"	3700
BAUTISTA SAAVEDRA	-68°42'0"	-16°1'0"	2530
BELLA VISTA	-69°13'0"	-17°18'0"	3820
BELLAVISTA	-68°0'0"	-17°4'59"	3888
BERENGUELA	-63°37'59"	-18°6'0"	4145
BOLIVAR	-63°16'37"	-20°21'28"	1000
BOLINDACIMA	-64°24'35"	-20°6'1"	2530
BOLSA NEGRA	-63°40'0"	-17°27'0"	400
BUENA VISTA	-67°2'48"	-17°58'28"	3720
BUEN RETIRO	-65°15'57"	-19°7'58"	2400
CAJETILLAS	-69°13'0"	-17°18'0"	4145
CALACHAC	-63°37'59"	-18°6'0"	1000
CALACHACA	-68°4'59"	-16°34'0"	3280
"CALACOTO ""C"""	-68°45'7"	-15°13'27"	2250

<i>Continuación</i>			
CALAMARCA	-63°31'32"	-20°0'21"	798
CAMATA	-63°16'37"	-20°21'28"	800
CAMPANARIO	-65°15'55"	-17°42'36"	2400
CANASMARO	-68°35'59"	-17°1'0"	3951
CAÑAVIRI	-63°40'0"	-17°27'0"	400
CAPINOTA	-67°33'43"	-15°49'49"	900
CAQUIAVIRI	-69°27'0"	-17°12'0"	4129
CATACORA	-68°4'59"	-16°34'0"	3280
CARACATO	-63°10'1"	-17°46'58"	416
CENTRALSANTACRUZ	-68°45'7"	-15°13'27"	2250
CHACALTAYA	-66°47'40"	-17°15'48"	3780
CHAGUARANI	-69°27'2"	-17°35'9"	4057
CHAGUAYA	-65°15'55"	-17°42'36"	2400
CHALLABELEN	-68°35'59"	-17°1'0"	3951
CHARAÑA(AASANA)	-67°33'43"	-15°49'49"	900
CHARAPAYA	-69°27'0"	-17°12'0"	4129
CHARAZANI	-68°34'59"	-16°16'59"	4339
CHIGIPIÑAGRANDE	-63°10'1"	-17°46'58"	416
CHIMBOCO	-67°9'6"	-16°52'44"	2600
CHORITO	-66°47'40"	-17°15'48"	3780
CHOROCONA	-69°27'2"	-17°35'9"	4057
CHULLCUMAYU	-69°0'12"	-15°11'43"	3659
CHULIMA	-67°13'0"	-16°39'7"	2012
CHUMA	-66°10'4"	-17°24'20"	2548
CHUQUIÑA	-68°19'59"	-16°51'0"	3911
CIRCUATA	-65°28'58"	-16°52'23"	411
CUniversidad U.T.O.	-68°34'59"	-16°16'59"	4339
COCOTANI	-67°9'6"	-16°52'44"	2600
COLLANA	-64°31'59"	-17°55'5"	1614
COLOMI	-67°27'25"	-17°22'41"	3965
COLQUIRI	-69°4'0"	-16°7'59"	3815
COMARAPA	-67°13'0"	-16°39'7"	2012
CONIRI	-66°10'4"	-17°24'20"	2548
CONZATA	-67°36'5"	-16°18'39"	1788
COPACABANA	-68°19'59"	-16°51'0"	3911
COPACATI	-65°52'14"	-17°20'9"	3309
CORIPATA	-66°58'51"	-15°47'2"	500
COROMATAS	-67°27'25"	-17°22'41"	3965
CRISTAL MAYU	-68°10'9"	-16°28'55"	4100
COVENDO	-69°4'0"	-16°7'59"	3815
CUATRO ESQUINAS	-68°13'5"	-16°31'33"	4000
CURABAMBA	-67°36'5"	-16°18'39"	1788
EL ALTO - ALTO LIMA	-64°20'59"	-18°4'59"	1930
EL ALTO - VILLA ADEL	-63°10'14"	-17°48'0"	437
EL TRIGAL	-63°8'59"	-17°46'0"	398
EL CAIRO	-66°58'51"	-15°47'2"	500
EL PORVENIR	-65°38'35"	-17°0'28"	516
ESCOMA	-68°10'9"	-16°28'55"	4100
GUANAY	-68°22'37"	-16°10'30"	4460
GUAPILO	-68°13'5"	-16°31'33"	4000
HICHUCOTA	-64°20'59"	-18°4'59"	1930
HUACULLANI	-63°10'14"	-17°48'0"	437
HUARINA	-63°8'59"	-17°46'0"	398
HUAYLLAMARCA	-68°22'37"	-16°10'30"	4460
ICHUCOLLO	-66°52'0"	-17°7'0"	2788
INCACHACA	-68°37'59"	-16°12'0"	3838
INCA PAMPA	-67°8'12"	-16°53'51"	2766

<i>Continuación</i>			
IRPA CHICO	-67°26'44"	-16°28'5"	3838
IRPA IRPA	-69°10'0"	-16°0'0"	2788
IRUPANA	-69°2'40"	-15°27'56"	2766
ISICANI	-68°48'59"	-16°43'0"	1350
ITURATA	-66°52'0"	-17°7'0"	2788
JANKOCALA	-67°8'12"	-16°53'51"	2766
JATUN MAYU (LACAYAS)	-65°10'17"	-16°59'42"	254
JUANVENA	-67°26'44"	-16°28'5"	1885
KALLUTACA	-68°1'59"	-16°4'59"	2700
KELUYOCHICO	-69°10'0"	-16°0'0"	4027
KHORA	-69°2'40"	-15°27'56"	3500
KOLLUCACHI	-68°48'59"	-16°43'0"	1350
LA GUARDIA	-67°42'10"	-16°36'0"	4027
LA JOTA	-66°8'8"	-17°26'54"	3500
LICOMA	-68°8'52"	-16°27'9"	3912
LOS FIERROS	-68°5'4"	-16°20'49"	254
LAPAZ-ACHACHICALA	-67°42'10"	-16°36'0"	3365
LAPAZ-ALTOACHACH	-66°8'8"	-17°26'54"	2570
LA PAZ - ALTO VILLA	-68°5'33"	-16°26'58"	3365
LA PAZ - BARRIO MAGI	-68°9'14"	-16°29'34"	2570
LA PAZ - BELLA VISTA	-68°37'59"	-16°12'0"	3200
LA PAZ-CHICANI I	-68°8'52"	-16°27'9"	3200
LA PAZ - CHICANI	-68°7'18"	-16°30'3"	4383
LA PAZ - CHUQUIAGUIL	-68°2'49"	-16°32'0"	3420
LAPAZ-CUARTOCENTRO	-68°5'4"	-16°20'49"	4383
LA PAZ - LAIKACOTA	-68°8'4"	-16°29'35"	3658
LA PAZ - PUENTE NEGRA	-68°6'50"	-16°28'58"	3600
LA PAZ (SENA MHI)	-68°8'21"	-16°28'50"	3840
LA PAZ - TEMBLADERAN	-68°8'30"	-16°31'9"	3980
LA PAZ - VILLA COPA	-67°39'20"	-17°3'32"	2480
LA PAZ-VILLACOPA	-68°7'18"	-16°30'3"	3576
LA PAZ-VILLAVICTO	-68°2'49"	-16°32'0"	3420
LURIBAY	-68°8'4"	-16°29'35"	3658
MACARA	-68°1'18"	-16°40'18"	2680
MAPIRI	-68°6'50"	-16°28'58"	3600
MIGUILLAS	-68°8'21"	-16°28'50"	3840
MILLIPUNKU	-68°8'30"	-16°31'9"	3980
MINACHI	-63°13'35"	-17°6'56"	245
MINA CHOJLLA	-66°17'59"	-17°6'28"	3350
MINA NEVADA	-65°21'5"	-17°56'13"	2045
MISICUNI	-68°1'18"	-16°40'18"	2680
MIZQUE	-63°15'15"	-17°20'30"	3000
MONTERO (SEARPI)	-67°7'0"	-17°58'0"	3702
MOROCHATA	-66°19'6"	-17°21'57"	2530
NARANJANI	-63°13'35"	-17°6'56"	245
NAZACARA	-66°17'59"	-17°6'28"	3350
NUBE	-65°21'5"	-17°56'13"	2045
PAIRUMANI	-67°17'59"	-15°37'59"	763
PALCOHOMA	-66°20'36"	-17°33'57"	2493
PALOS BLANCOS	-68°43'0"	-14°33'0"	1500
PAMPA TAMBO	-67°55'0"	-17°12'0"	3789
PARQUELOMASDEAREN	-67°7'0"	-17°58'0"	3702
PASTO PATA	-67°51'25"	-16°38'18"	3780
PINAYA	-67°17'59"	-15°37'59"	763
PLANTACARABUCO	-66°20'36"	-17°33'57"	2493
PLANTA MIGUILLAS	-67°32'12"	-17°9'57"	3100
PLANTA HUAJI (ZONGO)	-69°15'0"	-15°31'59"	3835

<i>Continuación</i>			
PLANTA TIQUIMANI (ZONGO)	-68°28'59"	-16°23'59"	4120
POCANCHI	-68°43'0"	-14°33'0"	1500
POCONA	-67°55'0"	-17°12'0"	3789
PORTACHUELO	-67°51'25"	-16°38'18"	3780
PUCHUNI	-68°42'20"	-15°37'21"	3470
PUENTEVILLA	-63°23'29"	-17°21'7"	289
QUIABAYA	-69°15'0"	-15°31'59"	3835
QUIRIRIA	-67°30'11"	-14°25'46"	204
REYES (AASANA)	-63°12'46"	-17°13'24"	320
SAAVEDRA (CIMCA)	-67°36'29"	-17°10'4"	3500
SACABAMBAENDE	-68°42'20"	-15°37'21"	3470
SACRAMENTO CHICO	-66°44'22"	-14°51'27"	194
SAN BENITO	-65°37'56"	-14°58'7"	160
SAN BORJA (AASANA)	-66°52'59"	-16°49'59"	1220
SANBUENAVENTURA	-67°30'11"	-14°25'46"	204
SANCRISTOBAL	-63°12'46"	-17°13'24"	320
SAN IGNACIO DE MOXOS	-63°49'8"	-17°17'15"	350
SAN JOSE ALTO	-67°36'29"	-17°10'4"	3500
SAN JUAN DEL POTRERO	-65°54'16"	-17°31'42"	2550
SAN JUAN DE YAPACANI	-66°44'22"	-14°51'27"	194
SANPEDRO	-65°37'56"	-14°58'7"	160
SAN PEDRO CURAHUARA	-66°52'59"	-16°49'59"	1220
SAPAHAQUI	-63°49'8"	-17°17'15"	350
TODOS SANTOS	-64°54'59"	-14°49'23"	156
VILAQUE	-65°37'56"	-14°51'27"	140
Total: 173			