

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES Y  
CAUDALES DURANTE LOS EVENTOS EL NIÑO (1982-83 Y 1997-98)  
EN LA COSTA NORTE PERUANA”**

Presentado por:

**KAREN BEATRIZ LEÓN ALTUNA**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA**

Lima – Perú

2014

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES  
Y CAUDALES DURANTE LOS EVENTOS EL NIÑO (1982-83 Y 1997-98)  
EN LA COSTA NORTE PERUANA**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA**

**KAREN BEATRIZ LEÓN ALTUNA**

---

**Ing. SEBASTIÁN SANTAYANA V.**  
Presidente

---

**Dra. LÍA RAMOS F.**  
Miembro

---

**Ing. JERÓNIMO GARCÍA V.**  
Miembro

---

**Dr. EDUARDO CHÁVARRI V.**  
Patrocinador

---

**Dr. JHAN CARLO ESPINOZA V.**  
Co-Patrocinador

**LIMA-PERÚ**

**2014**

“I have approximate answers and possible beliefs in different degrees of certainty about different things, but I'm not absolutely sure of anything.”

*Laureate Richard Feynman.*

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Julia y Javier, y mi hermana Katia por su incondicional apoyo, esfuerzo y comprensión durante este tiempo de aprendizaje que inició con mis estudios en la carrera de Ingeniería Agrícola.

## **AGRADECIMIENTO**

La presente investigación se llevó a cabo gracias al financiamiento del Proyecto “Impacto de la Variabilidad y Cambio Climático en el Ecosistema de Manglares de Tumbes”, ejecutado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y financiado por el International Development Research Centre (IDRC) de Canadá.

Mis agradecimientos al Dr. Eduardo Chávarri, por su guía durante la realización de la presente tesis. Un especial agradecimiento al Dr. Jhan Carlo Espinoza, quien ha asesorado permanentemente la investigación por parte del proyecto Manglares. Al Dr. Ken Takahashi, director del proyecto Manglares, por los enriquecedores comentarios y sugerencias. Asimismo, a todos los compañeros y amigos del área de Clima del IGP con quienes compartí inquietudes, conocimientos y momentos muy gratos. Finalmente, pero no por ello menos importante, a mis amigos y compañeros de la carrera por los conocimientos compartidos, las aventuras y el apoyo emocional durante esta experiencia.

## RESUMEN

En la presente investigación se ha estudiado la variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones a escala interanual (periodo 1963-2009) y, posteriormente, a una escala diaria durante los eventos El Niño de magnitud extraordinaria: 1982-1983 y 1997-1998, en las regiones de Tumbes y Piura. En primer lugar, se regionalizó la precipitación a partir del Método del Vector Regional (MVR) y se calcularon diez índices de precipitación, los cuales se relacionaron con diferentes tipos de El Niño, asociados a anomalías de temperatura superficial del mar en el Pacífico Ecuatorial Central (PC) y Pacífico Ecuatorial Este (PE). Como resultado se obtuvieron dos regiones climáticas: la región costera (menor a los 500 msnm) y la región andina (mayor a 1000 msnm), donde la precipitación se encuentra principalmente asociada al calentamiento del PE y enfriamiento del PC, respectivamente. Entre los 500 a 1000 msnm no se contó con estaciones meteorológicas. Posteriormente, mediante el Análisis de Componentes Principales se obtuvieron patrones diarios de precipitación, los cuales se relacionaron con los caudales y la circulación atmosférica durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98. Los resultados del segundo modo de variabilidad mostraron dos regiones climáticas similares a las encontradas por el MVR en las que, durante los eventos El Niño, presentó un patrón espacial que opone los eventos de precipitación de ambas regiones. Asimismo, se identificó que la ocurrencia de lluvias intensas durante eventos extremos El Niño se produce durante anomalías de vientos del oeste que provocan la aproximación de la actividad convectiva (desde 140°W) hacia la costa norte peruana (80°W). Este desplazamiento es mucho más rápido durante el evento El Niño 1982-83. Estos patrones son importantes para explicar las causas de las precipitaciones extremas durante El Niño en la costa norte peruana.

*Palabras Claves: Regionalización de precipitación, índices de precipitación, patrones de precipitación diaria, circulación atmosférica, costa norte del Perú, evento El Niño.*

## ABSTRACT

In this work, we have studied the temporal and spatial rainfall variability on interannual scale (period 1963-2009) and later on a daily scale during the extraordinary El Niño events of 1982-1983 and 1997-1998, in the regions of Tumbes and Piura. Regionalized precipitation obtained from Regional Vector Method (RVM) and ten extreme precipitation indices were calculated, which were related to different types of El Niño associated with the anomalies of sea surface temperature in the Central Equatorial Pacific (CP) and Eastern Equatorial Pacific (EP). As a result, two climatic regions were obtained: the coastal region (below 500 m) and the Andean region (above 1000 m), where rainfall is mainly related to warming of the EP and cooling of the CP, respectively. Between 500 and 1000 m above sea level no information was collected. Subsequently, daily rainfall patterns obtained by Principal Component Analysis were related to discharges and atmospheric circulation. The results according to the second principal component showed two climatic regions similar to the ones found by the RVM in which, during El Niño events, a spatial pattern that opposes rainfall in both regions is presented. It was also identified that heavy rainfall during extreme El Niño events occurs due to the western winds anomalies that drive the approximation of convective activity (from 140 °W) to the Peruvian north coast (80 °W). This displacement was found to occur faster during the El Niño 1982-83. These patterns are important to explain the causes of extreme precipitation during El Niño on the northern coast of Peru.

*Keywords: Regionalized precipitation, rainfall indices, daily rainfall patterns, atmospheric circulation, northern coast of Peru, El Niño.*

## ÍNDICE GENERAL

	<i>Pág.</i>
TÍTULO .....	i
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	viii
ÍNDICE GENERAL .....	ix
TABLAS .....	xi
FIGURAS .....	xii
ANEXOS .....	xvii
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
2.1 PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA A ESCALA GLOBAL .....	4
2.2 EL FENÓMENO EL NIÑO: CONCEPTO E ÍNDICES.....	7
2.1.1 MECANISMOS OCEÁNICO-ATMOSFÉRICOS.....	7
2.1.2 EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO.....	11
2.1.3 VARIEDADES DE EL NIÑO E ÍNDICES.....	13
2.3 EFECTOS DEL FENÓMENO EL NIÑO EN EL PERÚ Y LA COSTA NORTE PERUANA .....	17
2.2.1 EFECTOS EN EL CLIMA .....	17
2.2.2 EFECTOS SOCIOECONÓMICOS .....	18
2.4 VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN EN EL PERÚ.....	21
2.5 ANÁLISIS EXPLORATORIO Y CONSISTENCIA DE DATOS.....	26
2.6 TÉCNICAS ESTADÍSTICAS MULTIVARIADAS .....	28

<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1 MATERIALES.....	31
3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	31
3.1.2 INFORMACIÓN CLIMÁTICA .....	33
3.1.3 INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA .....	36
3.1.4 EQUIPOS Y SOFTWARES .....	37
3.2 MÉTODOS.....	38
3.2.1 VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA PRECIPITACIÓN .....	38
3.2.2 VARIABILIDAD DIARIA DE LA PRECIPITACIÓN Y SU RELACIÓN CON LOS CAUDALES DURANTE LOS EVENTOS EL NIÑO 1982-83 Y 1997-98.....	45
3.2.3 LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y SU RELACIÓN CON LA OCURRENCIA DE DÍAS LLUVIOSOS Y SECOS DURANTE LOS EVENTOS EL NIÑO 1982-83 Y 1997-98.....	53
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>55</b>
4.1 VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA PRECIPITACIÓN.....	55
4.1.1 IDENTIFICACIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS.....	55
4.1.2 ÍNDICES DE PRECIPITACIÓN.....	62
4.2 VARIABILIDAD DIARIA DE LA PRECIPITACIÓN Y SU RELACIÓN CON LOS CAUDALES DURANTE LOS EVENTOS EL NIÑO 1982-83 Y 1997-98.....	77
4.2.1 PATRONES ESPACIO-TEMPORALES DE PRECIPITACIÓN DIARIA.....	77
4.2.2 RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA.....	84
4.3 LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y SU RELACIÓN CON LA OCURRENCIA DE DÍAS LLUVIOSOS Y SECOS DURANTE LOS EVENTOS EL NIÑO 1982-83 Y 1997-98.....	95
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>105</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>108</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>110</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>117</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
Tabla 1: Categorías y magnitudes de un evento El Niño acorde al Índice Costero El Niño (ICEN).....	15
Tabla 2: Ubicación de estaciones meteorológicas en la región Tumbes .....	34
Tabla 3: Ubicación de estaciones meteorológicas en la región Piura.....	34
Tabla 4: Ubicación de estaciones hidrométricas en las regiones de Tumbes y Piura .....	37
Tabla 5: Características de la información climática global.....	36
Tabla 6: Definición de índices de precipitación .....	44
Tabla 7: Lista de eventos El Niño en la costa del Perú .....	117
Tabla 8: Lista de eventos La Niña en la costa del Perú.....	118
Tabla 9: Índices de calidad por estación del Grupo 1.....	123
Tabla 10: Índices de calidad por estación del Grupo 2.....	123
Tabla 11: Resumen de las estadísticas descriptivas de los índices de precipitación para el Grupo 1 .....	124
Tabla 12: Resumen de las estadísticas descriptivas de los índices de precipitación para el Grupo 2 .....	125
Tabla 13: Valores de los vectores propios o Funciones Ortogonales Empíricas (EOFs) de la precipitación diaria (Ene83-May83) .....	132
Tabla 14: Valores de los vectores propios o Funciones Ortogonales Empíricas (EOFs) de la precipitación diaria (Dic97-May98).....	132
Tabla 15: Lista de días lluviosos y secos durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98	133
Tabla 16: Promedio de precipitaciones por estación durante el periodo analizado Mar83-Abr83 (mm/d), días muy lluviosos (mm/d), secos (mm/d) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo .....	134
Tabla 17: Promedio de precipitaciones por estación durante el periodo analizado Ene98-Mar98 (mm/d), días muy lluviosos (mm/d), secos (mm/d) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo .....	134
Tabla 18: Correlación lineal múltiple entre el índice de caudales de Tumbes, CP-1 (lag= 1día) y CP-2 (lag= 1día) .....	137

Tabla 19: Correlación lineal múltiple entre el índice de caudales de Piura, CP-1 (lag= 1día) y CP-2 (lag= 1día) .....	137
Tabla 20: Valores de la correlación entre las series temporales de precipitación y caudales diarios durante el evento El Niño 1982-83.....	137
Tabla 21: Valores de la correlación entre las series temporales de precipitación y caudales diarios durante el evento El Niño 1997-98.....	138
Tabla 22: Promedio de caudales medios diarios por estación durante el periodo analizado Ene83-May83 (m <sup>3</sup> /s), días muy lluviosos (m <sup>3</sup> /s), secos (m <sup>3</sup> /s) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo ...	139
Tabla 23: Promedio de caudales medios diarios por estación durante el periodo analizado Dic97-Mar98 (m <sup>3</sup> /s), días muy lluviosos (m <sup>3</sup> /s), secos (m <sup>3</sup> /s) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo ...	139

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1: Esquema idealizado de la distribución de los vientos y la presión en la superficie de la Tierra .....	4
Figura 2: Representación de la celda de Hadley (corte transversal de la Tierra) .....	5
Figura 3: Representación de la circulación de Walker a lo largo del ecuador durante condiciones normales (parte superior) y las desviaciones de la TSM de la media zonal a lo largo del ecuador (parte inferior).....	6
Figura 4: Mapa del Pacífico Tropical y las regiones El Niño .....	7
Figura 5: Interacción océano-atmósfera sobre el Pacífico Tropical: a) Condiciones normales y b) Condiciones “El Niño” .....	8
Figura 6: Impactos en los patrones de precipitación en el mundo durante un evento El Niño: periodos húmedos (wet) y periodos secos (dry) .....	11
Figura 7: Patrones de anomalía de temperatura superficial del mar (°C) correspondientes a un valor unitario del Índice <i>E</i> (izquierda) e Índice <i>C</i> (derecha).....	16

Figura 8: Interacción océano-atmósfera sobre la costa peruana: a) Condiciones normales y b) Condiciones “El Niño” .....	17
Figura 9: Correlación de anomalías de precipitación y anomalías de TSM en las regiones Niño 1+2 y Niño 3.4 para febrero .....	22
Figura 10: Correlaciones significativas al 95% de la precipitación anual y los valores medios anuales del a) Índice E y b) Índice C (los triángulos rojos representan correlaciones positivas y los triángulos azules representan correlaciones negativas) .....	23
Figura 11: Esquema de un resorte ideal.....	30
Figura 12: Altimetría de la zona de estudio (regiones de Tumbes y Piura) .....	31
Figura 13: Clasificación climática en las regiones de Tumbes y Piura.....	32
Figura 14: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas (regiones de Tumbes y Piura) .....	35
Figura 14: Esquema de la metodología de la investigación según objetivos específicos....	38
Figura 16: Formalismo del Análisis de Componentes Principales.....	48
Figura 17: Regionalización de estaciones según vector .....	56
Figura 18: Regresión lineal entre la precipitación total anual promedio (mm) sin considerar los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98 y, la altitud (m) .....	56
Figura 19: Régimen estacional de la precipitación – Grupo 1 .....	57
Figura 20: Régimen estacional de la precipitación – Grupo 2 .....	57
Figura 21: Series de precipitación total anual - Grupo 1 .....	58
Figura 22: Series de precipitación total anual - Grupo 2.....	58
Figura 23: Índices anuales del vector del Grupo 1 .....	59
Figura 24: Suma de los índices anuales del Grupo 1.....	60
Figura 25: Índices anuales del vector del Grupo 2 .....	61
Figura 26: Suma de los índices anuales del Grupo 2.....	61
Figura 27: Índice de la Precipitación total anual de los días húmedos (PRCPTOT) para el Grupo 1 .....	63
Figura 28: Índice de la Precipitación total anual de los días húmedos (PRCPTOT) para el Grupo 2 .....	63
Figura 29: Índice de la Precipitación promedio anual (SDII) para el Grupo 1 .....	64
Figura 30: Índice de la Precipitación promedio anual (SDII) para el Grupo 2 .....	64
Figura 31: Índice anual de los Días húmedos consecutivos (CWD) para el Grupo 1 .....	65
Figura 32: Índice anual de los Días húmedos consecutivos (CWD) para el Grupo 2 .....	66

Figura 33: Índice anual de los Días secos consecutivos (CDD) para el Grupo 1.....	66
Figura 34: Índice anual de los Días secos consecutivos (CDD) para el Grupo 2.....	67
Figura 35: Índice anual de la cantidad de Días cuya precipitación diaria fue superior a los 10 mm (R10) para el Grupo 1 .....	67
Figura 36: Índice anual de la cantidad de Días cuya precipitación diaria fue superior a los 10 mm (R10) para el Grupo 2 .....	68
Figura 37: Índice anual de la cantidad de Días cuya precipitación diaria fue superior a los 20 mm (R20) para el Grupo 1 .....	69
Figura 38: Índice anual de la cantidad de Días cuya precipitación diaria fue superior a los 20 mm (R20) para el para el Grupo 2.....	69
Figura 39: Índice anual de la suma de la Precipitación diaria superior al percentil 95 (R95p) para el Grupo 1 .....	70
Figura 40: Índice anual de la suma de la Precipitación diaria superior al percentil 99 (R99p) para el Grupo 1 .....	70
Figura 41: Índice anual de la suma de la Precipitación diaria superior al percentil 95 (R95p) para el Grupo 2 .....	71
Figura 42: Índice anual de la suma de la Precipitación diaria superior al percentil 99 (R99p) para el Grupo 2 .....	72
Figura 43: Índice anual de la Precipitación diaria máxima (RX1day) para el Grupo 1 .....	72
Figura 44: Índice anual de la Precipitación diaria máxima (RX1day) para el Grupo 2 .....	73
Figura 45: Índice anual de la Precipitación diaria máxima de 5 días consecutivos (RX5day) para el Grupo 1.....	73
Figura 46: Índice anual de la Precipitación diaria máxima de 5 días consecutivos (RX5day) para el Grupo 2.....	74
Figura 47: Correlación de los índices anuales de precipitación asociados a la frecuencia de la precipitación (días) y los índices E y C durante el periodo de diciembre a marzo. Los círculos blancos corresponden a valores no estadísticamente significativos al 90% .....	75
Figura 48: Correlación de los índices anuales de precipitación asociados a la intensidad de la precipitación (mm) y los índices E y C durante el periodo de diciembre a marzo. Los círculos blancos corresponden a valores no estadísticamente significativos al 90% .....	76
Figura 49: Porcentaje de varianza explicada por cada componente principal: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98 .....	78

Figura 50: Variación temporal y espacial de la precipitación diaria del EOF-1 durante el evento: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98.....	79
Figura 51: Variación temporal y espacial de la precipitación diaria del EOF-2 durante el evento: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98.....	79
Figura 52: Variación porcentual de la precipitación diaria acumulada: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98 .....	81
Figura 53: Días lluviosos y secos según el primer modo de variabilidad (CP-1) durante el evento: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98.....	83
Figura 54: Distribución espacial del promedio de la precipitación total diaria durante el periodo analizado (mm/d), días muy lluviosos (mm/d), secos (mm/d) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo durante el evento: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98.....	83
Figura 55: Régimen estacional de los caudales .....	85
Figura 56: Series de caudal medio anual (periodo 1963/64 – 2011/12).....	85
Figura 57: Matriz de correlación de los caudales medios diarios (ene83-may83).....	86
Figura 58: Matriz de correlación de los caudales medios diarios (dic97-may98).....	87
Figura 59: Series de los índices de caudales por región durante: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98.....	88
Figura 60: Análisis de la correlación lineal cruzada entre el primer componente principal de precipitación diaria (CP-1) y el índice de caudales de la región Tumbes y Piura: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98.....	89
Figura 61: Diagrama de dispersión entre el primer componente principal de precipitación diaria (CP-1) con un día de desfase y el índice de caudales de la región Tumbes y Piura: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98.....	90
Figura 62: Variabilidad diaria de las lluvias (CP-1 y CP-2) y caudales (Índice de caudales de las regiones Tumbes y Piura) durante: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98 .....	90
Figura 63: Correlación entre las series de caudales medios diarios de la estación hidrométrica (representada por una estrella) y las series de precipitación total diaria durante: a) Ene83-May83 y b) Dic97-May98.....	92
Figura 64: Distribución espacial del promedio de caudales medios diarios durante el periodo analizado ( $m^3/s$ ), días muy lluviosos ( $m^3/s$ ), secos ( $m^3/s$ ) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98.....	94

Figura 65: Condiciones promedio de radiación de onda larga saliente (OLR) de la NOAA/OAR/ESRL y vientos a 850 hPa del NCEP/NCAR Reanalysis para el periodo enero-abril (Periodo 1981-2010) .....	95
Figura 66: Promedios de NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos (m/s) a 850 hPa y NOAA/OAR/ESRL composites de OLR ( $W/m^2$ ) durante El Niño 1982-83 y El Niño 1997-98 para: a) Días lluviosos y b) Días secos .....	96
Figura 67: Anomalías (promedios de la circulación atmosférica durante días lluviosos o secos menos condiciones promedio Ene-Abr) de NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos (m/s) a 850 hPa y NOAA/OAR/ESRL composites de OLR ( $W/m^2$ ) durante El Niño 1982-83 y El Niño 1997-98: a) Días lluviosos y b) Días secos .....	97
Figura 68: Diferencias de la circulación atmosférica entre días lluviosos y días secos (Figura 66a - 66b) de NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos (m/s) a 850 hPa y NOAA/OAR/ESRL composites de OLR ( $W/m^2$ ) durante: a) Marzo-Abril 1983 y b) Enero-Marzo 1998.....	98
Figura 69: Anomalías (promedio de la circulación atmosférica durante días lluviosos menos promedio del periodo Mar83-Abr83) de NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos a 850 hPa y NOAA/OAR/ESRL composites de OLR tres días antes y tres días después del día lluvioso ( <i>día 0</i> ).....	99
Figura 70: Anomalías (promedio de la circulación atmosférica durante días lluviosos menos promedio del periodo Ene98-Mar98) de NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos a 850 hPa y NOAA/OAR/ESRL composites de OLR tres días antes y tres días después del día lluvioso ( <i>día 0</i> ).....	100
Figura 71: Mapa de referencia de ubicación de la costa norte peruana ( $80^{\circ}W$ ) y región del Océano Pacífico comprendida entre los $10^{\circ}N$ - $10^{\circ}S$ .....	101
Figura 72: Anomalías (promedio de la circulación atmosférica durante días lluviosos menos promedio del periodo Mar83-Abr83) tres días antes y tres días después del día lluvioso ( <i>día 0</i> ) entre los $10^{\circ}N$ - $10^{\circ}S$ para el evento El Niño 1982-83 de: a) NOAA/OAR/ESRL composites de OLR y NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos zonales y b) Precipitación observada (anomalías porcentuales) .....	102
Figura 73: Anomalías (promedio de la circulación atmosférica durante días lluviosos menos promedio del periodo Ene98-Mar98) tres días antes y tres días después del día lluvioso ( <i>día 0</i> ) entre los $10^{\circ}N$ - $10^{\circ}S$ para el evento El Niño 1997-98	

de: a) NOAA/OAR/ESRL composites de OLR y NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos zonales y b) Precipitación observada (anomalías porcentuales).....	103
Figura 74: Periodo de registro de la información pluviométrica de las estaciones meteorológicas ubicadas en las regiones de Tumbes y Piura .....	119
Figura 75: Histogramas de precipitación total mensual – Grupo 1 .....	120
Figura 76: Histogramas de precipitación total mensual – Grupo 2 .....	122
Figura 77: Series de precipitación total diaria (ene83-may83).....	127
Figura 78: Series de precipitación total diaria (dic97-may98) .....	129
Figura 79: Series de caudal medio mensual (periodo 1963-2012) .....	135
Figura 80: Series de caudal medio diario (ene83-may83).....	136
Figura 81: Series de caudal medio diario (dic97-may98).....	136

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<i>Pág.</i>
<b>Anexo 1: Lista de eventos El Niño y La Niña en la costa del Perú según Índice Costero El Niño (ICEN).....</b>	117
<b>Anexo 2: Periodo de registro de la información pluviométrica.....</b>	119
<b>Anexo 3: Análisis de la variabilidad interanual de la precipitación (1963/64 – 2008/09) .....</b>	120
Anexo 3.1: Series de precipitación total mensual (1963-2009) .....	120
Anexo 3. 2: Índices de calidad por estación acorde al Vector Regional .....	123
Anexo 3.3: Estadísticas descriptivas de los índices de precipitación .....	124
<b>Anexo 4: Análisis de la variabilidad diaria de la precipitación y su relación con la escorrentía durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98 .....</b>	127

Anexo 4.1: Series de precipitación total diaria (ene83-may83 y dic97-may98) .....	127
Anexo 4.2: Análisis espacio-temporal de la precipitación (Valores de EOFs y precipitación promedio durante días lluviosos y secos).....	132
Anexo 4.3: Series de caudal medio mensual (1963-2012) y de caudal medio diario (ene83-may83 y dic97-may98) .....	135
Anexo 4.4: Relación precipitación-escorrentía (correlación entre precipitación y caudales diarios, promedio de caudales durante días lluviosos y secos) .....	137
<b>Anexo 5: Protocolo de uso de programas .....</b>	<b>140</b>
Anexo 5.1: Protocolo de uso de Hydraccess .....	140
Anexo 5.2: Protocolo de uso de RCLimdex 1.0 .....	142
Anexo 5.3: Protocolo de uso de información climática global de la NOAA .....	145

## I. INTRODUCCIÓN

El Niño puede provocar eventos climáticos extremos en todo el mundo, tales como inundaciones y sequías. En el Perú, el efecto de El Niño es aún mayor, especialmente en la costa norte, debido a que puede provocar intensas lluvias y severas inundaciones. Este fenómeno ha generado diversos impactos en la población, como a las viviendas, acceso al agua, comida, transporte, salud, oportunidades laborales, migración, dieta alimenticia, entre otros; incluso a pesar de los planes de mitigación del gobierno tal como ocurrió durante el evento El Niño 1997-98 (Bayer et al., 2008). Este evento fue tan intenso, que ocasionó daños equivalentes al 6.2 por ciento del PBI nacional, mientras que para el evento El Niño 1982-83 el impacto ascendió a 11.6 por ciento (MEF, 2014). Ambos eventos han sido catalogados como de magnitud extraordinaria por el comité del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN).

El Niño es un fenómeno acoplado océano-atmósfera que se caracteriza por el calentamiento anómalo del Pacífico Tropical, que presenta teleconexiones climáticas globales y es el principal modo dominante de la variabilidad interanual climática. A inicios de 1980, el Centro de Predicción climática de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (CPC-NOAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, determinó cuatro regiones en el Pacífico Ecuatorial para describir y monitorear la temperatura superficial del mar (TSM) como parte del fenómeno El Niño (Barnston et al., 1997). Estas regiones se denominaron: El Niño 1, El Niño 2, El Niño 3 y El Niño 4. Actualmente, el comité del ENFEN, monitorea constantemente la región Niño 1+2 (Pacífico Ecuatorial Oriental) lo cual permite la predicción y/o identificación de eventos El Niño y La Niña en la costa peruana.

El entendimiento de los procesos físicos, la frecuencia e intensidad de eventos El Niño en un sistema climático cambiante, ha pasado de ser un tema estrictamente científico a un tema del ámbito político, económico y social. A su vez, a raíz de los eventos que produjeron los mayores impactos a nivel mundial, se han estudiado diversos aspectos

asociados a este fenómeno. Sin embargo, a pesar de que numerosos estudios han involucrado aspectos a escala global de El Niño, comparativamente, pocos estudios se han enfocado en los aspectos regionales o locales a lo largo de la costa noroeste de Sudamérica (Douglas et al., 2009).

Los estudios que involucran la variabilidad de la precipitación y la interacción con la atmósfera en la costa norte del Perú vinculados a El Niño son escasos, no obstante, han permitido la disminución de la incertidumbre que se tenía sobre este fenómeno en el litoral peruano. Lagos et al. (2008) y Lavado y Espinoza (2014) estudiaron la variabilidad interanual de la precipitación relacionada a El Niño en todo el Perú. Aquí se concluyó que las precipitaciones extremas en la costa norte del Perú están vinculadas al calentamiento de la región Niño 1+2. Mientras que, el calentamiento de la región El Niño 3.4 durante la época lluviosa, conlleva a un déficit de precipitaciones en la región andina, así como en la región Amazónica (Espinoza et al., 2012; Espinoza et al., 2013).

Respecto a la variabilidad de la precipitación a una escala diaria durante eventos extremos, Horel et al. (1986) identificaron que la actividad convectiva durante 1983 en la costa norte del Perú estuvo fuertemente modulada por el ciclo diurno con más nubes durante la noche y la madrugada. Asimismo, la actividad convectiva fue casi continua desde mediados de marzo a fines de mayo. Mikami (1988) también estudió el evento El Niño de 1982-83 mediante la identificación de patrones diarios de precipitación en la costa norte del Perú, encontrando un patrón espacial entre la planicie costera (debajo de los 400 msnm) y los Andes (por encima de los 1000 msnm). Por otro lado, el estudio de Ordinola et al. (2001) mostró que las lluvias severas ocurrieron, primordialmente, en la planicie costera hasta los 1000 msnm, durante diciembre a abril de 1998.

El análisis de la circulación atmosférica asociada a precipitaciones intensas durante el evento El Niño 1997-98 fue ejecutado por Takahashi (2004) y Douglas et al. (2009), quienes propusieron dos teorías sobre la generación de lluvias extremas en la costa norte peruana. Según Takahashi (2004), estaría relacionado a ondas ecuatoriales convectivas; es decir, ondas atmosféricas asociadas a la respuesta de la rotación de la Tierra. Mientras que, para Douglas et al. (2009), existe una relación (teleconexión) entre las precipitaciones intensas de la costa norte peruana con los ciclones extratropicales del Hemisferio Norte (sistemas meteorológicos de baja presión asociados a tormentas).

Si bien existe un gran avance del estado del conocimiento de la variabilidad interanual de la precipitación en el Perú, aún existe incertidumbre sobre su comportamiento, principalmente, sobre las precipitaciones extremas. En primer lugar, para su estudio, se tendría que reducir la escala de tiempo a una intraestacional, diaria e incluso horaria; así como reducir la escala espacial a un nivel regional. Esto debido a que los factores que modulan la precipitación en el Perú son diversos y por ello, para poder sintetizar la totalidad de su variabilidad se tendría que analizar más de una variable climática y considerar los procesos físicos propios de cada zona.

Por otro lado, las regiones de Tumbes y Piura, ubicadas al norte del Perú, son regiones importantes para el país por su relevancia económica y de infraestructura. En la actualidad, contribuyen en 5.5 por ciento al PBI nacional (INEI/DNCN, 2013) de un total de 24 de regiones y son zonas que presentan infraestructura hidráulica de gran envergadura que se ha visto afectada durante la ocurrencia de eventos El Niño, como el caso de la sedimentación en el reservorio Poechos que regula el río Chira, ubicado en la región Piura. Dada la importancia de estas regiones para el país, los resultados de esta investigación servirán como base para los tomadores de decisiones para incluirlos en los Planes de Gestión de Recursos Hídricos de Cuencas que se viene implementando según la nueva ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338), respecto a las medidas de adaptación frente a fenómenos naturales extremos como El Niño.

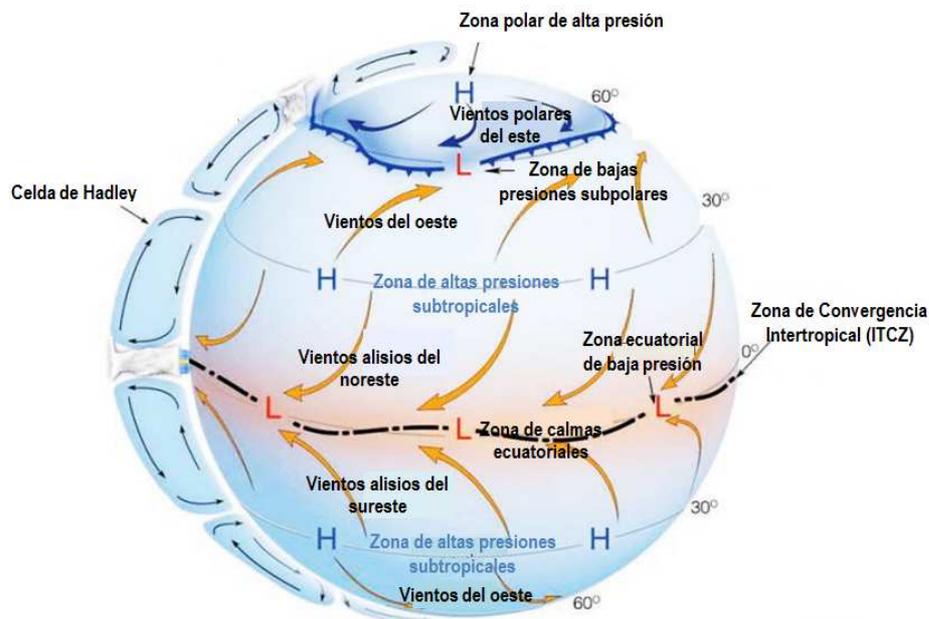
La presente investigación tiene por objetivo explicar la variabilidad interanual de la precipitación en la costa norte peruana (Tumbes y Piura) durante el periodo 1963/64-2008/09; y, posteriormente, a una escala diaria durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98. Sobre lo último, se pretende determinar la relación entre la variabilidad diaria de la precipitación y los caudales, así como la relación entre la ocurrencia de días lluviosos y secos y la circulación atmosférica; es decir, las variaciones intraestacionales.

Cabe mencionar, que la presente tesis fue realizada en el marco del Proyecto “Impacto de la Variabilidad y Cambio Climático en el Ecosistema de Manglares de Tumbes”, ejecutado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y financiado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá (IDRC, por sus siglas en inglés).

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA A ESCALA GLOBAL

La mayor cantidad de absorción de calor en los océanos mundiales ocurre en los trópicos (geográficamente delimitados por las latitudes 23.27°S y 23.27°N), siendo la temperatura superficial del mar (TSM) de dicha zona lo suficientemente alta para producir actividad convectiva profunda en la atmósfera y por tanto, precipitación (Godfrey et al., 2001). La energía absorbida en esta zona, es redistribuida por las circulaciones atmosféricas y oceánicas de gran escala, permitiendo así un flujo positivo de energía hacia los polos (Espinoza, 2009). Este capítulo se centrará en aquellos aspectos generales de la circulación atmosférica de la zona tropical, los cuales son importantes de conocer antes de explicar los mecanismos oceánico-atmosféricos de uno de los fenómenos climáticos más conocidos de alcance mundial: “El Fenómeno El Niño”.

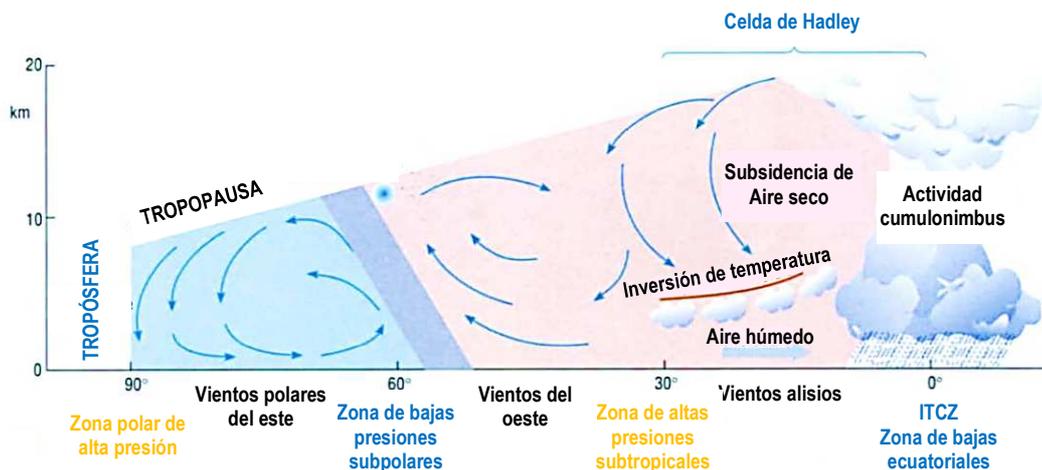


**Figura 1: Esquema idealizado de la distribución de los vientos y la presión en la superficie de la Tierra**

\*H: Presión alta, L: Presión baja.

FUENTE: Ahrens, 2014.

Si la Tierra estuviera cubierta completamente por agua, el sistema global de vientos sería como el de la Figura 1. Un aspecto fundamental de este sistema lo conforman los vientos alisios (trade winds) que circulan entre los trópicos dirigiéndose desde las zonas de altas presiones subtropicales (subtropical highs) hacia las zonas de bajas presiones que se encuentran en el ecuador (línea ecuatorial), la cual es conocida como la zona de las bajas ecuatoriales (equatorial low). Estos vientos se denominan acorde a su procedencia, por lo cual se tienen los vientos alisios del noreste (NE Trade winds) y los vientos alisios del sureste (SE Trade winds). Cuando los vientos alisios del sureste o noreste ascienden al llegar al ecuador y, al alcanzar la tropopausa, se dirigen hacia los polos descendiendo cerca a los 30° de latitud provocan la subsidencia (descenso de aire) y generan zonas de alta presión (subtropical highs). Así se forma la llamada Circulación de Hadley representada en la Figura 1 y 2, mediante una celda del mismo nombre (Hadley cell).

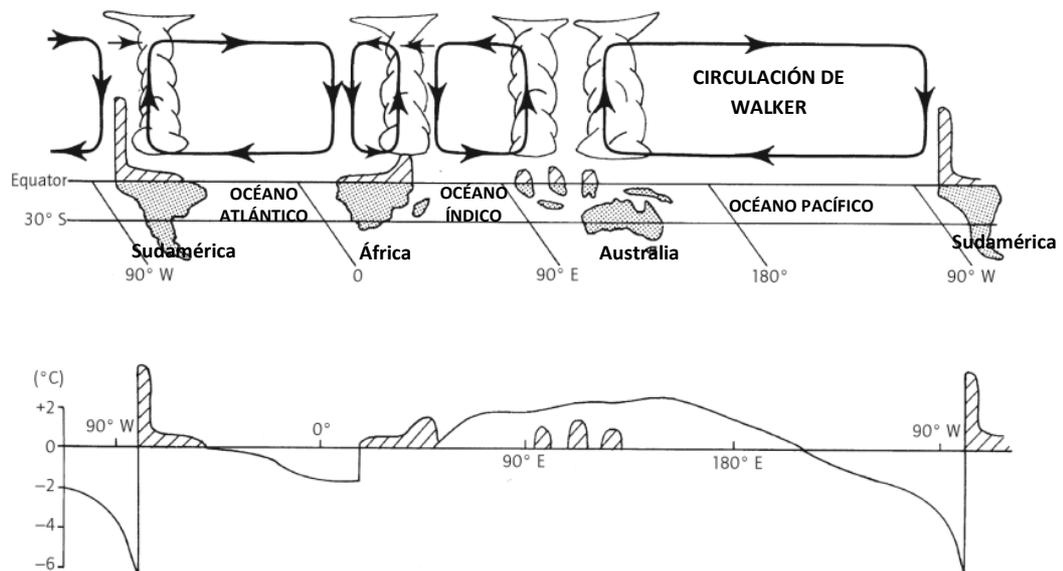


**Figura 2: Representación de la celda de Hadley (corte transversal de la Tierra)**  
 FUENTE: Open University, 2001.

Un aspecto importante de esta circulación es la llamada Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés), la cual se forma de la convergencia de los vientos alisios, que genera una densa capa de nubes a lo largo del ecuador. En esta zona se produce una línea de convección profunda (formación de nubes tipo cumulonimbus, asociada a la precipitación). La ITCZ se desplaza en latitud según el ciclo estacional en función a la posición del Sol sobre la Tierra, alcanzando su posición más al sur durante el verano austral y su posición más boreal durante el invierno austral (IMARPE, 1999).

Así como la circulación de Hadley, conocida como la circulación meridional (norte-sur), existe otro tipo de circulación en dirección longitudinal (este-oeste), llamada la circulación

de Walker (Figura 3). Esta circulación involucra el ascenso del aire sobre la zona de Australia y su descenso sobre el Pacífico Este, en la costa norte Sudamericana (Hewitt y Jackson, 2009). De la Figura 3, se puede observar que el Pacífico Occidental es más cálido que el Pacífico Oriental (por el rol de los vientos alisios), por ello la ascendencia y subsidencia de las masas de aire ocurre en esas ubicaciones, respectivamente. Esto provoca que la atmósfera sobre Australia sea lluviosa. Por otro lado, la circulación de Walker también influye en las condiciones del Océano Pacífico, las cuales se ven alteradas durante el fenómeno El Niño y serán explicadas con mayor detalle en el siguiente capítulo.



**Figura 3: Representación de la circulación de Walker a lo largo del ecuador durante condiciones normales (parte superior) y las desviaciones de la TSM de la media zonal a lo largo del ecuador (parte inferior)**

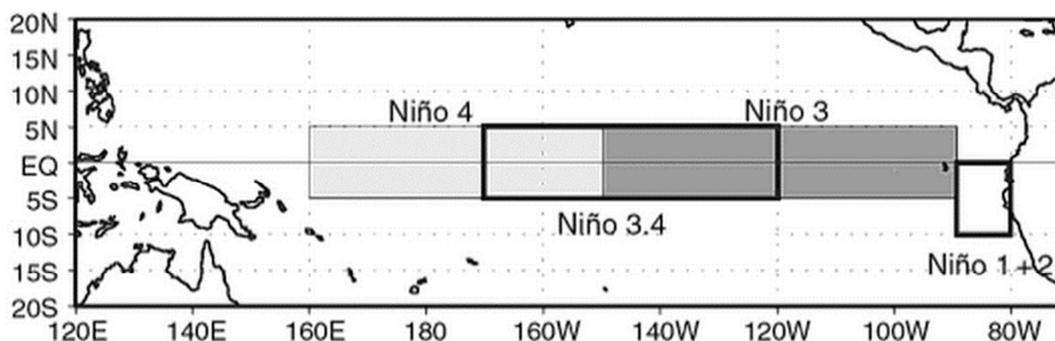
FUENTE: Peixóto y Oort (1992), Wyrтки (1982).

## 2.2 EL FENÓMENO EL NIÑO: CONCEPTO E ÍNDICES

### 2.1.1 MECANISMOS OCEÁNICO-ATMOSFÉRICOS

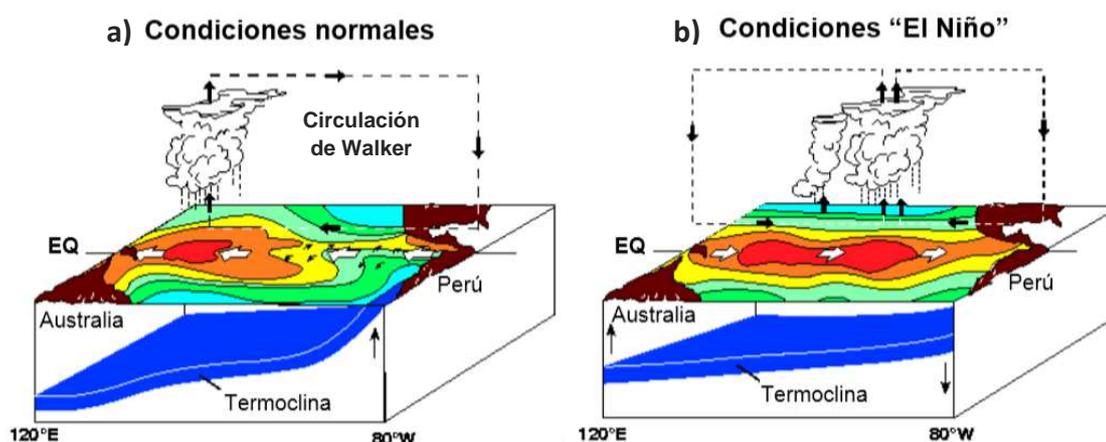
El Pacífico Tropical se extiende desde la costa de Sudamérica, en el Pacífico Oriental, a las numerosas islas y masas de tierra de Australia e Indonesia que forman el llamado continente marítimo (Figura 4). La línea ecuatorial cruza los países de Ecuador al este ( $80^{\circ}\text{W}$ ) e Indonesia en el oeste. Considerando las islas de Halmahera ( $129^{\circ}\text{E}$ ) y de Célebes ( $120^{\circ}\text{E}$ ) como los límites del Pacífico Ecuatorial, se tiene una extensión sobre el ecuador de 16 778 km ( $151^{\circ}$  de longitud), lo cual corresponde a más de la tercera parte de la distancia total del ecuador alrededor del mundo (Sarachik y Cane, 2010).

La comprensión de los cambios de las condiciones océano-atmosféricas sobre el Pacífico Tropical, es fundamental para el entendimiento del fenómeno El Niño. Es por ello que, a inicios de 1980, el entonces conocido Centro de Análisis Climático (CAC) y actualmente Centro de Predicción Climática (CPC) de la NOAA, determinó cuatro regiones en el Pacífico Tropical para el monitoreo del este fenómeno. Estas regiones fueron: región Niño 1 ( $80^{\circ}\text{W}$ - $90^{\circ}\text{W}$  y  $5^{\circ}$ - $10^{\circ}\text{S}$ ), Niño 2 ( $80^{\circ}$ - $90^{\circ}\text{W}$  y  $0^{\circ}$ - $5^{\circ}\text{S}$ ), Niño 3 ( $90^{\circ}$ - $150^{\circ}\text{W}$  y  $5^{\circ}\text{N}$ - $5^{\circ}\text{S}$ ) y Niño 4 ( $150^{\circ}\text{W}$ - $160^{\circ}\text{E}$  y  $5^{\circ}\text{N}$ - $5^{\circ}\text{S}$ ). De la combinación de las regiones Niño 3 y Niño 4 se obtuvo la región Niño 3.4 ( $120^{\circ}\text{W}$ - $170^{\circ}\text{W}$  y  $5^{\circ}\text{N}$ - $5^{\circ}\text{S}$ ) y de la suma de las regiones Niño 1 y Niño 2 se obtuvo la región Niño 1+2 ( $80^{\circ}\text{W}$ - $90^{\circ}\text{W}$  y  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}\text{S}$ ); estas dos últimas son las más usadas en los estudios asociados al fenómeno El Niño (Figura 4).



**Figura 4: Mapa del Pacífico Tropical y las regiones El Niño**  
FUENTE: Sarachik y Cane, 2010.

El Niño es un fenómeno que depende, en forma esencial, de la interacción entre el océano y la atmósfera. De allí su definición como un proceso acoplado océano-atmósfera. Los principales elementos de la circulación atmosférica sobre la zona tropical (Acápite 2.1) se verán afectados ante la ocurrencia de un evento El Niño. Se sabe que, bajo condiciones normales (Figura 5-a), los vientos alisios se dirigen de este a oeste, a lo largo de la superficie del Pacífico Tropical, hacia la región de agua cálida (Australia). Asimismo, cuando el movimiento ascendente del aire en la región cálida del Pacífico Ecuatorial Occidental alcanza la tropopausa, retorna hacia el este por la alta tropósfera y completa la circulación de Walker descendiendo al Pacífico Oriental, se produce una alta presión en la superficie (costa de Perú).



**Figura 5: Interacción océano-atmósfera sobre el Pacífico Tropical: a) Condiciones normales y b) Condiciones "El Niño"**

FUENTE: Laboratorio Marino Ambiental del Pacífico (PMEL-NOAA)

Mientras tanto, en el océano gracias a la interacción de la atmósfera con el Pacífico Tropical, se genera la llamada termoclina (Figura 5-a). La termoclina es la superficie imaginaria que separa la capa superficial oceánica, aguas más cálidas, de las aguas profundas mucho más frías. En una situación normal es mucho más profunda (200 m) en la zona occidental del Pacífico y mucho más superficial en la oriental (50 m) (Casas y Alarcón, 1999). Esto es debido al rozamiento de los vientos alisios que arrastran las aguas hacia el oeste provocando que las masas de agua se acumulen y así aumente el grosor de la capa superficial (Casas y Alarcón, 1999). La inclinación de la termoclina en el océano es una medida de los vientos en

superficie hacia el oeste, (vientos alisios) y, por tanto, una medida de la fuerza de la Circulación de Walker (Sarachik y Cane, 2010).

Existe un ciclo irregular de calentamiento y enfriamiento del Pacífico Oriental Tropical que provoca efectos en la atmósfera y en el océano, al cual se conoce como El Niño- Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), siendo la fase fría del fenómeno conocida como La Niña (Sarachik y Cane, 2010). Definir El Niño es una tarea difícil dado que el término ha cambiado a lo largo del tiempo y además involucra un diverso rango de fenómenos (Trenberth, 1997). Sintetizando las numerosas definiciones que presentó Glantz (2001), se define a El Niño como un fenómeno que produce cambios en la interacción océano-atmósfera de la región del Pacífico Ecuatorial, donde se produce un incremento tanto de la TSM en el Pacífico Ecuatorial Este y/o Central y de la presión atmosférica en la superficie del mar en el Pacífico Oeste.

Según Philander (1983), el movimiento de la ITCZ es un elemento clave en la dinámica de la interacción entre El Niño y el ciclo estacional por su efecto en el calentamiento de la atmósfera y en la inestabilidad del sistema. Por lo tanto, el ciclo estacional de la ITCZ tiene una fuerte influencia en la evolución de las fases del fenómeno, el cual muestra una tendencia marcada a desarrollarse acorde al ciclo anual. Por ejemplo, si el fenómeno se desarrolla durante el verano austral, cuando la ITCZ se encuentra en su posición más austral, el evento provocará lluvias intensas en la costa peruana. En los siguientes párrafos, se describirá la evolución de un evento El Niño cuando éste se desarrolla en el verano austral.

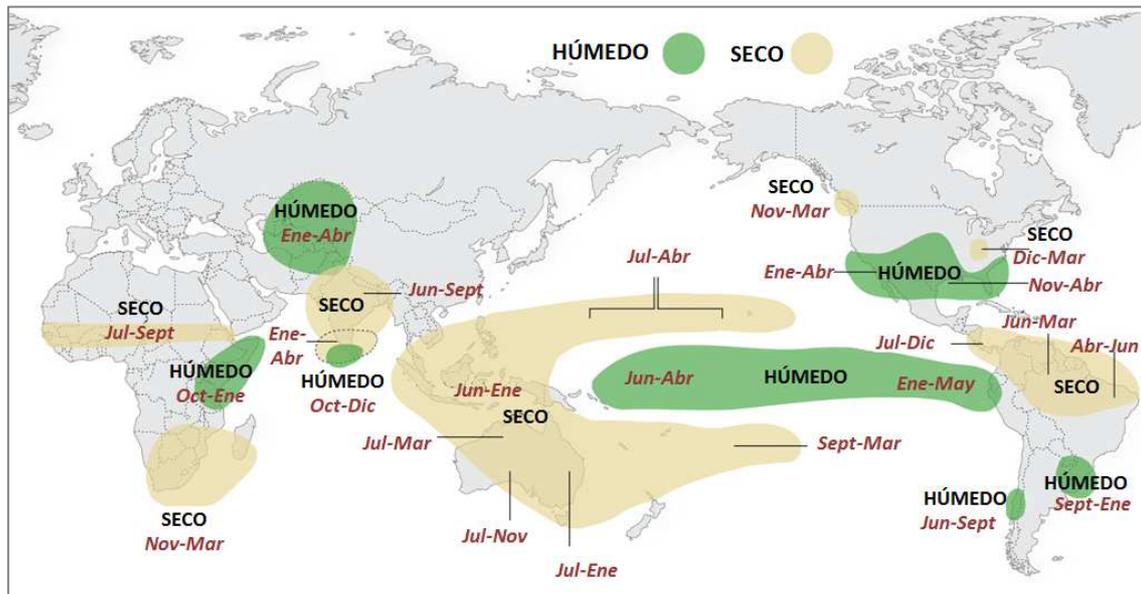
Durante un evento El Niño (Figura 5-b), la Circulación de Walker se modifica de manera importante. La alta presión sobre el nivel del mar que caracteriza al Pacífico Oriental en condiciones normales disminuye así como la diferencia entre la presión sobre el nivel del mar entre el Pacífico Occidental y Oriental. Consecuentemente con esta disminución, se produce el debilitamiento de la circulación de Walker. Los vientos alisios se debilitan y en el Pacífico Ecuatorial Occidental, la dirección del flujo se invierte en dirección al este. De la misma manera, las masas de agua cálida del oeste se desplazan hacia el este, el nivel del mar en el oeste disminuye, mientras que en el este se incrementa.

Con el debilitamiento de los vientos alisios, durante un evento El Niño, las aguas superficiales del Pacífico central y oriental se tornan más cálidas. A medida que esto ocurre, la termoclina ya no se encuentra tan inclinada, siendo más superficial en el oeste y profundizándose en el Pacífico Ecuatorial Central y Oriental. Como la termoclina desciende a lo largo de la costa de Perú, el afloramiento de las aguas continúa; sin embargo, las aguas que se mueven hacia la superficie son más cálidas y menos ricas en nutrientes (Glantz, 2001).

Mientras las aguas del Pacífico Ecuatorial Occidental se vuelven un tanto más frías, así como las aguas superficiales y subsuperficiales en el Pacífico Central y Oriental más cálidas, la ITCZ se traslada hacia el ecuador y la línea de convección profunda se ubica en su posición más austral de lo normal y la circulación de Hadley se torna más fuerte. Debido a que la actividad convectiva se produce en la región de aguas cálidas, las nubes se incrementan en el Pacífico Central y Oriental, mientras que disminuyen en el oeste.

Este desplazamiento de la actividad convectiva genera sequías en los países de Australia, Papúa Nueva Guinea, Indonesia, Andes, Altiplano, Amazonía, etc. Asimismo, esta inversión de las condiciones normales de la circulación atmosférica en el Pacífico Ecuatorial Oriental, genera precipitación excesiva en la costa peruana. Debido a que esta zona presenta un ambiente normalmente árido, con frecuencia, este fenómeno causa estragos en la población. Un evento El Niño causa efectos globales alterando los patrones de precipitación, ya sea en periodos húmedos o secos, en diversas partes del mundo (Figura 6).

Otro de los mecanismos oceánicos que explican el movimiento de las aguas cálidas del oeste al este a lo largo del ecuador, son las ondas oceánicas ecuatoriales conocidas como ondas Kelvin y ondas Rossby. Las ondas Kelvin se propagan de oeste a este a lo largo de la línea ecuatorial, mientras que las ondas Rossby se propagan de este a oeste. Las ondas Kelvin, cuando son de tipo cálida, provocan que la temperatura subsuperficial del mar se torne anómalamente cálida. Por ello, es importante monitorear el arribo de una onda Kelvin cálida al mar peruano, la cual podría estar asociada a un evento El Niño (Mosquera, 2014).



**Figura 6: Impactos en los patrones de precipitación en el mundo durante un evento El Niño: periodos húmedos y periodos secos**

Fuente: NOAA ([http://www.climate.gov/sites/default/files/IRI\\_ENSOimpactsmap\\_lrg.png](http://www.climate.gov/sites/default/files/IRI_ENSOimpactsmap_lrg.png))

El fenómeno El Niño es uno de los mayores componentes del sistema climático. A través de la dinámica de esta fluctuación climática, es capaz de influenciar el Indo-Pacífico Tropical (Océano Índico y Pacífico Occidental y Central) a latitudes mayores tanto en el hemisferio sur como el hemisferio norte; esto resulta en impactos climáticos casi globales (Bridgman y Oliver, 2006). Estas influencias de El Niño, se conocen como teleconexiones climáticas. La palabra “teleconexiones” apareció por primera vez en la literatura científica a mediados de 1930 y fue usada para describir las relaciones físicas que afectan las condiciones climáticas en la región del Atlántico norte. El término teleconexiones hace referencia a la relación que pueden tener los cambios en el clima en una ubicación respecto a otra ubicación lejana (Glantz, 2001).

### 2.1.2 EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO

Carranza (1891) fue uno de los primeros en realizar la descripción de un evento El Niño en 1891, refiriéndose a los sucesos ocurridos durante ese año en la zona de Paíta y Pacasmayo (regiones de Piura y La Libertad, respectivamente). Posteriormente, Carrillo (1892) bautizó la corriente como “Corriente del Niño”, nombre con el que los marinos paiteños la conocían debido a que era más visible después de la Navidad. Seguido por Eguiguren (1894), quien demostró que las

lluvias abundantes se presentaban cada seis años en promedio en la costa norte. No obstante, el fenómeno se hizo conocido por la comunidad científica internacional tras la ocurrencia del evento El Niño de 1925, estudiado por Murphy (1926). Su artículo dio origen al concepto de “Fenómeno El Niño” refiriéndose a él como una contracorriente cálida.

Sir Gilbert Walker (1928) recopiló datos climáticos de todo el mundo como parte de su trabajo en el servicio meteorológico de la India. El objetivo era conocer cómo se desarrollaría anualmente el monzón (vientos estacionales del Océano Índico asociados a lluvias). Su estudio le permitió identificar diversos patrones de variabilidad climática, descubriendo un aspecto de la circulación atmosférica que lleva su nombre (Circulación de Walker). Otro de los aspectos fue la denominada “Oscilación Sur”, la cual estaba caracterizada por variaciones opuestas de presión atmosférica entre el Pacífico Central-Oriental y el Pacífico Occidental-Índico (Takahashi, 2014).

A partir de los años 60, los avances científicos permitieron ver que "El Niño" tiene manifestaciones en todo el Pacífico Tropical, y que lo sucedido en el Perú es un aspecto regional de una interacción entre el Pacífico Tropical y la atmósfera global. Del trabajo de Bjerknes (1969), según Sarachik y Cane (2010), se obtuvo la explicación más ampliamente aceptada sobre El Niño. Bjerknes (1969) explicó el mecanismo de retroalimentación acoplado océano-atmósfera (Figura 5) que permitió comprender lo que posteriormente se denominó El Niño-Oscilación del Sur (ENOS, o ENSO en inglés).

Hoy en día, se sigue definiendo El Niño como una corriente cálida; sin embargo, esta definición es errónea puesto que El Niño ya no es más la contracorriente peruana, sino un fenómeno global. Por lo general, un evento El Niño se asocia a grandes desastres; no obstante, no todos los eventos son como los de 1982-83 y 1997-98 (eventos inusuales) sino que en su gran mayoría, son bastante más débiles (Takahashi, 2014).

### 2.1.3 VARIEDADES DE EL NIÑO E ÍNDICES

#### *a. Variedades de El Niño*

En años recientes, ha surgido una confusión, incluso entre especialistas, sobre a qué llamar El Niño. Esto se debe, principalmente a que el concepto que maneja el Perú y el resto del mundo no es el mismo, y a que en la última década estas nociones no han coincidido. Existen dos variedades del fenómeno El Niño; es decir, dos formas diferentes en las que el fenómeno se desarrolla, que son llamadas: el Niño Modoki y el Niño Canónico. No obstante, existen eventos que no presentan las características de estas variedades de El Niño, los cuales se denominarán eventos Niño Extraordinarios. Esta clasificación ha sido considerada acorde al estudio de Takahashi et al. (2011), donde se reinterpretaban los regímenes de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO): El Niño Modoki y El Niño Canónico, y se establecieron dos índices (E y C) que permiten distinguir a los diferentes “tipos” de El Niño.

- *El Niño Canónico*

Rasmusson y Carpenter (1982) analizaron seis eventos El Niño entre 1950 y 1973, determinando que estos eventos se iniciaban con una fase “pico”, que correspondía a un calentamiento anómalo en la costa del Perú, entre marzo y mayo. Posteriormente, estas anomalías de la TSM se propagaban hacia el oeste, a lo largo del Pacífico tropical, de manera que, en el verano siguiente (diciembre-febrero), se observaba un calentamiento anómalo en el Pacífico Tropical Central, pero relativamente menor en la costa del Perú. Cane (1983) denominó a este tipo de evento El Niño como: “El Niño Canónico”.

- *El Niño “Extraordinario”*

Esta variedad de El Niño fue catalogada así debido a que fueron eventos de gran magnitud que no se desarrollaron de manera “típica” y tuvieron una fuerte repercusión a nivel mundial (e.g. El Niño 1982-83 y 1997-98). El evento de 1982-83 fue uno de los más intensos observado hasta entonces, el cual presentó un comportamiento diferente a lo esperado. Según Rasmusson y Carpenter (1982), el desarrollo de un evento El Niño se iniciaba en el Pacífico Tropical Este; sin embargo, durante 1982 esta fase precursora no se presentó. Ello, sumado a las limitaciones en la medición oceanográfica y problemas con los

datos satelitales, la comunidad científica no pudo percatarse de lo que ocurría hasta que el evento se manifestó en toda su magnitud (Takahashi, 2014). Mientras que, El Niño de 1997-98 fue el primer evento en que los científicos pudieron brindar un pronóstico anticipado.

- ***El Niño Modoki***

En las últimas décadas, los eventos El Niño han presentado una variabilidad de la temperatura superficial del mar más enfocada en el Pacífico Tropical Central (región Niño 3.4), con relativamente poca repercusión en la costa peruana (Takahashi, 2014). A este tipo de fenómeno, se le conoce como “Niño Modoki”, el cual proviene de la palabra japonesa *Modoki* que significa “algo similar pero diferente” (Ashok et al., 2007). Este tipo de fenómeno se asocia con un fuerte calentamiento anómalo en el Pacífico Tropical Central y un enfriamiento en el este y el oeste del Pacífico Tropical (Weng et al., 2007). Otros nombres con los que se conoce son: “El Niño de la piscina cálida” o “El Niño de la línea de cambio de fecha”.

***b. Índices El Niño***

**Índice Costero El Niño**

Dentro del ámbito de la Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS) se viene desarrollando en nuestro país, el Programa "Estudio Regional del Fenómeno El Niño". La recurrencia del fenómeno El Niño en el Pacífico sudeste, con marcados efectos socio-económicos, llevó en 1974 a los países que conforman la CPPS a la constitución del Programa Estudio Regional del Fenómeno El Niño (ERFEN) que funciona con la participación de las instituciones de investigación de los países miembros, la coordinación de la CPPS y el apoyo de otras organizaciones internacionales. En el Perú, el Comité Nacional Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) forma parte de dicho esfuerzo regional.

A lo largo de los años, se han generado diversos índices que permiten monitorear el fenómeno El Niño. La mayoría de centros internacionales realizan el monitoreo de la región Niño 3.4 (e.g. NOAA, Estados Unidos); sin embargo, la región Niño 1+2 tiene mayor implicancia en los efectos sobre la costa peruana y en la costa

sudamericana. El comité técnico ENFEN, bajo coordinación técnica, decidió establecer un índice relevante al clima en la costa peruana que fuera robusto y simple para un uso operativo confiable. Este índice se denominó Índice Costero El Niño (ICEN) y consiste en la media de tres meses consecutivos de las anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 1+2. Estas anomalías se calculan usando la climatología mensual calculada para el periodo base 1981-2010. Si las condiciones de al menos tres meses son cálidas será considerado como un evento El Niño, mientras que si las condiciones son frías se considerará como un evento La Niña. La categoría del evento estará acorde al rango del valor del ICEN indicado en la Tabla 1 (ENFEN, 2012).

**Tabla 1: Categorías y magnitudes de un evento El Niño acorde al Índice Costero El Niño (ICEN)**

<i>Categorías</i>	<i>ICEN</i>
Fría Fuerte	Menor que -1.4
Fría Moderada	Mayor o igual que -1.4 y menor que -1.2
Fría Débil	Mayor o igual que -1.2 y menor que -1.0
Neutras	Mayor o igual que -1.0 y menor o igual que 0.4
Cálida Débil	Mayor que 0.4 y menor o igual que 1.0
Cálida Moderada	Mayor que 1.0 y menor o igual que 1.7
Cálida Fuerte	Mayor que 1.7 y menor o igual que 3.0
Cálida Extraordinaria	Mayor que 3.0

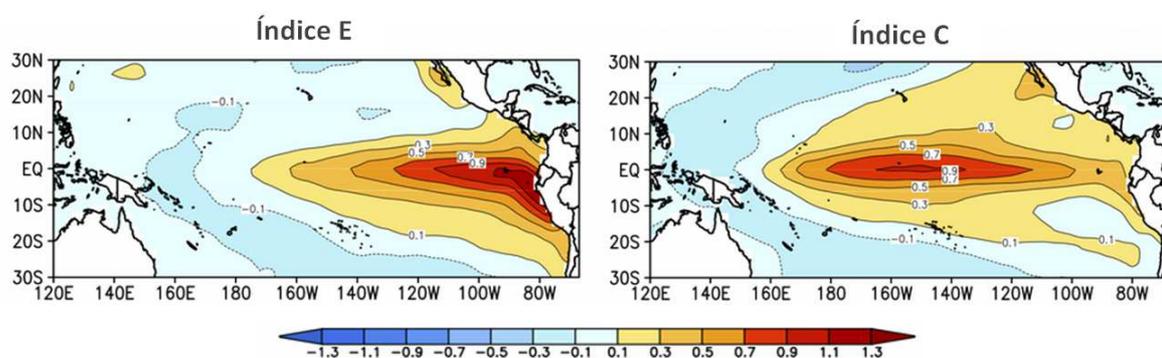
FUENTE: ENFEN, 2012.

El comité del ENFEN clasificó los eventos El Niño y La Niña según su magnitud en la costa norte del Perú, mediante el índice ICEN para el periodo de 1950-2011 (Anexo 1). Para dicho periodo, los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98 fueron los únicos eventos clasificados como de magnitud extraordinaria. El evento El Niño 1982-83, tuvo una duración de 17 meses iniciando en julio de 1982 y culminando en noviembre de 1983. Mientras que, el evento El Niño 1997-98 tuvo una duración de 19 meses, iniciando en marzo de 1997 y culminando en setiembre de 1998 (ENFEN, 2012). Es importante recordar que dichas duraciones están asociadas a las condiciones anómalas del calentamiento del mar, las cuales pueden o no coincidir con los periodos de lluvias intensas en las regiones de estudio.

### Índices E y C

Si bien el ICEN es un indicador práctico para el monitoreo de El Niño costero, éste no explica la totalidad de la variabilidad de la TSM del Pacífico Ecuatorial así como no permite distinguir entre los diferentes tipos de El Niño. Para ello se tendría que analizar otras regiones Niño o emplear más de un índice. Sin embargo, esta tarea no es fácil de lograr dada la alta correlación de la TSM en las cuatro regiones Niño (Trenberth y Stepaniak, 2000).

A raíz de ello, Takahashi et al. (2011) establecieron dos índices que describen la mayor parte de la variabilidad de temperatura superficial interanual en el Pacífico Ecuatorial. Los índices *E* y *C* corresponden a anomalías de TSM en el Pacífico Ecuatorial Este y Central, respectivamente. Para la obtención de este índice se realizó un Análisis de Componentes Principales (metodología explicada en el Acápite 3.2.4) de las anomalías mensuales de TSM de Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature (HadISST) versión 1.1. Esta metodología permite distinguir la variabilidad de la TSM propia y exclusiva de cada una de las regiones del Pacífico Ecuatorial, dado que ambos índices no están correlacionados.



**Figura 7: Patrones de anomalía de temperatura superficial del mar (°C) correspondientes a un valor unitario del Índice *E* (izquierda) e Índice *C* (derecha)**

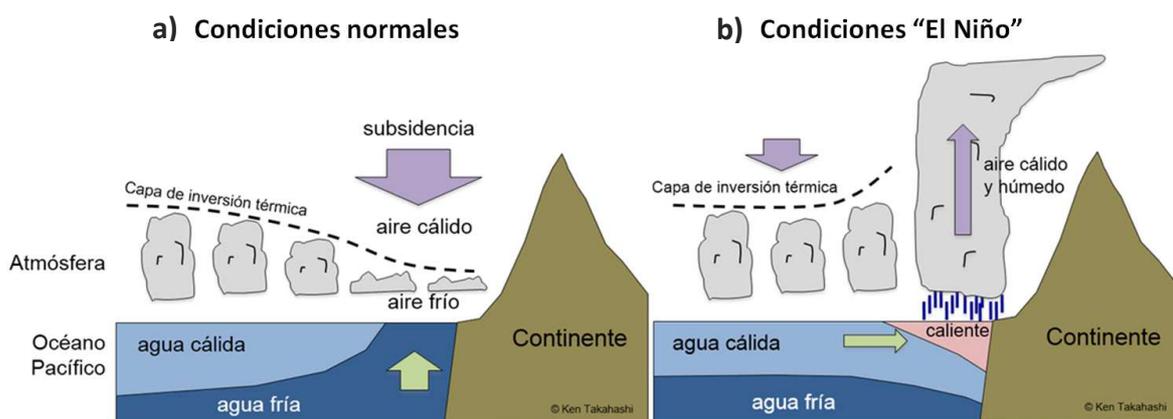
FUENTE: Takahashi et al., 2011.

En la Figura 7, se muestran los patrones de anomalías de temperatura superficial del mar asociados a valores unitarios de los índices *E* y *C*, respectivamente. Claramente, el patrón *E* tiene mayor efecto en la costa peruana, pero el patrón *C* también puede ser relevante al clima en la zona andina o amazónica del Perú a través de las “teleconexiones” atmosféricas (Espinoza et al., 2013; Lavado y Espinoza, 2014).

## 2.3 EFECTOS DEL FENÓMENO EL NIÑO EN EL PERÚ Y LA COSTA NORTE PERUANA

### 2.2.1 EFECTOS EN EL CLIMA

La costa norte del Perú es de clima cálido y muy seco (excepto en presencia del fenómeno El Niño), de acuerdo a la ubicación geográfica que tiene (cerca de la línea ecuatorial) indicaría que su clima debería ser eminentemente tropical (con lluvias intensas); sin embargo, se tiene un contexto normalmente seco y desértico, debido a que no existen condiciones necesarias para que se formen nubes de tipo “cumulo-nimbus”, propias de zonas con lluvias torrenciales (Woodman, 1999). Esto ocurre debido a que la atmósfera en la costa peruana es “estable” y no permite que el aire caliente siga subiendo a un nivel sobre los 1000-1500 msnm, en donde el aire caliente debería expandirse, enfriarse, condensarse y finalmente formar estas nubes (Palacios, 2009).



**Figura 8: Interacción océano-atmósfera sobre la costa peruana: a) Condiciones normales y b) Condiciones “El Niño”**

FUENTE: Cortesía de Takahashi, K.

El impedimento del ascenso del aire caliente en la atmósfera de la costa peruana, se produce por la llamada capa de inversión térmica y la subsidencia (Figura 8-a). Las aguas frías que recorren la costa, debido a la corriente de Humboldt, enfrían las masas de aire cercanas a la superficie costera ubicadas bajo la inversión, las cuales no pueden ascender debido a que los aires superiores son mucho más livianos y más cálidos, y por tanto, se impide la generación de lluvias. La inversión de temperatura se produce aproximadamente a los 1000 metros de altura y bajo estas condiciones

se dice que la atmósfera es “estable” (Woodman, 1999). Por otro lado, la subsidencia o descenso genera la compresión de las masas de aire por sobre la inversión manteniendo altas temperaturas en dicha zona.

Tal como ya se observó en el Acápite 2.1.1, cuando se presenta el fenómeno El Niño, las condiciones atmosféricas en la costa cambian drásticamente debido al calentamiento anómalo de la temperatura superficial del mar (TSM), con lo cual la inversión de la temperatura prácticamente deja de existir, la atmósfera deja de ser “estable” y se presentan fuertes lluvias, trayendo como consecuencia inundaciones que causan serios daños a la infraestructura socioeconómica de la costa peruana. El aire cálido y húmedo asciende y permite la formación de tormentas tropicales en esta región (Figura 8-b).

Según Woodman (1999), cuando la TSM frente a la costa peruana excede un valor característico, al cual denomina temperatura crítica ( $T_{crit}$ ), las condiciones de estabilidad atmosférica pueden desaparecer trayendo como consecuencia lluvias, tanto beneficiosas como catastróficas, según la magnitud de la excedencia. La  $T_{crit}$  permite a las masas de aire cercanas a la superficie ascender y por tanto, la generación de convección profunda. A partir de una relación empírica entre la TSM frente a la costa peruana y las precipitaciones de la ciudad de Piura, se determinó que este umbral era aproximadamente de  $26^{\circ}\text{C}$ .

### **2.2.2 EFECTOS SOCIOECONÓMICOS**

El evento El Niño de 1997-98, se encuentra mejor documentado que el evento El Niño de 1982-83. Esto debido a que para el primer evento, no se contaba con la previsión del fenómeno y tomó desprevenido al mundo. Por el contrario, para el segundo evento, se tuvo un pronóstico anticipado de seis meses antes de que comenzaran las lluvias.

Según la OPS (2000), las pérdidas directas causadas por el evento El Niño de 1982-83, se estimaron en US\$ 1000 millones, de los cuales 800 millones corresponden al norte del país como consecuencia de las lluvias excesivas, y 200 millones a la Sierra sur, por efectos de la sequía. Para este evento, se estima que los daños en los

sectores productivos (pesca, agricultura, manufactura primaria y comercio) fueron equivalentes al 11.6 por ciento del PBI (valores porcentuales reales), siendo para el evento de 1997-98 del 6.2 por ciento del PBI (MEF, 2014). Según MEF (2014), de presentarse un evento El Niño similar al de 1997-98, la economía peruana registraría una brecha de PBI negativa equivalente al 2.5 por ciento del PBI potencial del año en el que ocurriese el evento.

Para el evento El Niño de 1997-98, el gobierno peruano desarrolló un plan de prevención que se centró en la preservación de la infraestructura mediante la previsión de un drenaje adecuado para el exceso de agua y la distribución de ayuda a los más afectados en la costa norte peruana (Glantz, 2001). Si bien, los impactos para este evento se lograron mitigar e incluso la cantidad de muertes fue menor a la de El Niño de 1982-83 (OPS, 2000), las lluvias intensas y las inundaciones reportadas provocaron daños en la infraestructura hidráulica y urbana (pistas, puentes, alcantarillado, etc.) y a la misma población.

Para la costa norte peruana, los impactos socioeconómicos del evento El Niño de 1997-98, fueron detallados, por cuencas y departamentos, por la Corporación Andina de Fomento (CAF, 2000). Estos impactos, según el sector socioeconómico afectado para las regiones de Tumbes y Piura, fueron:

- Infraestructura vial
  - Colapso de puentes.
  - Erosión, colmatación y destrucción de pistas y carreteras.
  - Inundación de las ciudades y zonas rurales.
  - Daño de estaciones meteorológicas.
- Agua potable y saneamiento:
  - Daños en las redes de alcantarillado.
  - Rotura de las tuberías principales de agua potable.
  - Afectación a la calidad del agua por sedimentos en suspensión.
- Salud:
  - Aparición y propagación de enfermedades.
  - Daños en infraestructura sanitaria de atención.

- Asentamientos humanos:
  - Afectación de viviendas en áreas urbanas y rurales por inundaciones prolongadas y flujos de lodo.
- Agricultura:
  - Daños en infraestructura de riego (canales y drenajes).
  - Pérdida de áreas de cultivo por sedimentación del terreno.
- Pesca (solamente en la región Tumbes):
  - Afectación en la pesca por inundación de langostineras y destrucción de infraestructura.
  - Hundimiento de embarcaciones por marejadas.

Respecto al sector agricultura, en las regiones de Tumbes y Piura, se vienen desarrollando dos proyectos de gran envergadura para la gestión de los recursos hídricos: el Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes (PEBPT) y el Proyecto Especial Chira Piura (PECHP). Este último tiene a su cargo el sistema hídrico más importante para la agricultura de la región Piura constituido por el reservorio Poechos y las presas Ejidos y Sullana.

Durante el evento El Niño de 1997-98, el reservorio Poechos sufrió daños debido a la intensa erosión que se produjo durante el fenómeno; reduciendo su capacidad de almacenamiento (MEF, 1999). Actualmente, la capacidad de almacenamiento de dicho reservorio es del 47 por ciento y existe una creciente preocupación por la llegada de un nuevo evento El Niño de magnitud extraordinaria.

Si bien el impacto de El Niño en las regiones de Tumbes y Piura se debió a la amenaza misma del fenómeno (lluvias intensas, inundaciones, tropicalización), un factor importante fue la vulnerabilidad física de la zona debido a la poca capacidad para el manejo de la información sobre el fenómeno y predicción de su comportamiento.

## **2.4 VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN EN EL PERÚ**

Antes de hablar de la variabilidad de la precipitación, primero, es importante definir la variabilidad climática y a su vez, diferenciarla de otro concepto con el que suele ser vinculada: el cambio climático. El cambio climático para el Panel Intergubernamental de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (IPCC), hace referencia al cambio en el estado del clima identificable a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste por un periodo prolongado (por decenios o más). Puede deberse a procesos naturales internos o a un forzamiento externo. Es decir, denota todo cambio de clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana (IPCC, 2007).

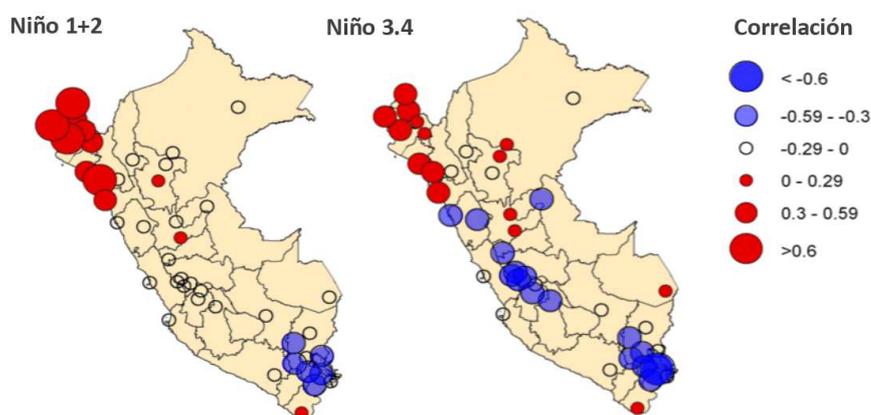
La variabilidad climática se refiere a variaciones en las condiciones climáticas medias (precipitación, temperatura, etc.) y otras estadísticas del clima (desviaciones típicas, los fenómenos extremos, etc.), que pueden suceder en cualquier momento y en cualquier parte del planeta. Esta variabilidad, al igual que el cambio climático, también puede deberse a procesos naturales internos o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropógeno (Lavado et al., 2010). La variabilidad climática se suele estudiar en escalas de tiempo interdecadal, interanual, estacional o intraestacional. Mientras el cambio climático, se atribuye a cambios en el clima que son continuos a largo plazo en el tiempo, la variabilidad climática nos indica cómo el clima fluctúa (e.g. anualmente) respecto a las condiciones climáticas medias.

Se puede decir, que la variabilidad climática consta de dos componentes: las condiciones climáticas medias y el rango de la variable. Las condiciones climáticas medias corresponden a lo que es típico en la zona. Para calcularla, los científicos utilizan promedios de aproximadamente 30 años de la variable a analizar, a la cual se denomina climatología. El utilizar una amplia cantidad de años, permite reducir la influencia de la variabilidad interanual; es decir, suavizar la serie de tiempo de la variable para reducir la variación. Por tanto, si ocurre un evento extremo, éste se puede comparar respecto a la climatología para así conocer su variación respecto a la media. Estudiar estas variaciones, primordialmente respecto a eventos extremos (como lluvias extremas asociadas al Fenómeno El Niño), es importante debido a que estos son los eventos que más afectan a las poblaciones (Dinse, 2011).

El fenómeno El Niño, tal como ya ha sido mencionado, es uno de los aspectos más destacados y conocidos de la variabilidad interanual del clima alrededor del mundo. Por ello, al estudiar la variabilidad climática, se suele pensar en este fenómeno y, una de las variables climáticas más estudiadas, es la precipitación. Respecto a la costa norte del Perú, se han realizado escasos estudios sobre la variabilidad de la precipitación, tanto a escala interanual como diaria.

### **Variabilidad interanual de la precipitación**

Lagos et al. (2008) analizaron la variabilidad de la precipitación y su relación con El Niño en todo el Perú. En dicho estudio, se analizó la relación entre la variabilidad de la precipitación total mensual y las anomalías de temperatura superficial del mar en las regiones Niño comúnmente usadas, para el periodo de 1950-2002. De esta manera, se llegó a la conclusión que la variabilidad interanual de la precipitación es la característica dominante. Asimismo, las precipitaciones extremas durante diciembre a marzo en la costa norte del Perú, están relacionadas a un calentamiento anómalo de la región Niño 1+2; mientras que, en la región andina sur está asociado a un enfriamiento anómalo de la región Niño 3.4 y para la región andina norte, el comportamiento no es muy claro (Figura 9).

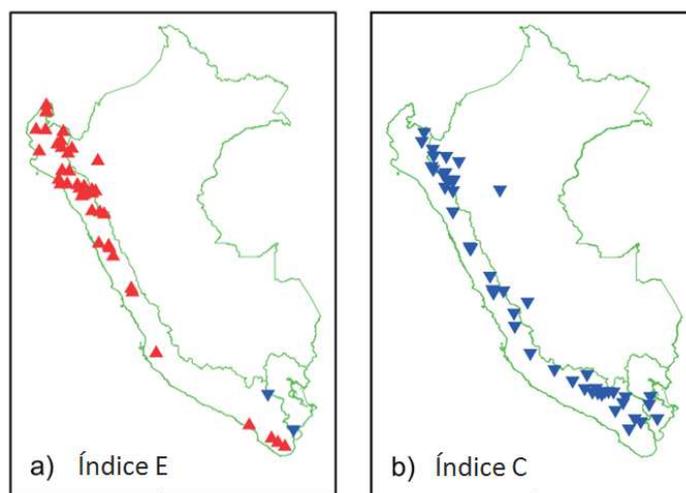


**Figura 9: Correlación de anomalías de precipitación y anomalías de TSM en las regiones Niño 1+2 y Niño 3.4 para febrero**

FUENTE: Lagos et al., 2008.

Si bien el estudio de Lagos et al. (2008), brinda un mayor conocimiento de la variabilidad interanual en el Perú, aún falta explicar ciertos aspectos de la misma. Uno de estos aspectos corresponde al comportamiento de la precipitación en los Andes. A raíz de ello, Lavado y Espinoza (2014) documentaron la variabilidad de la precipitación interanual en

todo el Perú, empleando una base de datos más extensa a nivel espacial. Aquí se empleó la correlación entre la precipitación total anual y los índices E y C definidos por Takahashi et al. (2011); notándose un comportamiento más claro respecto a los Andes. Un incremento de la precipitación a lo largo de la costa peruana está asociado al calentamiento del Pacífico Este, mientras que, a lo largo de los Andes está asociado a un enfriamiento del Pacífico Central (Figura 7 y 10).



**Figura 10: Correlaciones significativas al 95% de la precipitación anual y los valores medios anuales del a) Índice E y b) Índice C (los triángulos rojos representan correlaciones positivas y los triángulos azules representan correlaciones negativas)**

FUENTE: Lavado y Espinoza, 2014.

En lo que respecta a la Amazonía, a fines del evento El Niño 1997-98, se produjo una sequía asociada a la divergencia anómala de vapor de agua en la parte oeste de la cuenca amazónica, la cual es característica de un evento cálido en el Pacífico (Espinoza et al., 2011). En el estudio de Espinoza et al. (2011), también se menciona que se ha presentado cuatro sequías recientes (1995, 1998, 2005 y 2010) que produjeron los caudales más bajos de los últimos cuarenta años de la cabecera de la cuenca Amazónica. Por otro lado, se han documentado años de extremas inundaciones (1986, 1993, 1999 y 2012) en la cuenca amazónica peruana, caracterizados por anomalías negativas durante el verano y primavera austral en el Pacífico Ecuatorial Central y por tanto, asociado a eventos La Niña (Espinoza et al., 2012; Espinoza et al., 2013).

### **Variabilidad mensual y diaria de la precipitación**

A su vez, se ha realizado estudios sobre la variabilidad de la precipitación a nivel mensual y diario para los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98 y su relación con la variabilidad climática en la costa norte peruana. Respecto al evento El Niño de 1982-83, Mikami (1988) estudió los patrones diarios de precipitación en la costa norte del Perú para el mismo evento mediante un Análisis de Componentes Principales. Acorde a este trabajo, existe un patrón espacial que opone los eventos de precipitación en la planicie costera (menor a los 400 msnm) y la zona montañosa (mayor a los 1000 msnm) y, a nivel temporal, se observa que existe una disminución de las lluvias a fines de mayo de 1983. Según Horel et al. (1986), la precipitación en la zona costera peruana se retrasó hasta enero de 1983 y terminó abruptamente a mediados de junio del mismo año (similar a lo encontrado por Mikami (1988)); siendo la actividad convectiva mucho mayor a lo largo de la franja costera que sobre el Pacífico Este Ecuatorial; es decir, más localizada. Asimismo, menciona que la nubosidad estuvo fuertemente modulada en una escala de tiempo diurna.

Ordinola et al. (2001), analizaron la distribución de las lluvias en la costa norte peruana y el sur ecuatoriano para el evento El Niño 1997-98. Durante diciembre de 1997 a abril de 1998, identificaron que las lluvias aumentaron en áreas litorales hasta 1000 por ciento (respecto a su distribución normal), mientras que en el Alto Piura osciló entre 500 a 800 por ciento. El análisis de la distribución espacial de las precipitaciones, mostró que durante este evento las lluvias severas ocurren principalmente en la planicie costera del Ecuador y la costa norte del Perú hasta la curva de nivel de 1000 msnm. En el estudio también se menciona que: “Piura viene perdiendo su característica de bosque seco debido al exceso de humedad aportado por los últimos eventos lluviosos”; resaltando la sensibilidad de la zona al fenómeno El Niño.

Takahashi (2004) menciona la existencia de una cuasi-periodicidad de presencia de lluvias de una semana durante los periodos de diciembre de 1982 a febrero de 1983 y diciembre de 1997 a abril de 1998. En el estudio de Takahashi (2004), se analiza la circulación atmosférica asociada a eventos extremos de lluvia en Piura durante el evento El Niño de 1997-98. Según el estudio, un acrecentamiento del flujo de vientos provenientes del oeste en la tropósfera baja sobre Piura durante días lluviosos, parece estar relacionado a ondas ecuatoriales Kelvin y Rossby que se infiere que se presentan en un periodo de 7 a 10 días.

Douglas et al. (2008) estudiaron la variabilidad sinóptica de la precipitación y la nubosidad sobre la costa norte del Perú y Ecuador durante el evento de 1997-98. A diferencia del estudio de Takahashi (2004), donde se usó la precipitación como indicador de días lluviosos, se emplearon las anomalías del viento zonal (longitudinales). Por tanto, un ingreso de vientos hacia la zona de estudio, era considerado como una anomalía; no obstante, un ingreso de vientos no necesariamente convergirá en precipitación intensa. Se obtuvieron ciertos aspectos de la circulación atmosférica para dichas anomalías, comunes incluso durante el periodo de 1990-2005: los vientos del norte sobre el Golfo de México, la circulación ciclónica cerca al este de los Estados Unidos y los vientos del oeste sobre el Pacífico Ecuatorial Este. Por lo cual, se sugiere que existe una relación entre los ciclones extratropicales del Hemisferio Norte, los vientos y las variaciones de la precipitación a lo largo de las costas de Perú y Ecuador.

El estudio de la variabilidad de la precipitación extrema en la costa norte peruana es importante no solo para la comunidad científica sino para la población. Esta región, dada su ubicación en la zona tropical, se ve afectada por el fenómeno El Niño cuyos eventos pueden alcanzar magnitudes extraordinarias (1982-83 y 1997-98). Sumado a ello, la presencia de la cordillera de los Andes permite la ascendencia de las parcelas de aire a lo largo de la pendiente oeste de los Andes, la cual puede provocar la convección y por tanto, la precipitación. Este proceso conocido como fenómeno “brisa mar-tierra” es uno de los mecanismos que pueden generar sistemas convectivos que desaten la precipitación (Takahashi, 2004; Ordinola et. al, 2001). En resumen, todas estas características hacen que el análisis de la precipitación extrema se torne complejo, por lo cual es necesario establecer relaciones entre las variables hidroclimáticas (vientos, TSM, caudales, etc.), las cuales permitirán comprender cómo estos influyen en la ocurrencia de lluvias intensas.

## 2.5 ANÁLISIS EXPLORATORIO Y CONSISTENCIA DE DATOS

El Análisis Exploratorio de Datos (A.E.D.) es un conjunto de técnicas estadísticas cuya finalidad es conseguir un entendimiento básico de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas. Para ello, el A.E.D. proporciona métodos sistemáticos sencillos para organizar y preparar los datos, detectar fallos en el diseño y recolección de los mismos, tratamiento, evaluación de datos ausentes, identificación de casos atípicos (*outliers*) y otros (Salvador y Gargallo, 2003).

El examen previo de los datos es un paso necesario, que lleva tiempo, y que habitualmente se descuida por parte de los analistas de datos. Las tareas implícitas en dicho examen pueden parecer insignificantes y sin consecuencias a primera vista, pero son una parte esencial de cualquier análisis estadístico. El principal trabajo sobre el Análisis Exploratorio de Datos es el de Tukey (1977), quien hizo una gran contribución con su estudio a las ciencias físicas y sociales. Los objetivos del AED son: examinar las características de los datos y/o relaciones de interés, verificar la existencia de datos atípicos y comprobar las propiedades de homogeneidad en la información original.

La mayoría de las técnicas de AED son de carácter gráfico con algunas técnicas cuantitativas. La razón de la fuerte dependencia de los gráficos es que, por su propia naturaleza, el papel principal de AED es una exploración de mente abierta, donde los gráficos permiten una mejor visión de los datos, obteniendo nuevos conocimientos y revelando sus secretos estructurales. En combinación con las capacidades de reconocimiento de patrones del analista, los gráficos constituyen una herramienta poderosa para llevar esto a cabo.

Algunos métodos del AED son:

- Gráficos para examinar las características de los datos (histogramas, diagramas de barras y diagramas de líneas).
- Análisis de correlación (modelo de regresión lineal, diagramas de dispersión).

Posterior al AED, se pueden aplicar otras metodologías para seguir evaluando la serie de datos. Típicamente en hidrología, se ejecuta un análisis de consistencia. Una serie de datos es llamada homogénea o consistente, si es una muestra de una única población. La no-homogeneidad e inconsistencia en series hidrológicas representa uno de los aspectos

más importantes en el análisis de datos, ya que, cuando no se identifica, la muestra histórica se puede introducir un error significativo en todos los análisis futuros que se realicen, obteniéndose resultados altamente sesgados.

Inconsistencia es sinónimo de error sistemático y se presenta como saltos y tendencias, mientras que, la no homogeneidad es definida como los cambios de los datos brutos con el tiempo, que se pueden deber a diferentes motivos: cambios en el medio ambiente, cambios operacionales, variabilidad propia, etc. Entre las técnicas estadísticas que se aplican para verificar la inconsistencia de una serie, la más usada es la prueba *t-student* (Acápite 3.2.1), la cual permite detectar la inconsistencia en la media ya sea para analizar una o dos muestras.

Asimismo, un análisis de doble masa permite evaluar la consistencia de una serie de valores de algún elemento hidrometeorológico medido en una estación "X" en base a los datos tomados en otra estación o grupo de estaciones "Y", situadas en una zona climática similar y cuya homogeneidad haya sido verificada. Este sistema de homogeneización de series, se utiliza cuando se desea verificar la ocurrencia de un cambio relativo en la variable observada, medida o registrada en una estación meteorológica (Searcy y Hardison, 1960). Si la variable analizada fuera la precipitación, en el análisis de doble masa se compararía la lluvia anual o mensual (valores acumulados), con la precipitación anual o mensual, acumulada de otra estación o grupo de estaciones. Graficando estas dos variables se observa si se presenta un cambio de pendiente, el cual puede deberse a causas diferentes a las meteorológicas.

Por otro lado, también es importante conocer si existen saltos en la muestra. Los saltos son formas determinísticas transitorias que permiten a una serie periódica o no periódica pasar desde un estado a otro, como respuesta a cambios hechos por el hombre, cambios naturales continuos o la propia variabilidad. Es frecuente que los datos de la serie de tiempo contengan variaciones aleatorias, entonces el primer paso en el proceso de su identificación es la suavización de la misma; siendo la técnica más empleada la de los promedios móviles.

El Método del Vector Regional (MVR) se trata de un método de cálculo orientado a dos tareas definidas: La crítica de datos y la homogeneización. La idea básica del método, es la

siguiente: en lugar de comparar pares de estaciones por correlación o doble masa, como se realiza en los métodos clásicos, se elabora una estación ficticia que sea una “especie de promedio” de todas las estaciones de la zona, con la cual se comparan cada una de las estaciones. En lugar de emplear un promedio simple, utiliza el concepto de la precipitación media extendida, evitando los problemas de peso de las estaciones y la falta de datos (Espinoza, 2005).

En el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM, por sus siglas en francés) del Instituto de investigación para el Desarrollo, G. Hiez y Y. Brunet-Moret elaboraron dos métodos para el cálculo del vector regional. El método de Hiez (1977) se basa en el cálculo de la moda (valor más frecuente), mientras que el de Brunet-Moret (1979) se basa en el promedio, eliminando los valores demasiado alejados del promedio para evitar contaminar demasiado las estimaciones con datos evidentemente erróneos. Cada método estima una media extendida para cada estación sobre el periodo de trabajo, y calcula los índices anuales de cada estación, obtenidos al dividir el valor observado en una estación para un año por ésta media extendida.

## **2.6 TÉCNICAS ESTADÍSTICAS MULTIVARIADAS**

Las técnicas estadísticas multivariadas tienen su origen histórico en los primeros años del siglo XX y surgen dentro del marco de la psicología aplicada como una teoría matemática que trata de explicar el concepto de inteligencia. Spearman (1904) y Pearson (1901) trataron de definir una variable que midiese la cantidad de inteligencia y que fuese un compendio o resumen (de hecho una combinación lineal) de los componentes de la misma. Esto sería el origen de lo que luego se denominó el método de los Componentes Principales (Cuadras, 2014).

El ACP se puede definir como una técnica estadística multivariada que permite reducir un número de variables posiblemente relacionadas, en un número menor de variables independientes llamadas Componentes Principales (CPs) empleando el método de Funciones Ortogonales Empíricas (EOFs). Esta metodología se hizo conocida en el análisis de información atmosférica gracias a la publicación de Lorenz (1956) y, es posiblemente, la técnica estadística multivariada más usada en las ciencias atmosféricas (Wilks, 2006).

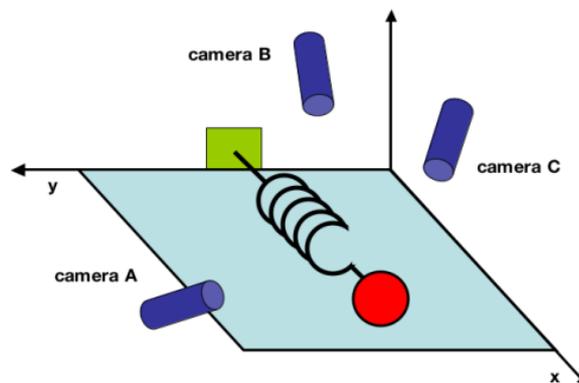
Para ilustrar el concepto del ACP, utilizaremos el ejemplo de Shlens (2005) considerando un modelo físico simple de un resorte ideal (Figura 11). Este sistema consiste en una pelota unida a un resorte sin masa y sin fricción. La pelota se libera una pequeña distancia de equilibrio (es decir, el resorte se estira). Debido a que el resorte es "ideal", oscila indefinidamente a lo largo del eje  $x$  cerca al equilibrio a una frecuencia establecida. Este es un problema estándar en la física en la que el movimiento a lo largo de la dirección  $x$  se resuelve mediante una función explícita de tiempo. En otras palabras, las dinámicas subyacentes pueden ser expresadas como una función de una única variable de  $x$ . Sin embargo, no se conoce cuántos ejes o dimensiones son necesarias para su medición. Por lo general, se decide medir la posición de la pelota en un espacio tridimensional (ya que se vive en un mundo de tres dimensiones).

Si se colocan tres cámaras alrededor del sistema de interés, se obtendría una imagen en dos dimensiones de la posición de la bola (una proyección). Desafortunadamente, tampoco se conocen los verdaderos ejes  $X$ ,  $Y$ , y  $Z$  del modelo propuesto (Figura 11), por eso los tres ejes de la cámara son elegidos en algunos ángulos arbitrarios con respecto al sistema. Lo usual sería medir la posición a lo largo del eje  $X$  con una de las cámaras. No obstante, esto no ocurre en el mundo real. Muchas veces se desconocen qué medidas reflejan mejor la dinámica del sistema en cuestión. Por otra parte, a veces se emplean más dimensiones de las que se necesitan. Además, se debe lidiar con el problema del "ruido". En el ejemplo, este "ruido" sería el aire, cámaras imperfectas o incluso la fricción en un resorte menos ideal, confundiendo aún más la dinámica que se pretende analizar.

El objetivo del Análisis de Componentes Principales es calcular la base más significativa para re-expresar un conjunto de datos ruidosos; es decir, el conjunto de vectores que definen un espacio vectorial. La esperanza es que esta nueva base vectorial filtrará el ruido y revelará la estructura oculta. En el ejemplo del resorte, el objetivo explícito de ACP es determinar: "la dinámica a lo largo del eje  $x$ ". De esta manera, el investigador puede discernir cuáles dinámicas son importantes, cuáles son simplemente redundantes y cuáles son solo ruido (Shlens, 2005).

Si se considera cada muestra de tiempo (o prueba experimental) como una muestra individual en nuestro conjunto de datos. En cada tiempo de registro de la muestra, se registra un conjunto de datos que constan de múltiples mediciones (por ejemplo: posición,

tensión, etc.). Por ejemplo, en un tiempo  $t$ , las cámaras registran una posición  $(x,y)$  de la bola del resorte. Entonces una de las muestras para cierto tiempo  $t$  puede ser expresada como un vector fila de 6 dimensiones (dos coordenadas por cámara) y, si se realizan 100 mediciones, se tendrá una matriz de datos de dimensiones  $100 \times 6$ . De manera equivalente, si existieran más parámetros analizados ( $N$ ) y se tomaran  $M$  muestras, se tendría un conjunto de datos de dimensiones  $N \times M$ . Cada muestra de este conjunto de datos es un vector que se encuentra en un espacio vectorial de  $M$  dimensiones abarcado por una base vectorial ortonormal. Según el álgebra lineal, se conoce que todas las mediciones o muestras (vectores) forman una combinación lineal del conjunto del vector base. El propósito del ACP es determinar esa combinación lineal que mejor exprese los datos. Esta combinación lineal se denomina Funciones Ortogonales Empíricas (EOFs), los cuales permiten re proyectar los datos iniciales obteniendo nuevas series de datos llamados Componentes Principales (CPs).



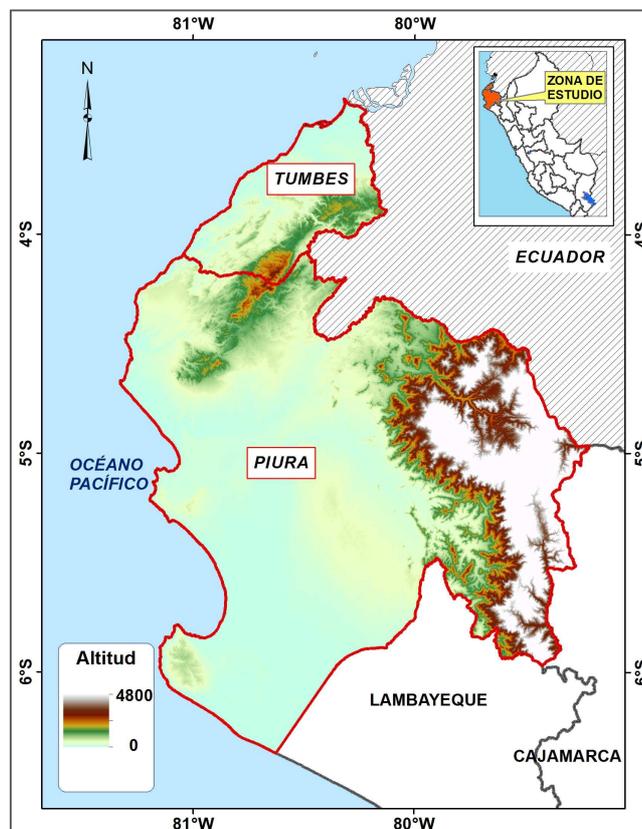
**Figura 11: Esquema de un resorte ideal**  
FUENTE: Shlens, J. 2005.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MATERIALES

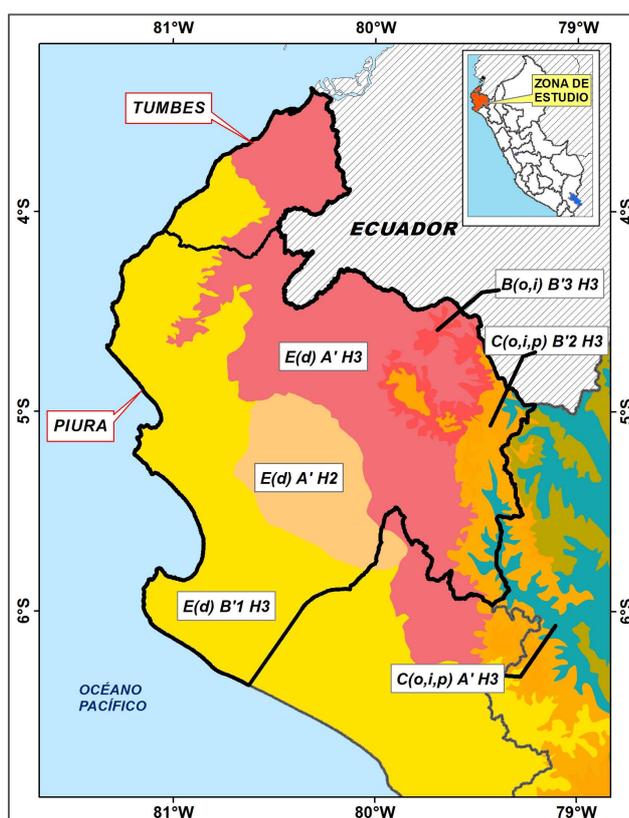
##### 3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Las regiones de Tumbes y Piura, ubicadas en la costa norte del Perú, son regiones fuertemente influenciadas por el Fenómeno El Niño. Geográficamente, estas regiones se sitúan entre los paralelos 3.38°- 6.37° latitud sur y los meridianos 79.25°-81.3° longitud oeste. La topografía de esta zona es bastante diversa con una altitud que varía desde 0 m a 4800 m (Figura 12). Esta variación altitudinal se debe a la presencia de la cadena montañosa de los Andes que cruza la zona este de la región Piura, la cual influye en los procesos atmosféricos locales.



**Figura 12: Altimetría de la zona de estudio (regiones de Tumbes y Piura)**  
FUENTE: Elaboración propia usando el Modelo Digital de Elevación ASTER-GDEM

Según la clasificación climática realizada por el SENAMHI (1988) mediante el método de THORNTHWAITE (Figura 13), las regiones de Tumbes y Piura presentan seis regiones climáticas clasificadas acorde a la precipitación efectiva, distribución de la precipitación en el año, eficiencia de temperatura y humedad atmosférica. Las primeras siglas de la región climática (e.g. E(d)) hace referencia a los dos primeros parámetros empleados para su clasificación, los cuales son de interés para esta investigación.



**Figura 13: Clasificación climática en las regiones de Tumbes y Piura**

**E(d) A'H3:** Árido con deficiencia de lluvias - cálido húmedo, **E(d) A'H2:** Árido con deficiencia de lluvias – cálido seco, **E(d) B'1H3:** Árido con deficiencia de lluvias – semicálido húmedo, **B(o,i) B'3H3:** Lluvioso con otoño e invierno seco – semifrío húmedo, **C(o,i,p) B'2H3:** Semiseco con otoño, invierno y primavera seco – templado húmedo, **C(o,i,p) A'H3:** Semiseco con otoño, invierno y primavera seco – cálido húmedo

FUENTE: Modificado de SENAMHI (1988)

Usando los criterios asociados a la precipitación, las regiones climáticas de la zona de estudio se pueden agrupar de la siguiente manera:

- **E(d) A'H3, E(d) A'H2 y E(d) B'1H3** (Tumbes y cuenca baja y media de Piura): Zona de clima desértico, con deficiencia de lluvia en todas las

estaciones. Puede presentar clima cálido y semicálido con humedad relativa calificada como húmeda o seca.

- **B(o,i) B'3H3, C(o,i,p) B'2H3 y C(o,i,p) A'H3** (cuena alta de Piura): Zona lluviosa o semiseca (vegetación de bosque y pastizal), con lluvia deficiente en otoño, invierno y primavera y humedad relativa calificada como húmeda. Puede presentar clima semifrío, templado o cálido.

Por otro lado, estas regiones presentan seis unidades hidrográficas, de las cuales cinco de ellas pertenecen a la vertiente del Pacífico (cuena Tumbes, Zarumilla, Chira, Piura y Bocapán) y una de ellas a la vertiente del Atlántico (cuena Chamaya). Las primeras cuatro cuenas son importantes para la gestión de los recursos hídricos de la región y en ellas se desarrollan proyectos de gran envergadura: el PEBPT involucra la cuena del río Tumbes y el PECHP involucra las cuenas de los ríos Chira y Piura. Ambos proyectos están encargados de la administración, planificación y mantenimiento de la infraestructura hidráulica (canales, red hidrometeorológica, drenes, etc.).

### **3.1.2 INFORMACIÓN CLIMÁTICA**

La información pluviométrica ha sido obtenida a partir de las estaciones meteorológicas administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Se ha recolectado información pluviométrica diaria de 29 estaciones meteorológicas (Figura 14): 7 estaciones ubicadas en la región Tumbes (Tabla 2) y 22 estaciones ubicadas en la región Piura (Tabla 3). Las 29 estaciones meteorológicas poseen información durante el evento El Niño de 1997-98, mientras que, solo 15 de ellas poseen información pluviométrica durante el evento El Niño 1982-83. Estas últimas están señaladas con un asterisco en la Tabla 2 y 3.

El periodo de registro total de la información pluviométrica corresponde al periodo 1963-2009, cuyos periodos de registro por estación se detallan en el Anexo 2. Las estaciones con la mayor y menor cantidad de información anual completa son: Pananga con 45 años de registro y Malacasi con 7 años de registro, respectivamente.

De las estaciones ubicadas en Tumbes, en su totalidad pertenecen a la vertiente del Pacífico, mientras que de las estaciones ubicadas en Piura, solo 15 de ellas pertenecen a dicha vertiente. Las siete estaciones restantes que pertenecen a la vertiente del Atlántico son: Hacienda Shumaya, Huancabamba, Huarmaca, Porculla, Salala, Sondorillo y Tuluze (Tabla 3).

**Tabla 2: Ubicación de estaciones meteorológicas en la región Tumbes**

N°	Nombre	Tipo	Provincia	Distrito	Cuenca	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (m)
1	El Salto*	CO	Zarumilla	Zarumilla	Intercuenca 13951	03° 26' 26"	80° 19' 19"	6
2	El Tigre*	PLU	Tumbes	San Jacinto	Cuenca Tumbes	03° 46' 01"	80° 27' 01"	61
3	Matapalo	PLU	Zarumilla	Matapalo	Cuenca Zarumilla	03° 40' 40"	80° 12' 12"	70
4	Papayal	CO	Zarumilla	Papayal	Cuenca Zarumilla	03° 34' 34"	80° 14' 14"	45
5	Puerto Pizarro*	CO	Tumbes	Tumbes	Cuenca Tumbes	03° 30' 30"	80° 27' 26"	7
6	Cañaverall	CO	Contralmirante Villar	Casitas	Cuenca Bocapán	03° 56' 56"	80° 39' 39"	159
7	Rica Playa*	CO	Tumbes	Pampas de Hospital	Cuenca Tumbes	03° 48' 48"	80° 27' 27"	113

Nota: PLU: Pluviométrica, CO: Climatológica Ordinaria

(\*) Estaciones con información para el evento El Niño de 1982-83

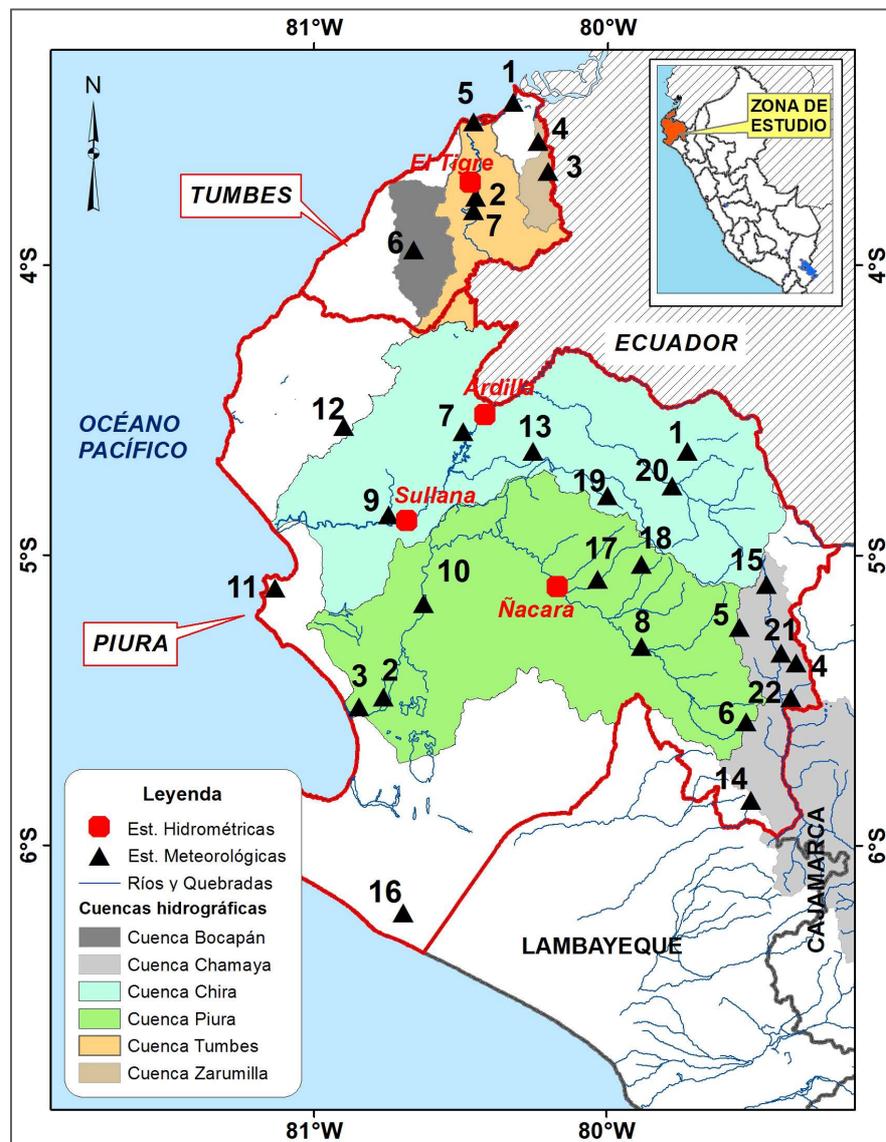
**Tabla 3: Ubicación de estaciones meteorológicas en la región Piura**

N°	Nombre	Tipo	Provincia	Distrito	Cuenca	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (m)
1	Ayabaca*	CP	Ayabaca	Ayabaca	Cuenca Chira	04° 38' 38"	79° 43' 43"	2830
2	Bernal	CO	Sechura	Bernal	Cuenca Piura	05° 29' 29"	80° 45' 45"	7
3	Chusis	CO	Sechura	Sechura	Cuenca Piura	05° 31' 31"	80° 50' 50"	6
4	Hacienda Shumaya	PLU	Huancabamba	Sondor	Cuenca Chamaya	05° 22' 22"	79° 21' 21"	2050
5	Huancabamba*	CP	Huancabamba	Huancabamba	Cuenca Piura	05° 15' 01"	79° 33' 01"	3177
6	Huarmaca*	CO	Huancabamba	Huarmaca	Cuenca Chamaya	05° 34' 34"	79° 31' 31"	2142
7	Lancones*	CO	Sullana	Lancones	Cuenca Chira	04° 34' 34"	80° 29' 29"	123
8	Malacasi	PLU	Morropón	Salitral	Cuenca Piura	05° 19' 01"	79° 53' 01"	240
9	Mallares*	CP	Sullana	Marcavelica	Cuenca Chira	04° 51' 51"	80° 44' 44"	29
10	Miraflores*	MAP	Piura	Piura	Cuenca Piura	05° 10' 10"	80° 37' 37"	30
11	Paita	CO	Paita	Paita	Intercuenca 1379	05° 07' 01"	81° 08' 01"	40
12	Pananga*	PLU	Sullana	Marcavelica	Cuenca Pariñas	04° 33' 33"	80° 53' 53"	500
13	Partidor	CO	Piura	Las Lomas	Cuenca Chira	04° 38' 38"	80° 15' 15"	250
14	Porculla	CO	Huancabamba	Huarmaca	Cuenca Chamaya	05° 50' 50"	79° 30' 30"	1971
15	Salala	CO	Huancabamba	El Carmen de la Frontera	Cuenca Chamaya	05° 06' 06"	79° 27' 27"	2800

16	San Miguel	MAP	Piura	Catacaos	Cuenca Piura	06° 14' 14"	80° 41' 41"	20
17	San Pedro*	PLU	Morropon	Chulucanas	Cuenca Piura	05° 05' 05"	80° 02' 02"	309
18	Santo Domingo*	PLU	Morropon	Santo Domingo	Cuenca Piura	05° 02' 01"	79° 53' 01"	1475
19	Sapilica	PLU	Ayabaca	Sapillica	Cuenca Chira	04° 47' 47"	79° 59' 59"	1406
20	Sausal de Culucan*	CO	Ayabaca	Lagunas	Cuenca Chira	04° 45' 45"	79° 46' 46"	1015
21	Sondorillo*	CO	Huancabamba	Sondorillo	Cuenca Chamaya	05° 20' 20"	79° 24' 24"	1900
22	Tuluce	PLU	Huancabamba	Sondorillo	Cuenca Chamaya	05° 29' 29"	79° 22' 22"	1920

Nota: PLU: Pluviométrica, CO: Climatológica Ordinaria, CP: Climatológica Principal, MAP: Meteorológica Agrícola Principal.

(\*) Estaciones con información para el evento El Niño de 1982-83



**Figura 14: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas (regiones de Tumbes y Piura)**

\*La numeración de las estaciones meteorológicas corresponde al N° asignado en la Tabla 2 y 3

Asimismo, se ha recolectado información de los índices climáticos mensuales E y C de Takahashi et al. (2011) y de dos variables globales climáticas: velocidad de vientos (zonales y meridionales) y radiación de onda larga saliente (Outgoing Longwave Radiation - OLR). La información de estas dos últimas variables ha sido obtenida del conjunto de datos del proyecto “Reanalysis” del NCEP/NCAR de la NOAA (Kalnay et al., 1996) y de los satélites de órbita polar del Centro Nacional de Data Climática de la NOAA de los Estados Unidos, respectivamente (Anexo 5.3 para descarga de datos). Cabe resaltar que, respecto a los datos de vientos, se optó por un nivel de presión de 850 hPa para el estudio de la tropósfera baja.

Los Centros Nacionales de Predicción Medioambiental y de Investigación Atmosférica (NCEP/NCAR, por sus siglas en inglés) cooperaron en un proyecto denominado como “reanalysis” para producir un récord de 40 años de análisis globales de los campos atmosféricos en apoyo de las necesidades de las comunidades de investigación y vigilancia del clima (Kalnay et al., 1996). El “reanalysis” climático proporciona una descripción numérica del clima actual, producida mediante una combinación de modelos con datos observados. Estos modelos contienen parámetros atmosféricos estimados como la temperatura del aire, presión, viento, precipitación en superficie, etc.

**Tabla 4: Características de la información climática global**

<b>Variable o Índice climático</b>	<b>Periodo</b>	<b>Nivel de presión</b>	<b>Unid.</b>	<b>Base de datos</b>	<b>Tipo</b>	<b>Resolución</b>
Índice E y C	1963-2009	--	--	CPNTC-IGP (2014)	Series de tiempo	--
Velocidad de vientos	1981-2010	850 hPa	m/s	NCEP/NCAR Reanalysis (2014)	Vectorial	2.5° x 2.5°
OLR	1981-2010	Tropósfera alta	W/m <sup>2</sup>	NOAA/OAR/ESRL (2014)	Ráster	2.5° x 2.5°

Por lo tanto, a diferencia de los componentes de vientos que son producto de modelos climáticos, la OLR es una variable medida (observada) aunque en algunos casos los datos faltantes de esta variable son interpolados espacial y temporalmente (Liebmann y Smith, 1996). Entonces, dado que los datos de vientos son producto del “reanalysis”, éstos pueden tener problemas para reproducir lo ocurrido en la

realidad a falta de datos observados principalmente en el mar peruano. Las características de información climática recolectada se presentan en la Tabla 4.

### 3.1.3 INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

La información hidrométrica ha sido obtenida a partir de las estaciones administradas por el Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes (PEBPT) y el Proyecto Especial Chira Piura (PECHP). Se ha recolectado información hidrométrica diaria de cuatro estaciones hidrométricas (Figura 14): una estación ubicada en la región Tumbes y tres estaciones ubicadas en la región Piura (Tabla 5). El periodo de registro corresponde a 1963-2012.

**Tabla 5: Ubicación de estaciones hidrométricas en las regiones de Tumbes y Piura**

N°	Nombre	Dpto.	Provincia	Distrito	Cuenca	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (m)
1	El Tigre	Tumbes	Tumbes	San Jacinto	Cuenca Tumbes	03° 43' 01"	80° 28' 01"	82
2	Sullana (Puente Sullana)	Piura	Sullana	Salitral	Cuenca Chira	04° 53' 01"	80° 41' 01"	25
3	Ñacara (Puente Ñacara)	Piura	Morropón	Chulucanas	Cuenca Piura	05° 06' 36"	80° 10' 12"	76
4	Ardilla (Solana Baja)	Piura	Sullana	Lancones	Cuenca Chira	04° 31' 01"	80° 25' 01"	112

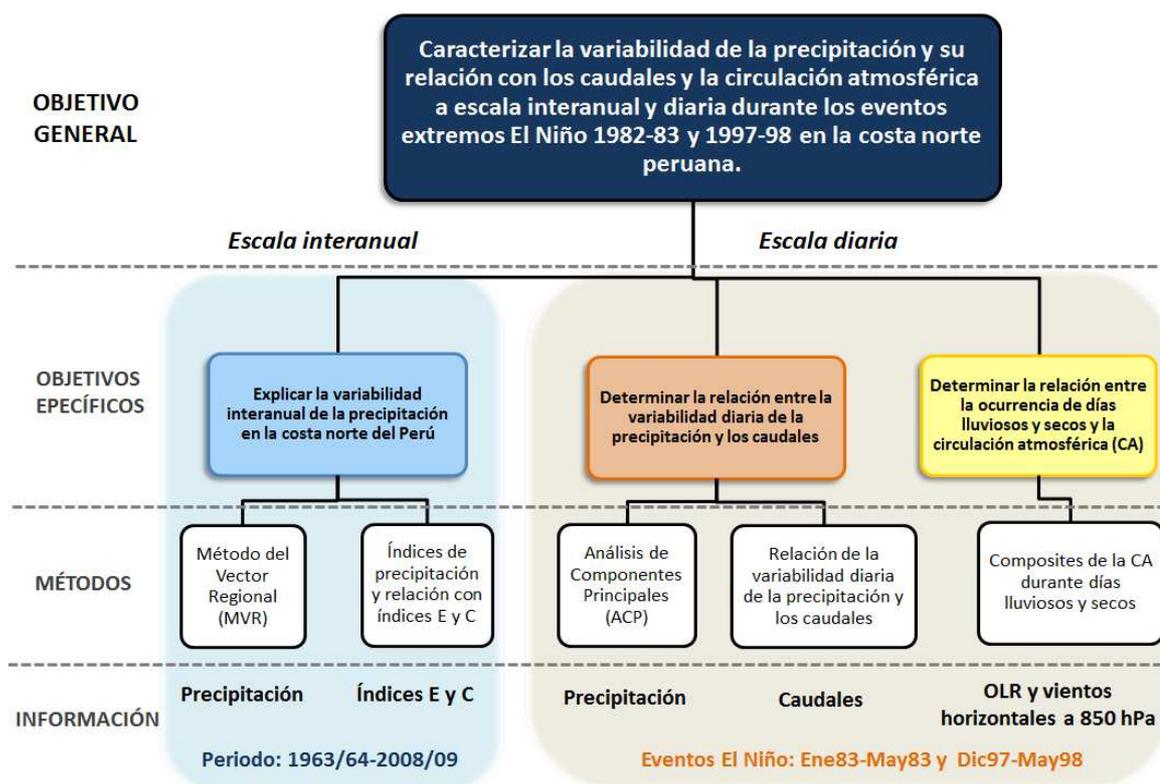
### 3.1.4 EQUIPOS Y SOFTWARES

En la presente investigación se han utilizado los siguientes equipos de gabinete y programas de cómputo:

- a. Equipos de gabinete
  - Laptop Sony Vaio, Modelo VPCCA17FL, procesador Intel Core i5, memoria RAM de 4GB
  - Impresora HP Deskjet F4180
- b. Programas de cómputo
  - Microsoft Office 2010
  - Qgis 2.2.0
  - Octave
  - R-versión 3.0.2
  - Hydraccess
  - RClimDex 1.0

## 3.2 MÉTODOS

En el presente acápite, se detallan las técnicas y procedimientos de análisis empleados para cumplir los tres objetivos específicos planteados en la presente investigación. El esquema de la metodología se muestra en la Figura 15, donde acorde al objetivo se usó la información climática e hidrométrica detallada en el Acápite 3.1.



**Figura 15: Esquema de la metodología de la investigación según objetivos específicos**

### 3.2.1 VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA PRECIPITACIÓN

#### a. Método del Vector Regional (MVR)

Para la obtención del Vector Regional, se aplicó el método de Brunet-Moret para las series temporales de precipitación total anual durante el año hidrológico (setiembre-agosto) de 24 estaciones meteorológicas mediante el paquete computacional HYDRACCESS (Anexo 5.1). Esta metodología permite utilizar registros de precipitación incompletos y, por tanto, no se ha realizado una completación de datos. Para esta etapa, se han considerado las estaciones

meteorológicas con un registro mayor a 20 años siendo en total 24 estaciones (periodo 1963/64-2008/09). De las estaciones de la Tabla 2, se emplearon todas a excepción de Matapalo y de las estaciones de la Tabla 3, se emplearon todas a excepción de Malacasi, Paita, Partidor y Salala.

Primero, se debe crear un conjunto de datos de las precipitaciones totales anuales de la zona de estudio (matriz  $A$ ), donde las columnas representan las estaciones ( $M$ ) y las filas los años ( $N$ ); es decir, una matriz de dimensión  $N \times M$ . La matriz  $A$  corresponde a la suma de dos matrices ( $B$  y  $E$ ). La primera ( $B$ ) representa la información teórica buscada y la segunda ( $E$ ), las perturbaciones aleatorias.

Según Brune-Moret (1979), una zona climática puede estar representada por un vector cuya esperanza matemática es igual a 1. Entonces, la matriz  $A$  ( $B+E$ ) se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{P_{ij}}{P_{mj}} = Z_i + E_{ij} \quad (1)$$

Donde:

- $P_{ij}$  = Precipitación total anual de la estación  $j$  para el año  $i$
- $P_{mj}$  = Precipitación media extendida de la precipitación total anual de la estación  $j$
- $Z_i$  = Índice pluviométrico regional para el año  $i$
- $E_{ij}$  = Fluctuación aleatoria del año  $i$  de la estación  $j$

La matriz  $A$  se compone de las precipitaciones de  $M$  estaciones durante  $N$  años y, por lo general, se encuentra con datos faltantes. Con el fin de determinar cada  $P_{mj}$  y  $Z_i$ , y usando el método de Mínimos Cuadrados, el algoritmo del cálculo consiste en minimizar la sumatoria de la ecuación:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left( \frac{P_{ij}}{P_{mj}} - Z_i \right)^2 \quad (2)$$

Si en el año  $i$ , se tiene  $p$  estaciones con información y se deriva la ecuación anterior por  $Z_i$ , se obtienen  $N$  ecuaciones:

$$Z_i = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \left( \frac{P_{ij}}{P_{mj}} \right) \quad (3)$$

Al reemplazar el valor de  $Z_i$  en la Ecuación 3 y derivando por  $1/P_{mj}$ , se obtienen  $M$  ecuaciones con  $M$  incógnitas. De la solución de este sistema de ecuaciones, se obtiene el índice pluviométrico regional por año, cuyo conjunto de datos son conocidos como el vector regional. De igual manera, para cada estación se obtendrá un índice anual pluviométrico que corresponderá a la serie de valores de  $P_{ij}/P_{mj}$ .

### **Parámetros para la identificación de regiones homogéneas**

Preliminarmente, se agruparon las estaciones meteorológicas según la clasificación climática previa de la zona acorde a los parámetros de precipitación efectiva y distribución de la precipitación en el año (Acápite 3.1.1, Figura 13). El MVR fue aplicado a cada grupo de estaciones y, para evaluar la calidad de una estación respecto al vector, se realizó un análisis de regresión lineal entre el índice pluviométrico regional por estación y el vector regional.

#### ***a. Análisis de regresión lineal***

Un modelo de regresión es una expresión matemática que explica la relación lineal entre dos tipos de variables: variable independiente (*predictor*) y variable dependiente (*predictand*). El objetivo de la regresión lineal es resumir el comportamiento de las variables analizadas. Se expresa de manera general mediante la siguiente ecuación:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots b_jx_j + \mathcal{E} \quad (4)$$

Donde:

- $y$  = Variable dependiente
- $x_1, x_2, \dots, x_j$  = Variables independientes
- $b_1, b_2, \dots, b_j$  = Coeficiente de regresión
- $\mathcal{E}$  = Error típico

Se dice que una regresión lineal es simple, cuando el modelo matemático sólo consta de dos variables ( $x$  e  $y$ ). Cuando posee más de dos variables, se denomina

regresión lineal múltiple. El modelo de regresión se expresa gráficamente mediante un diagrama de dispersión, siendo más complejo cuando se tiene más de dos variables debido al espacio multidimensional.

El coeficiente de correlación lineal de Pearson mide el grado de asociación de dos variables. Tiene la característica de ser adimensional y variar en un rango de -1 y 1, donde un valor de  $r=1$  denota una correlación positiva perfecta. Por otro lado si  $r=-1$ , existe una asociación lineal negativa de las variables. Si  $r=0$  significa que existe una independencia lineal entre las variables; es decir, no están correlacionadas. Este parámetro estadístico se puede expresar en función de otras dos medidas estadísticas: la covarianza y desviación estándar (Ecuación 2). La covarianza ( $Cov$ ) mide el grado de la variación conjunta entre dos variables. Mientras que, la desviación estándar ( $s$ ) es la medida de la desviación de la dispersión de los datos de una variable respecto a la media. La varianza ( $s^2$ ) también mide el grado de la dispersión de los datos y, dado a que corresponde al cuadrado de la desviación estándar, permite una mejor comparación entre las varianzas de diferentes variables.

$$r_{xy} = \frac{Cov}{s_x s_y} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]} \sqrt{\left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (5)$$

Donde:

- $r_{xy}$  = Coeficiente de correlación lineal de Pearson entre las variables  $x$  e  $y$
- $Cov$  = Covarianza estadística de las variables  $x$  e  $y$
- $s_x, s_y$  = Desviación estándar de la variable  $x, y$
- $\bar{x}, \bar{y}$  = Promedio de la serie de datos de la variable  $x, y$
- $n$  = Número de datos analizados

Asimismo, moviendo las constantes del denominador de la Ecuación 5 hacia la suma del numerador, se obtiene lo siguiente:

$$r_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(x_i - \bar{x})}{s_x} \frac{(y_i - \bar{y})}{s_y} \right] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [z_{x_i} z_{y_i}] \quad (6)$$

Donde:

- $r_{xy}$  = Coeficiente de correlación lineal de Pearson entre las variables  $x$  e  $y$
- $s_x, s_y$  = Desviación estándar de la variable  $x, y$
- $z_x, z_y$  = Valores estandarizados de la variable  $x, y$
- $\bar{x}, \bar{y}$  = Promedio de la serie de datos de la variable  $x, y$
- $n$  = Número de datos analizados

Un valor estandarizado ( $z_{xi}$ ) corresponde al valor resultante después de sustraer la media y la división entre la desviación estándar de la población de datos de la variable ( $x$ ). Entonces, la correlación lineal de Pearson se puede expresar como el promedio del producto de los valores estandarizados de las variables analizadas (Ecuación 6).

Por otro lado, es necesario evaluar la significancia estadística dado un cierto coeficiente de correlación  $r_{xy}$  obtenido, comprobando si dicho coeficiente se encuentra dentro de la distribución muestral especificada por la hipótesis nula (no correlación). En otras palabras, la significancia estadística viene a ser la “probabilidad” de que dos variables no estén correlacionadas.

A efectos prácticos, se calcula el número de desviaciones tipo que se encuentran en el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la ecuación. Se compara el valor del estadístico obtenido, con el existente en las tablas para un nivel de significación  $\alpha$  y  $n-2$  grados de libertad.

$$t = r_{xy} \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{xy}^2}} \quad (7)$$

Donde:

- $t$  = Estadístico *t-student*
- $r_{xy}$  = Coeficiente de correlación lineal de Pearson entre las variables  $x$  e  $y$
- $n$  = Número de datos analizados

### ***b. Evaluación de la calidad de una estación respecto al vector***

Se evaluaron dos parámetros importantes, que permiten evaluar la calidad de una estación respecto al vector:

- La Desviación Estándar de los Desvíos (D.E.D) compara la desviación de una estación respecto al vector, un valor alto indica elevadas desviaciones.
- La correlación entre la estación y el vector. Si la zona es homogénea climáticamente, los valores serán cercanos entre sí, si un valor es muy alto o más bajo que el promedio de la zona, entonces la estación tiene una alta probabilidad de tener errores o que se encuentre en el margen de la zona. Asimismo, es importante conocer el nivel de significancia de esta correlación, la cual estará ligada al número de datos analizados.

Cuando la D.E.D presentó valores bajos (menores a 1) y se obtuvieron valores altos y significativos de la correlación entre la estación y el vector (mayores a 0.9), se aceptaron las regiones homogéneas. Si alguna estación presentaba correlaciones bajas (menores a 0.9), se incorporaba a la región en la que presentara mayor correlación.

### ***b. Índices de precipitación***

Se han calculado diez índices de precipitación recomendados por el Equipo de Expertos para el Cambio Climático Monitoreo Detección e Índices (ETCCDMI, por sus siglas en inglés); conformado por la Comisión de Climatología de la Organización Meteorológica Mundial y el proyecto CLIVAR del Programa Mundial de Estudios sobre el clima. Los índices fueron: *PRCPTOT*, *SDII*, *R10*, *R20*, *CDD*, *CWD*, *R95p*, *R99p*, *RX1day* y *RX5day* (Tabla 6).

El cálculo se realizó mediante el software RCLimDex (Zang, X. y Yang F, 2004; ver Anexo 5.2), el cual proporciona una interfaz fácil de usar para obtener los índices de extremos climáticos. Este software calcula 27 índices básicos recomendados por el ETCCDMI, así como algunos otros índices de temperatura y precipitación con umbrales definidos por el usuario. Se han calculado los índices a nivel anual (setiembre-agosto) para el periodo de 1963/64-2008/09 considerando un máximo de 15 días faltantes por año; tomando las mismas consideraciones del workshop realizado en Brasil por el ETCCDMI en el 2004 (Haylock et al., 2006). Se define

un día húmedo como aquel día donde la precipitación registrada es mayor o igual a 1 mm, y día seco, cuando la precipitación es menor a 1mm.

**Tabla 6: Definición de índices de precipitación**

Índice	Unid.	Definición
<i>PRCPTOT</i>	mm	Precipitación total anual de los días húmedos
<i>SDII</i>	mm/d	Precipitación promedio de los días húmedos
<i>CDD*</i>	día	Máximo número de días secos consecutivos
<i>CWD*</i>	día	Máximo número de días húmedos consecutivos
<i>R10</i>	día	Cantidad de días en el año donde la precipitación diaria es $\geq 10$ mm
<i>R20</i>	día	Cantidad de días en el año donde la precipitación diaria es $\geq 20$ mm
<i>R95p</i>	mm	Precipitación total anual (cuando la precipitación diaria es mayor al percentil 95)
<i>R99p</i>	mm	Precipitación total anual (cuando la precipitación diaria es mayor al percentil 99)
<i>RX1day</i>	mm	Precipitación diaria máxima en el año
<i>RX5day</i>	mm	Precipitación máxima de 5 días consecutivos en el año

FUENTE: Haylock et al., 2006.

(\*) Indicadores de temporada

Para los indicadores de duración de temporada (marcados con un \*), una temporada puede continuar en el año siguiente y se la cuenta en el año en que la temporada termina e.g. una temporada fría (CSDI) en el Hemisferio Norte comenzando el 31 de diciembre del 2000 y terminando el 6 de enero del 2001, se toma en cuenta dentro del número total de temporadas frías del año 2000/01.

Mediante estos índices se analizaron los diferentes aspectos de la precipitación:

- Intensidad de precipitación total (mm, mm/d): *PRCPTOT* y *SDII*.
- Intensidad de las precipitaciones extremas (mm): *R95p*, *R99p*, *RX1day* y *RX5day*.
- Frecuencia de las precipitaciones (días): *CWD*, *CDD*, *R10* y *R20*.

Posteriormente, estos índices de precipitación fueron relacionados con las condiciones de la temperatura superficial del mar del Pacífico Tropical Este (Índice *E*) y Pacífico Tropical Central (Índice *C*) de Takahashi et al. (2011), previamente explicados en el Acápite 2.1.3. Se correlacionó cada uno de los índices anuales de

precipitación con los valores anuales del promedio de los índices *E* y *C* durante diciembre y marzo (época lluviosa); considerando un nivel de significancia al 90 por ciento. Finalmente, para cada uno de los índices de precipitación se elaboraron dos mapas espaciales de las correlaciones (para los índices *E* y *C*).

### **3.2.2 VARIABILIDAD DIARIA DE LA PRECIPITACIÓN Y SU RELACIÓN CON LOS CAUDALES DURANTE LOS EVENTOS EL NIÑO 1982-83 Y 1997-98**

#### ***a. Análisis espacio-temporal de la precipitación diaria***

Para el análisis de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación diaria durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98, se aplicó una técnica estadística multivariada llamada Análisis de Componentes Principales (ACP), técnica que fue empleada por Mikami (1988). Posteriormente, al igual que en el estudio de Takahashi (2004), se realizó una selección de días lluviosos y secos.

#### **Análisis de Componentes Principales**

La metodología del ACP basado en la matriz de correlaciones se aplicó para cada evento El Niño por separado. Para El Niño 1982-1983, se analizaron 15 estaciones meteorológicas con información pluviométrica diaria disponible desde enero de 1983 a mayo de 1983 (Tabla 2 y 3). El periodo de estudio no contempló el mes de diciembre de 1982 debido a que, al considerarlo, la cantidad de estaciones ubicadas en Tumbes (importantes para el Proyecto Manglares) disminuían al no contar con información completa para dicho mes. Mientras que, para El Niño 1997-1998, se emplearon las 29 estaciones meteorológicas (Tabla 2 y 3). Estas estaciones poseen información pluviométrica diaria desde diciembre de 1997 a mayo de 1998.

Existen dos métodos para realizar el ACP para un número de series de tiempo y con los que se obtienen resultados similares: método basado en la matriz de correlaciones y método basado en la matriz de covarianza. Para el caso del análisis espacio-temporal de la precipitación diaria durante los eventos extremos El Niño 1982-83 y 1997-98, se empleó el primer método. En primer lugar, se preparó la data estandarizando cada serie de tiempo por estación; se extrajo la media y se

dividió por su desviación estándar. La normalización fue importante para que no exista dominancia de una estación sobre la otra. Posteriormente, a partir de las series estandarizadas, se construyó una matriz  $X$  (de dimensiones  $N \times M$ ), donde  $N$  es el número de filas (tiempo) y  $M$  es el número de columnas (variables o estaciones). La matriz de correlaciones (similar a la Ecuación 6) se obtuvo de la siguiente manera:

$$C = \frac{1}{N-1} (X^T \times X) \quad (8)$$

Donde:

- $C$  = Matriz de correlaciones
- $N$  = Número de días analizados
- $M$  = Número de estaciones
- $X$  = Matriz de datos estandarizados de la precipitación diaria de dimensiones  $N \times M$
- $X^T$  = Matriz transpuesta de  $X$

Luego de que se calculó la matriz de correlaciones, se realizó su descomposición en valores propios, representada por las siguientes ecuaciones:

$$C = E \times \Lambda \times E^T \quad (9)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_k & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_M \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde:

- $C$  = Matriz de correlaciones
- $E$  = Matriz de las Funciones Ortogonales Empíricas (EOFs, por sus siglas en inglés) o también conocida como vectores propios
- $E^T$  = Matriz transpuesta de los EOFs
- $\Lambda$  = Matriz de los valores propios
- $\lambda_k$  = Valor propio para el componente principal  $k$

La matriz de los EOFs, es una matriz ortogonal; es decir, una matriz cuadrada (de dimensión  $M \times M$ ) y cuya matriz transpuesta coincide con su matriz inversa. Al multiplicar una matriz ortogonal por su transpuesta, se obtiene la matriz identidad ( $I$ ). Este tipo de matriz es el elemento neutro del producto de matrices, ya que al multiplicarlo por otra matriz no causa ningún efecto. Esto indica que los EOFs no se correlacionan en el espacio. De la Ecuación 9, primero se calcularon los valores propios y, posteriormente, los vectores propios.

La matriz  $\Lambda$  contiene en la diagonal los llamados valores propios ordenados de mayor a menor ( $\lambda_k$ ), por ello el primer componente (PC1) siempre explica el mayor porcentaje de varianza. Por otro lado, la matriz  $E$  contiene los vectores propios que se conocen como EOFs. Cada columna corresponde a un componente y cada fila corresponde a la correlación de cada estación con el componente.

La serie reducida a nivel temporal o también llamados Componentes Principales (CPs), se obtuvieron mediante la Ecuación 11. Posteriormente, estos componentes fueron estandarizados.

$$Z = X * E \quad (11)$$

Donde:

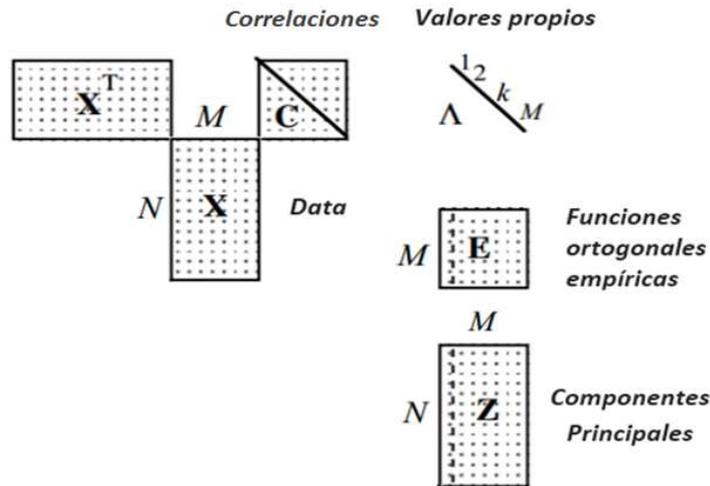
- $Z$  = Serie reducida a nivel temporal o también llamada Componentes Principales (CPs)
- $X$  = Matriz de datos estandarizados de la precipitación diaria de dimensiones  $N \times M$
- $E$  = Matriz de los EOFs de dimensiones  $M \times M$

El formalismo del Análisis de Componentes Principales se presenta en la Figura 16. En resumen, de la descomposición de la matriz de correlaciones de la data estandarizada y su transpuesta, se obtienen las Funciones Ortogonales Empíricas (EOFs) y los Componentes Principales (CPs). Cada uno de estos componentes, explica cierto porcentaje de la varianza total de los datos, el cual se calcula mediante los valores propios (Ecuación 12).

$$V_k (\%) = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^M \lambda_k} \times 100 \quad (12)$$

Donde:

- $V_k$  = Porcentaje de la varianza explicada por el componente principal  $k$
- $\lambda_k$  = Valor propio para el componente principal  $k$



**Figura 16: Formalismo del Análisis de Componentes Principales**  
FUENTE: Norris, J. 2001.

### Interpretación de los resultados del Análisis de Componentes Principales de la precipitación diaria

Se seleccionaron los dos primeros componentes principales (con las respectivas Funciones Ortogonales Empíricas) que expliquen el mayor porcentaje de la varianza de la precipitación diaria de la zona de estudio durante los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98. Del primer y segundo componente principal (CP-1 y CP-2), se realizó el análisis temporal; considerando la periodicidad de los eventos de lluvias pico y los periodos o días húmedos y secos. Del signo de los EOF-1 y EOF-2, se realizó el análisis espacial. Los valores de la matriz de los EOFs, también se conocen como correlaciones lineales entre los componentes principales y la estación analizada.

Dado que los valores de los componentes principales fueron estandarizados, se obtuvo una serie de datos positivos y negativos. Cuando el signo de la correlación

de todas las estaciones con el componente resultó positivo, indicaba que la región era homogénea y, se identificaron los periodos secos y húmedos mediante el CP. Por lo general, este comportamiento se observa en el primer modo de variabilidad (EOF-1 y CP-1). Los periodos secos correspondieron a valores negativos del componente, mientras que los periodos lluviosos a los valores positivos.

Sin embargo, cuando el signo de la correlación con el componente para algunas estaciones resultó positivo y en otras éste fue negativo, indicaba la existencia de dos regiones homogéneas en la zona de estudio. Por lo general, este comportamiento se observa en el segundo modo de variabilidad (EOF-2 y CP-2). En esta situación, solo se pudieron identificar los periodos lluviosos asociados a cada región homogénea. En este caso, valores positivos del componente principal mostraban periodos lluviosos para la región homogénea con correlación positiva, mientras que, valores negativos del componente mostraban periodos lluviosos para la región con correlación negativa.

Para una mejor interpretación de los resultados, se elaboraron mapas de correlaciones de las estaciones meteorológicas con cada componente principal. Asimismo, para el segundo modo de variabilidad temporal de la precipitación (CP-2), se elaboraron figuras de la variación porcentual de la precipitación acumulada durante los periodos de estudio.

### **Selección de días lluviosos y secos**

La selección de días lluviosos y secos durante cada uno de los eventos El Niño, se efectuó sobre el primer componente principal (CP1), el cual explica el mayor porcentaje de la varianza de los datos. Fue importante diferenciar el ruido de la serie para lo cual se aplicó una media móvil. El procedimiento contempló los siguientes pasos:

- Se ejecutó una media móvil de 10 días al primer componente principal de cada evento El Niño.
- Se restó cada componente con la media móvil para poder obtener los valores más altos y más bajos.

- De la nueva serie (resta), se seleccionaron los días lluviosos cuyo valor sea mayor al percentil 90 y los días secos cuyo valor sea menor al percentil 10 de la nueva serie.
- Si estos días eran consecutivos, se seleccionaba el del mayor o menor magnitud, según sea el caso: día lluvioso o seco, respectivamente.

### **Comportamiento espacial de la precipitación durante días lluviosos y secos**

Para corroborar el comportamiento espacial de la precipitación durante días lluviosos y secos, se elaboraron mapas de los promedios de las precipitaciones durante el periodo El Niño analizado (mm/d), días lluviosos (mm/d), días secos (mm/d) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos. La amplitud se calculó como la resta porcentual entre el promedio de días lluviosos y secos, respecto al promedio del periodo El Niño.

#### ***b. Relación precipitación-escorrentía***

##### **Caracterización de la hidrometría**

En primer lugar, para el análisis de la variabilidad espacio-temporal de los caudales se realizó una caracterización de la información hidrométrica a nivel interanual y mensual, elaborando gráficos del comportamiento estacional a lo largo del año hidrológico (setiembre-agosto). Asimismo, para esta información tampoco se realizó una completación de datos.

##### **Correlación entre las estaciones hidrométricas durante los eventos El Niño**

Se consideraron los mismos periodos de análisis de la variabilidad diaria de la precipitación durante los eventos El Niño de 1982-83 (enero de 1983 a mayo de 1983) y El Niño de 1997-98 (diciembre de 1997 a mayo de 1998). Se generaron los diagramas de dispersión de la matriz de correlaciones de las series de caudales de las estaciones hidrométricas durante los periodos señalados (cada evento El Niño por separado). Esta matriz (Ecuación 13), es una tabla de doble entrada para las estaciones, que muestra una lista de las mismas horizontalmente y verticalmente, con el correspondiente coeficiente de correlación ( $r$ ).

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1j} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{12} \\ r_{31} & 0 & 1 & r_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & 0 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Donde:

- $R$  = Matriz de correlaciones
- $r_{ij}$  = Correlación entre la estación ubicada en la fila  $i$  y la estación ubicada en la columna  $j$

### Índice de caudales por región

Para el caso de la región Tumbes, dado que solo se posee los datos de caudales de la estación hidrométrica (El Tigre), el índice fue calculado como los valores estandarizados de la serie de datos para cada evento El Niño.

$$Q_{Tumbes} = \frac{Q_i - \bar{Q}}{s_Q} \quad (14)$$

Donde:

- $Q_{Tumbes}$  = Índice estandarizado de caudales de la región Tumbes
- $Q_i$  = Caudal en el tiempo  $i$
- $\bar{Q}$  = Promedio de la serie de caudales
- $s_Q$  = Desviación estándar de la serie de caudales

Para el caso de la región Piura, dado que se posee datos de caudales de tres estaciones hidrométricas (Sullana, Ñacara y Ardilla), el índice fue calculado mediante un modelo de regresión lineal múltiple y su posterior estandarización, para cada evento El Niño.

$$q = b_1 Q_1 + b_2 Q_2 + a \quad (15)$$

$$Q_{Piura} = \frac{q_i - \bar{q}}{s_q} \quad (16)$$

Donde:

- $q$  = Índice preliminar de caudales (estación Sullana)
- $Q_1, Q_2$  = Caudales de las estaciones Ardilla y Ñacara
- $Q_{\text{Piura}}$  = Índice estandarizado de caudales de la región Piura
- $q_i$  = Índice preliminar de caudales en el tiempo  $i$
- $\bar{q}$  = Promedio de la serie del índice preliminar de caudales
- $s_q$  = Desviación estándar de la serie del índice preliminar de caudales

Este modelo de regresión se evaluó mediante el coeficiente de correlación múltiple para tres variables ( $y, x_1, x_2$ ) que se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sqrt{r_{yx_1}^2 + r_{yx_2}^2 - 2r_{yx_1}(r_{yx_2})(r_{x_1x_2})}}{\sqrt{1 - r_{x_1x_2}^2}} \quad (17)$$

Donde:

- $r$  = Coeficiente de correlación múltiple
- $r_{yx_1}$  = Coeficiente de correlación entre las variables  $y$  y  $x_1$
- $r_{yx_2}$  = Coeficiente de correlación entre las variables  $y$  y  $x_2$
- $r_{x_1x_2}$  = Coeficiente de correlación entre las variables  $x_1$  y  $x_2$

### **Relación precipitación-escorrentía**

En primer lugar, se identificó el tiempo de respuesta entre la precipitación y caudal; es decir, el número de días que transcurre entre la lluvia de la zona y el caudal medido. Para ello, se aplicó una correlación cruzada entre ambas variables; es decir, se correlacionaron los índices de caudales (por región) con el primer componente principal de cada evento El Niño, considerando una cierta cantidad de días de desfase entre ambas variables. La metodología fue la siguiente:

$$R_{xy}(t) = \frac{1}{N-t} \sum_{n=1}^{N-t} x_{n+t} y_n \quad (18)$$

Donde:

- $R_{xy}$  = Correlación cruzada entre las variables  $x$  e  $y$
- $t$  = Tiempo de desfase (número de días de desfase)
- $N$  = Número de días analizados
- $x$  = Índice de caudales de la región
- $y$  = Primer Componente Principal

Se prosiguió con la correlación entre las series de cada una de las estaciones con información pluviométrica y las estaciones con información hidrométrica diaria durante los eventos El Niño, considerando el tiempo de desfase obtenido y un nivel de significancia del 95 por ciento. Esta correlación se aplicó a las series suavizadas (valores observados menos los valores de la media móvil de 10 días). Finalmente, se ejecutó una correlación múltiple entre los índices de caudales por región y el primer y segundo modo de variabilidad temporal de la precipitación diaria (CP-1 y CP-2).

### **3.2.3 LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y SU RELACIÓN CON LA OCURRENCIA DE DÍAS LLUVIOSOS Y SECOS DURANTE LOS EVENTOS EL NIÑO 1982-83 Y 1997-98**

El análisis de la circulación atmosférica, consistió en la generación de mapas de los promedios (comúnmente llamados *Composites* en las ciencias atmosféricas) de las variables climáticas: velocidad de vientos a 850 hPa y radiación de onda larga saliente (Outgoing Longwave Radiation - OLR). Respecto a la primera variable, se analizó tanto su magnitud como su dirección. Respecto a la segunda variable, ésta permitió detectar la presencia de nubes posiblemente ligada a la actividad convectiva de la zona y, por ende, la ocurrencia de lluvias. Por lo cual, si la energía que sale de la Tierra ( $W/m^2$ ) es menor al promedio histórico; es decir, anomalías negativas de OLR podrían indicar una fuerte actividad convectiva. De lo contrario, indicaría un cielo despejado.

Se debe tener en cuenta que, la interpretación de la medida de la OLR se encuentra afectada no sólo por las nubes, sino por el polvo que se encuentra en la atmósfera.

Por ello, la presente investigación hace uso de la precipitación como indicador de días lluviosos, lo cual estaría en concordancia, por ejemplo, con anomalías negativas de OLR durante dichos días.

#### **Análisis durante días lluviosos y secos**

Previo al análisis de la circulación atmosférica, se calcularon las condiciones promedio (periodo 1981-2010) para las variables: OLR y vientos a 850 hPa. Este periodo es típico su cálculo, similar al empleado por la NOAA, y fueron calculadas como la media de los valores diarios durante enero a abril.

Primero se calcularon los promedios (*composites*) de OLR y vientos de los días lluviosos y los días secos, para cada uno de los eventos El Niño. Posteriormente, para diferenciar las variaciones durante cada evento El Niño, se elaboraron mapas de las diferencias de las condiciones atmosféricas promedio durante días lluviosos y secos. Se aplicó una prueba de *t-student* para dos muestras (días lluviosos y días secos) en la que al menos uno de sus componentes (meridional o zonal) supere la prueba al 90 por ciento de nivel de significancia. Esto permitió resaltar los cambios en los patrones de la circulación atmosférica.

#### **Análisis de la propagación de las perturbaciones atmosféricas**

En esta etapa, se realizó el análisis de las condiciones atmosféricas para los días picos. Los días picos (*días cero*) correspondieron a los días lluviosos previamente seleccionados. Posteriormente, se seleccionaron los días  $-1$ ,  $-2$ ,  $-3$ ,  $+1$ ,  $+2$ ,  $+3$ ; restando o sumando la cantidad de días seleccionada a los *días cero*.

Para cada conjunto de días seleccionados ( $t=-3$ ,  $-2$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$ ,  $+2$ ,  $+3$ ), se calculó el promedio de las variables atmosféricas (OLR y vientos) para dichos días y se le restó el promedio del periodo lluvioso. Ello permitió elaborar mapas de la propagación de las perturbaciones atmosféricas para cada evento El Niño.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados y discusión se presentan teniendo en cuenta los objetivos específicos planteados: i) resultados del análisis de la variabilidad interanual de la precipitación en la costa norte del Perú durante el periodo 1963/64 - 2008/09, ii) resultados del análisis de la variabilidad diaria de la precipitación y su relación con los caudales durante los eventos extremos El Niño 1982-83 y 1997-98 y iii) resultados del análisis de la circulación atmosférica y su relación con la ocurrencia de días lluviosos en la costa norte del Perú durante los eventos extremos El Niño 1982-83 y 1997-98.

### **4.1 VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA PRECIPITACIÓN**

Como parte del Análisis Exploratorio de Datos, se analizaron los histogramas a nivel mensual de las 24 estaciones meteorológicas a fin de detectar valores atípicos. Estos valores se corroboraron con la lista de eventos El Niño y La Niña definidos por el ENFEN (Tabla 8 y Tabla 9 del Anexo 1). En la Figura 75 y Figura 76 del Anexo 3.1, se presentan los histogramas de la precipitación total mensual durante el periodo de registro 1963-2009, según los grupos de estaciones (Grupo 1 y Grupo 2) obtenidos del Método del Vector Regional (MVR).

#### **4.1.1 IDENTIFICACIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS**

Para el periodo 1963/64 - 2008/09, del análisis del MVR de la precipitación total anual, considerando el año hidrológico (setiembre-agosto), se obtuvieron dos grupos homogéneos de estaciones meteorológicas cuya distribución espacial se muestra en la Figura 17. Según la distribución, el Grupo 1 lo conforman las estaciones ubicadas en la zona de la planicie costera, mientras que el Grupo 2, lo conforman las estaciones ubicadas en la parte alta de la zona de estudio. Analizando la relación precipitación-altitud de la zona (Figura 18), se obtiene que existe una relación de  $r^2=0.59$  entre estas dos variables. De lo cual se observa que las estaciones pertenecientes al Grupo 1 se encuentran a una altitud menor o igual a

500 m, mientras que, las estaciones del Grupo 2 se encuentran por encima de los 1000 m. Asimismo, no se cuenta con registros de precipitación entre los 500 y 1000 m.

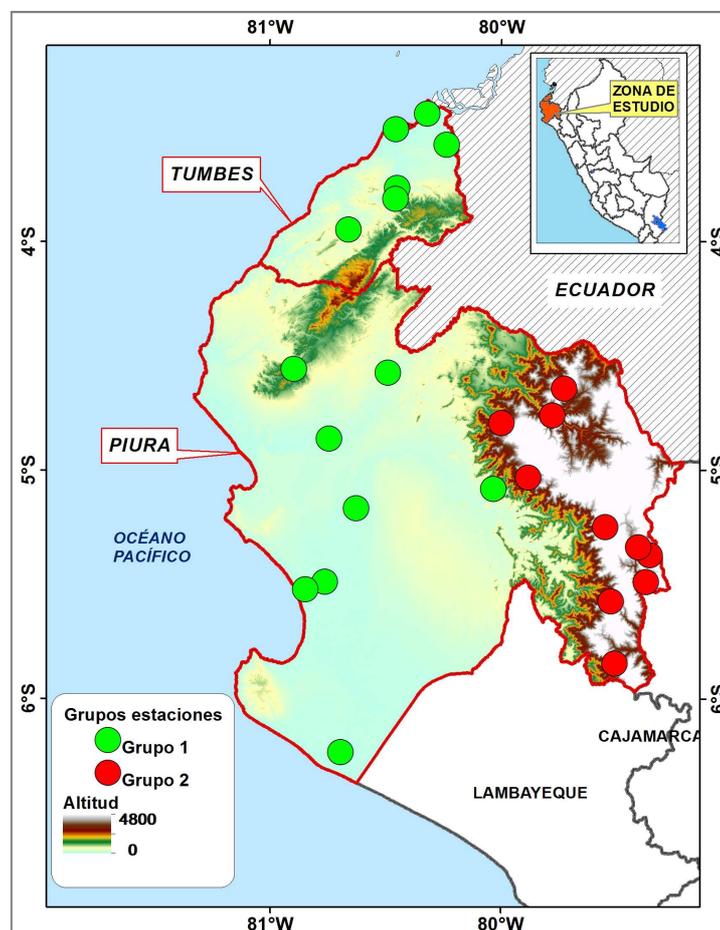


Figura 17: Regionalización de estaciones según vector

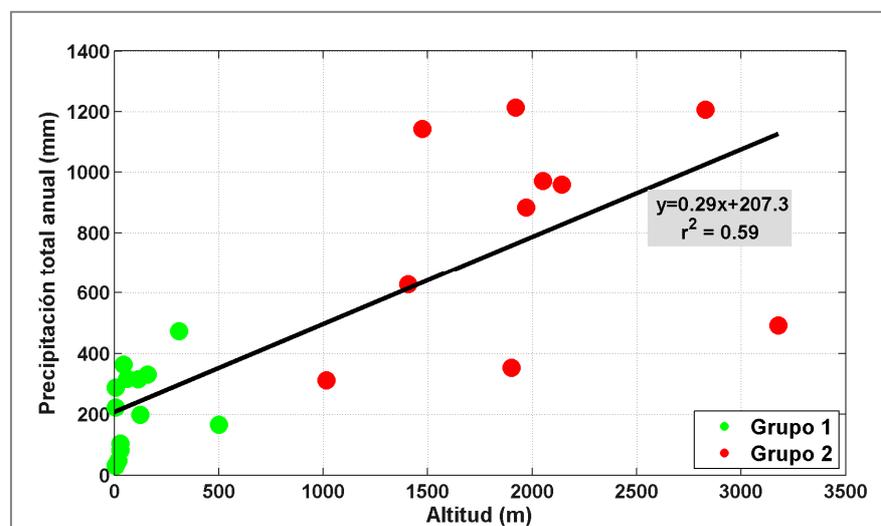
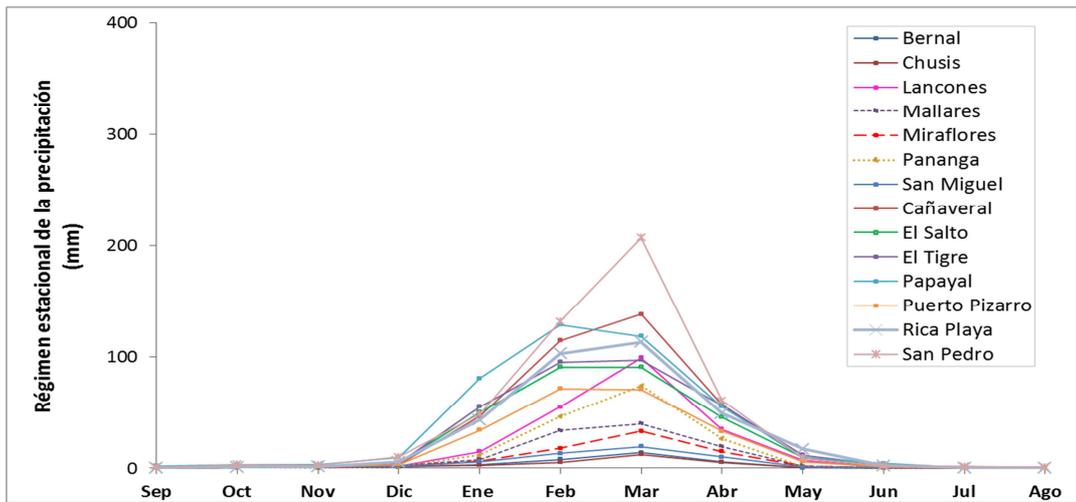
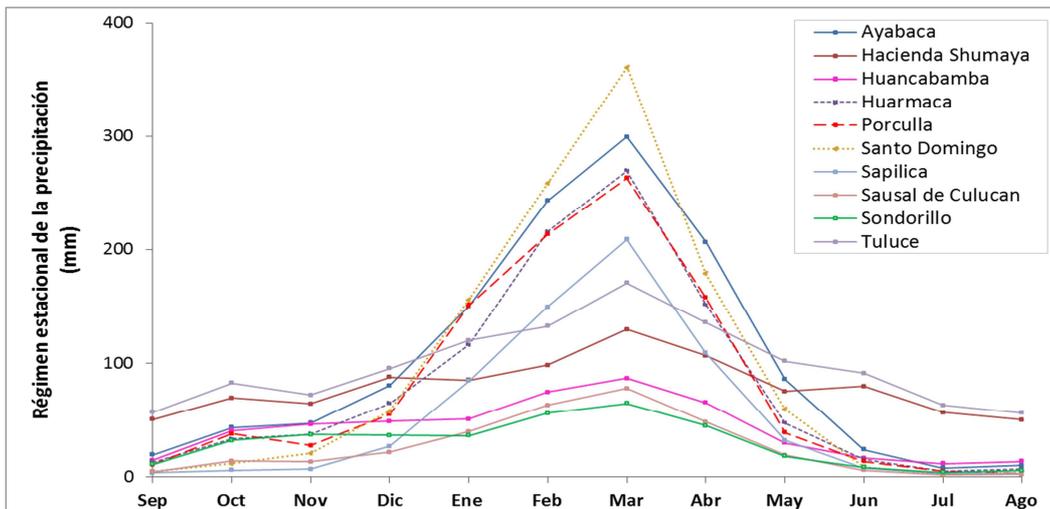


Figura 18: Regresión lineal entre la precipitación total anual promedio (mm) sin considerar los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98 y, la altitud (m)

Respecto a la caracterización del régimen estacional de la precipitación en un año hidrológico, presentado en la Figura 19 y Figura 20 para las estaciones del Grupo 1 y Grupo 2, no se han considerado los años Niño 1982-83 y 1997-98 dado a que para Grupo 1 de estaciones estos años fueron muy anómalos y podrían incrementar la media mensual histórica. El periodo lluvioso tanto en las estaciones del Grupo 1 como del Grupo 2 ocurre durante enero a abril, aunque en algunas estaciones del Grupo 2 se presenta lluvia desde diciembre.



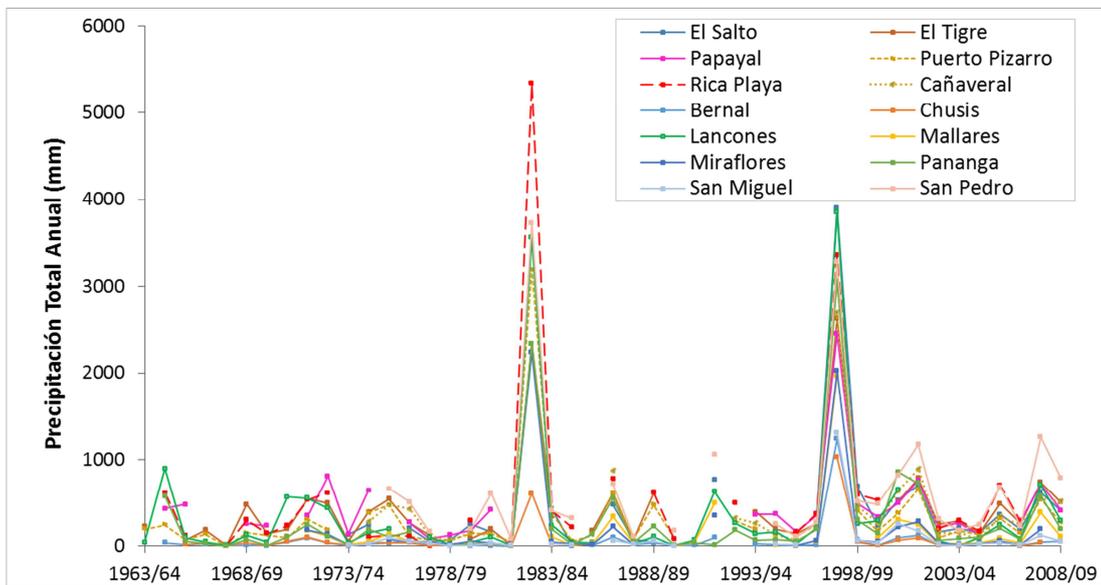
**Figura 19: Régimen estacional de la precipitación – Grupo 1**



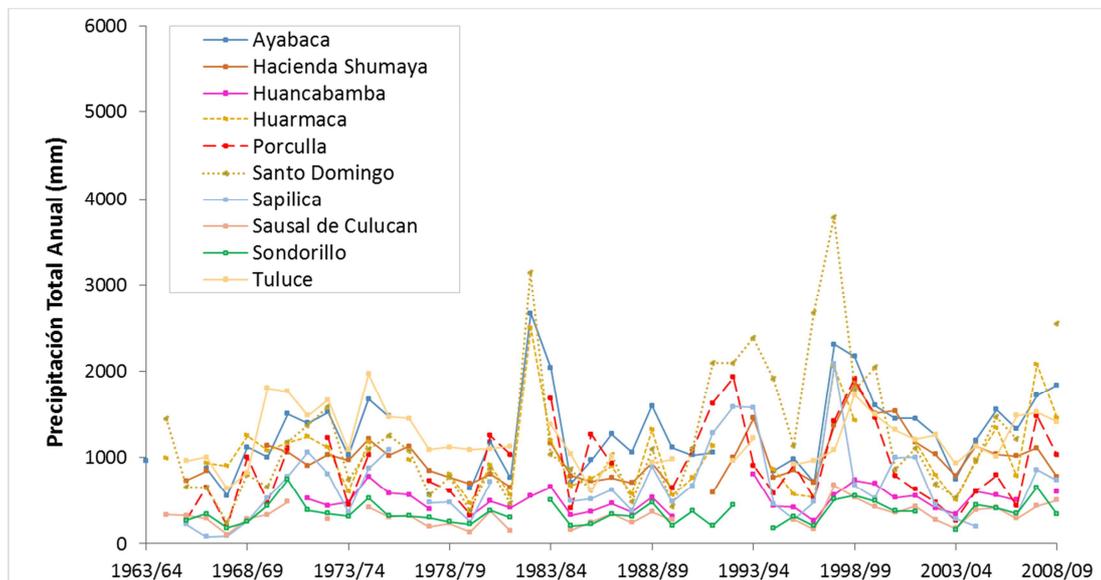
**Figura 20: Régimen estacional de la precipitación – Grupo 2**

Por otro lado, en general, la precipitación mensual del Grupo 2 (ubicadas a mayor altitud) es de mayor magnitud a las del Grupo 1 ya que alcanzan hasta los 360 mm/mes (Figura 20). La precipitación ocurrida durante diciembre a marzo,

representa en promedio el 78 y 61 por ciento de la precipitación total anual en el Grupo 1 y Grupo 2, respectivamente. Es decir, en solo cuatro meses se concentra más del 60 por ciento de la precipitación total anual, siendo este porcentaje mucho mayor para el Grupo 1.



**Figura 21: Series de precipitación total anual - Grupo 1**



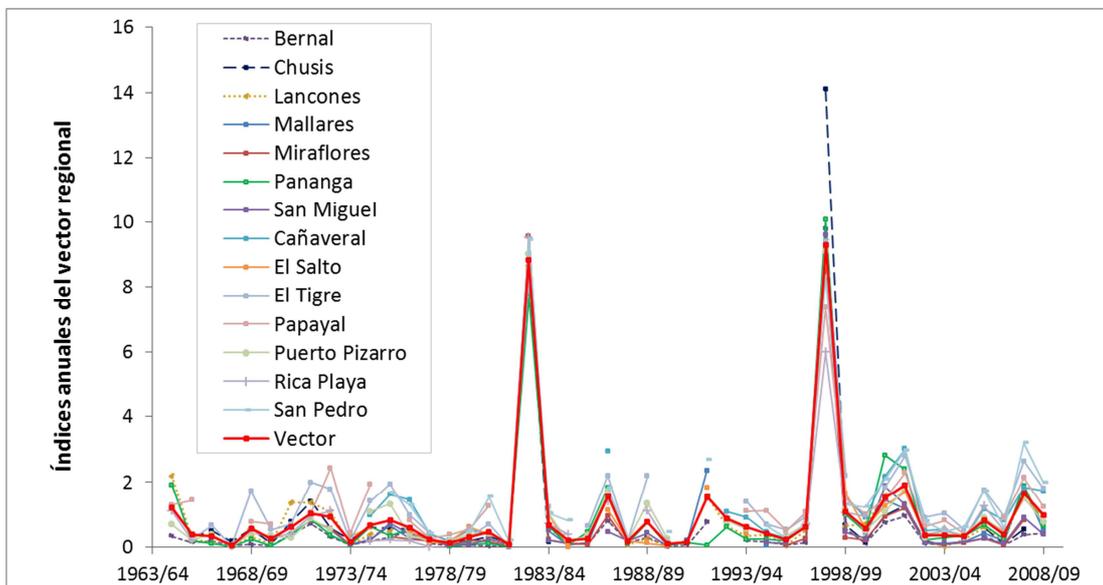
**Figura 22: Series de precipitación total anual - Grupo 2**

En la Figura 21 y 22 se presentan las series de la precipitación total anual (set-ago) para cada grupo de estaciones. A primera vista, se observa que para el Grupo 1 resaltan los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98 en comparación a otros años,

mientras que para el Grupo 2 la intensidad de las precipitaciones durante estos eventos El Niño no presenta magnitudes tan elevadas como en el Grupo 1.

En la Tabla 10 del Anexo 3. 2, se resumen los índices de calidad de cada estación del Grupo 1 con el vector regional a escala anual; las correlaciones de las estaciones con el vector son superiores a la correlación de significancia de Pearson, en el cual se considera la cantidad de datos usados para un nivel de confianza del 95 por ciento, indicativo que las estaciones pertenecen a una misma zona de comportamiento homogéneo.

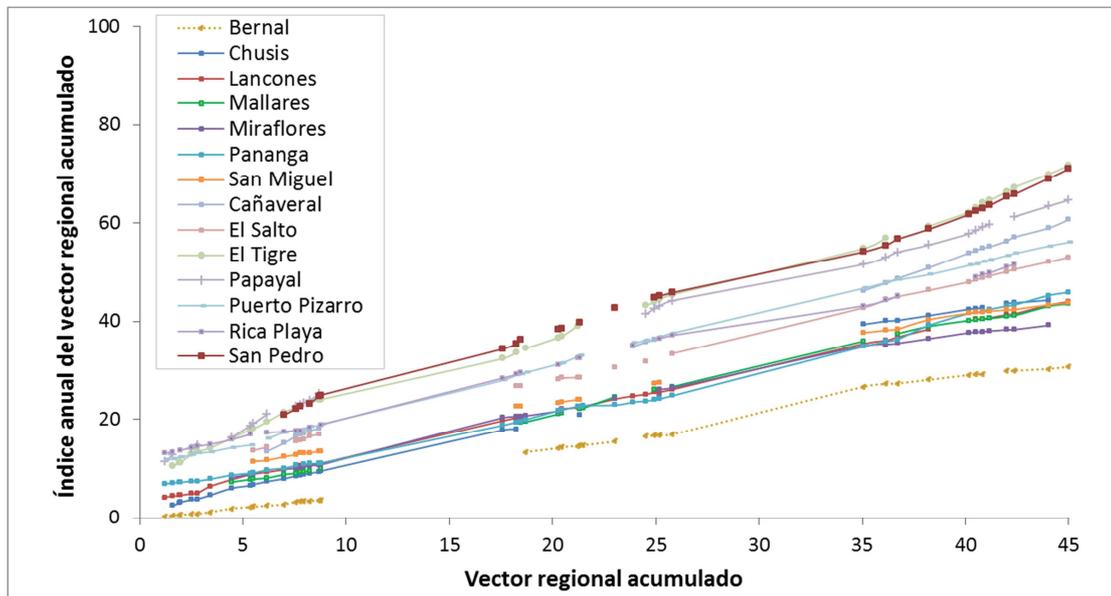
La variabilidad interanual de los índices del vector para el Grupo 1 (Figura 23) presenta un comportamiento esperado, similar al de la precipitación total anual (Figura 21). Se observan picos en el índice anual del Vector del Grupo 1 (Figura 23) para los años: 1965 (El Niño-Moderado), 1969 (El Niño-Moderado), 1972-73 (El Niño-Fuerte), 1986-87 (El Niño-Moderado), 1991-92 (El Niño-Moderado) y 2002 y 2008 (Niños Débil), según clasificación del ENFEN (Anexo 1) que considera el calentamiento anómalo de la región Niño 1+2.



**Figura 23: Índices anuales del vector del Grupo 1**

Por otro lado, no se observan quiebres importantes en las curvas de la suma de los índices por estación del Grupo 1 (Figura 24), indicativo de la consistencia de la información pluviométrica. A excepción de las dos secciones de las curvas donde el

vector regional acumulado se incrementa rápidamente, los cuales corresponden a los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98.

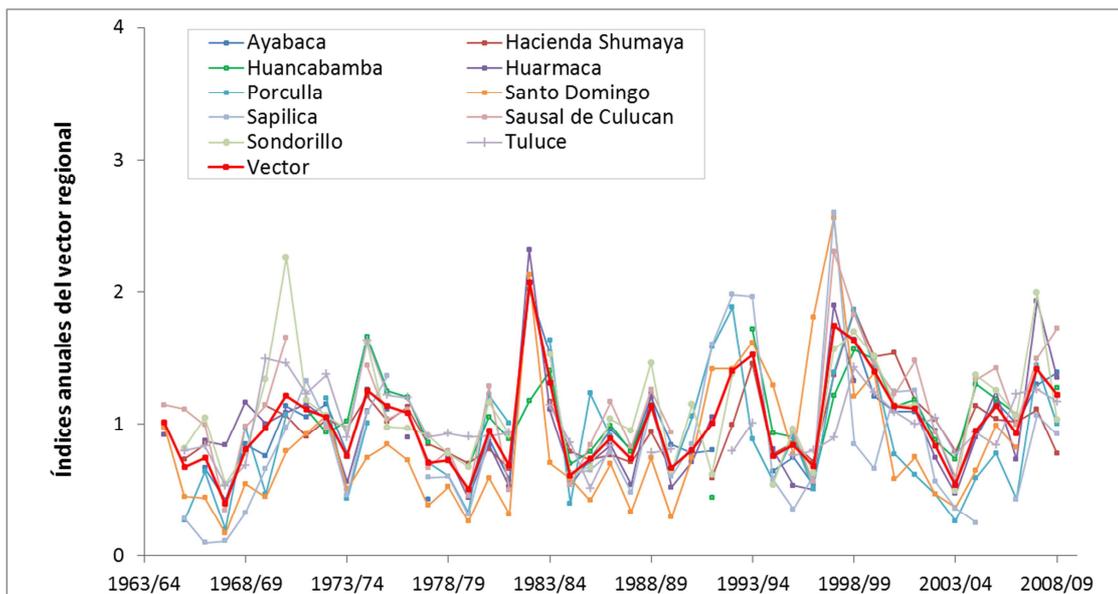


**Figura 24: Suma de los índices anuales del Grupo 1**

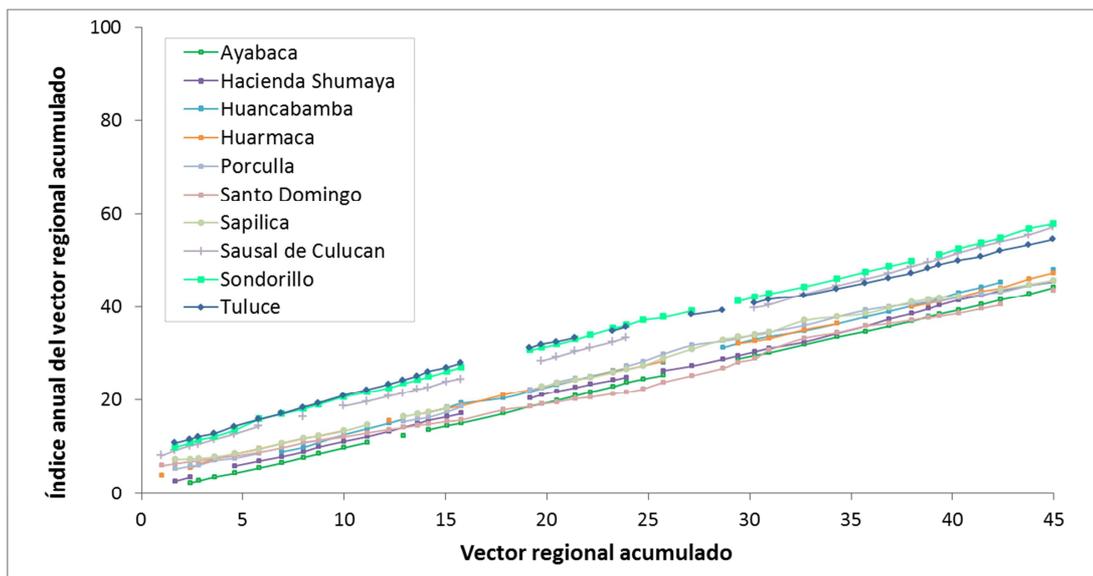
En lo que respecta al Grupo 2, en la Tabla 11 del Anexo 3. 2 se resumen los índices de calidad de cada estación con el vector regional a escala anual; las correlaciones de las estaciones con el vector son superiores a la correlación de significancia de Pearson, para un nivel de confianza del 95 por ciento. En este caso, también se observa un comportamiento similar del vector regional (Figura 25) con la precipitación total anual de las estaciones del Grupo 2 (Figura 22). Asimismo, es muy clara la consistencia de los datos dado que las curvas de la suma de los índices anuales de las estaciones se ajustan a una línea recta de pendiente única y no se presentan quiebres (Figura 26).

Para el Grupo 2 (Figura 25), además del incremento del índice anual del vector durante los eventos extremos El Niño (1982-83 y 1997-98), se observa un incremento de la precipitación durante los eventos El Niño 1992/93 y 1993/94. Por otro lado, se observan picos durante eventos La Niña: 1966 (La Niña-Moderada), 1970-71 (La Niña-Fuerte), 1974/75 (La Niña-Moderada) y 1988 (La Niña-Fuerte), según clasificación del ENFEN (Anexo 1) que considera el enfriamiento anómalo de la región Niño 1+2. De igual manera, se observa un incremento del índice del vector en el Grupo 2, para 1998/99. El invierno previo (octubre-diciembre de 1998)

se produjo un enfriamiento del Pacífico Central (evento La Niña), el cual se ha reportado que provocó inundaciones en la Amazonía entre marzo a mayo de 1999 (Espinoza et al., 2013). Este evento no se encuentra dentro de la clasificación del ENFEN dado que éste solo contempla el análisis de una porción del Pacífico Ecuatorial (región Niño 1+2). Se observa que el análisis del Pacífico Central también es importante para caracterizar eventos tipo La Niña que provocan precipitaciones intensas en la parte alta de la zona de estudio (Grupo 2).



**Figura 25: Índices anuales del vector del Grupo 2**



**Figura 26: Suma de los índices anuales del Grupo 2**

#### 4.1.2 ÍNDICES DE PRECIPITACIÓN

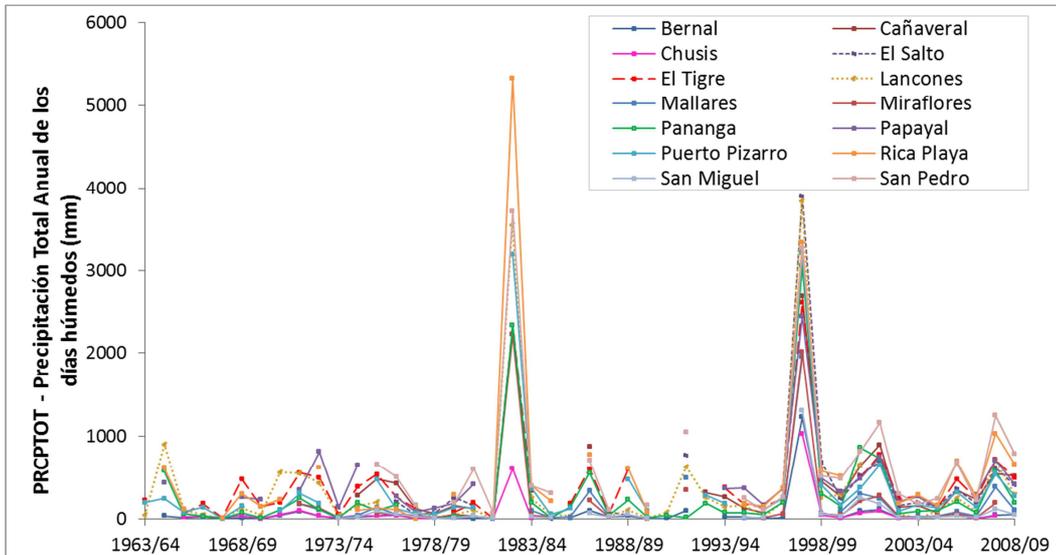
Se han analizado diez índices de precipitación recomendados por el Equipo de Expertos para el Cambio Climático Monitoreo Detección e Índices (ETCCDMI) para el periodo 1963/64-2008/09. La descripción de estos índices (*PRCPTOT*, *SDII*, *R10*, *R20*, *CDD*, *CWD*, *R95p*, *R99p*, *RX1day* y *RX5day*) ha sido detallada en la Tabla 6.

En el Grupo 1 (Figura 27), los valores máximos de Precipitación total anual de los días húmedos (*PRCPTOT*) son: 5327.7 mm (estación Rica Playa) para 1982-83 y 3897.7 mm (estación El Salto) para 1997-98. El índice en 1982-83 fue de mayor magnitud que el de 1997-98, para las estaciones Miraflores, Rica Playa y San Pedro. Sin embargo, esta situación fue inversa para las estaciones Chusis, El Tigre, Lancones, Pananga y Puerto Pizarro. Respecto al resto de estaciones, no poseían la información requerida para el cálculo del índice en 1982-83 y 1997-98.

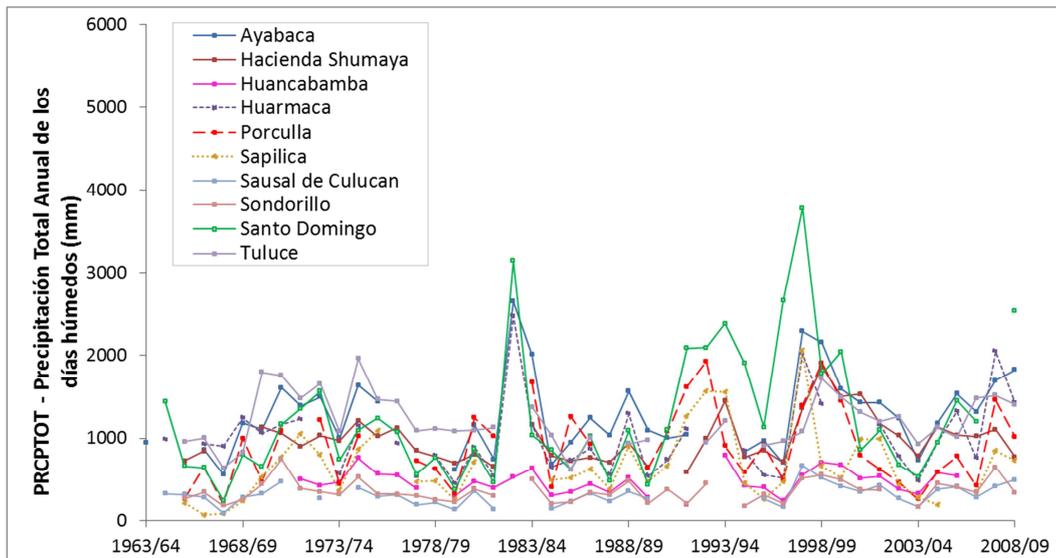
En el Grupo 2 (Figura 28), el índice *PRCPTOT* presenta valores máximos de precipitación total anual de los días húmedos de: 3144 mm para 1982-83 y 3782.4 mm para 1997-98, en ambos casos en la estación Santo Domingo. Además de dicha estación, en Ayabaca y Huarmaca, también presentaron un elevado índice en 1982/83 y 1997/98. Por otro lado, las estaciones Hacienda Shumaya, Huancabamba, Porculla, Sausal de Culucan, Sondorillo y Tuluze, presentan elevada precipitación en 1998/99. En dicho año se registró un enfriamiento de la región El Niño 3.4, según datos de la NOAA ([http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)) y fue considerado un evento La Niña de magnitud moderada según Lavado y Espinoza (2014).

El índice *SDII* (precipitación promedio diaria) en el Grupo 1 proporciona datos interesantes para esta región climática (Figura 29). En promedio, en esta región se presentan precipitaciones de 8.8 mm/día (en un rango de 4.7-12.7 mm/día). Sin embargo, se puede alcanzar valores máximos en años El Niño como en 1997/98. En este año, doce de las catorce estaciones analizadas alcanzaron los valores máximos del índice (19.5 – 39.4 mm/día). En las otras dos estaciones, los valores máximos históricos se alcanzaron en 1992/93 y 1982/83 para las estaciones Pananga y San

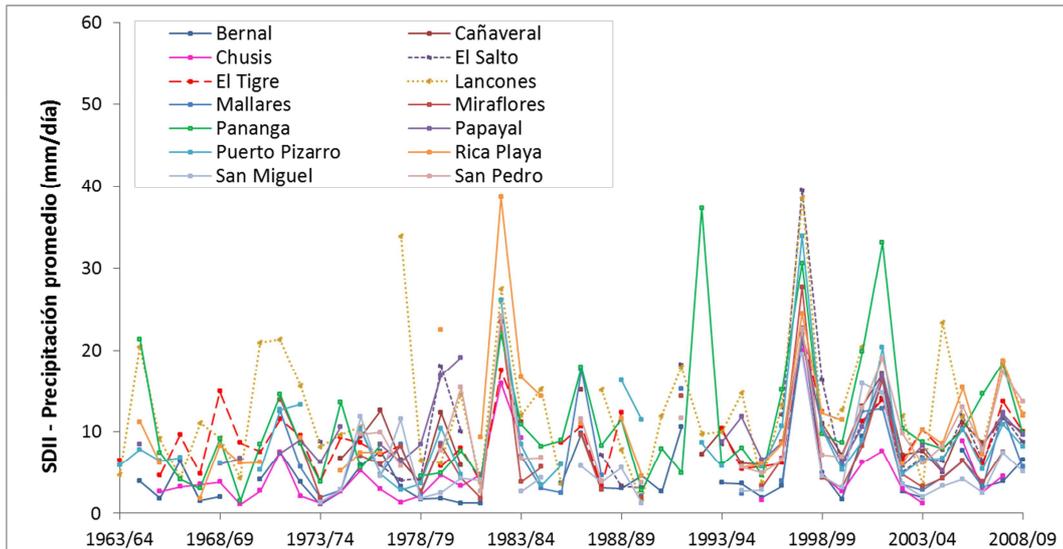
Pedro, respectivamente. En 1993 se produjo un evento El Niño costero de magnitud débil (Anexo 1).



**Figura 27: Índice de la Precipitación total anual de los días húmedos (PRCPTOT) para el Grupo 1**

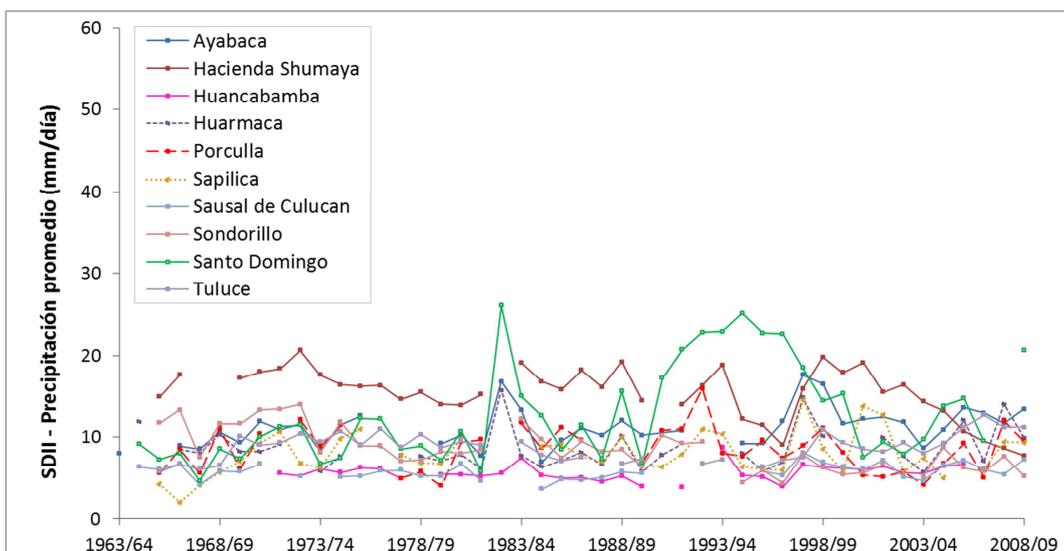


**Figura 28: Índice de la Precipitación total anual de los días húmedos (PRCPTOT) para el Grupo 2**



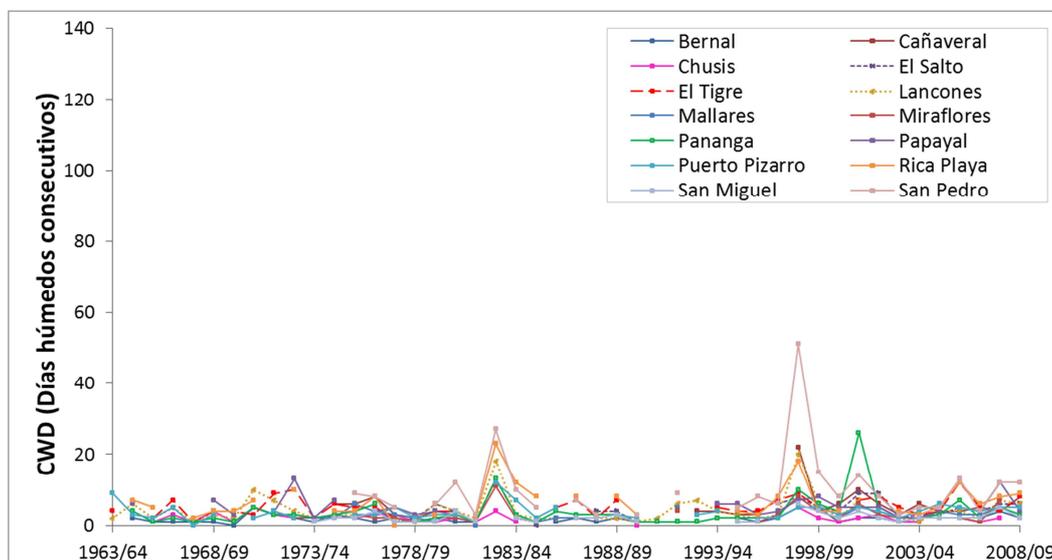
**Figura 29: Índice de la Precipitación promedio anual (SDII) para el Grupo 1**

En lo que respecta al índice SDII (precipitación promedio diaria) para el Grupo 2 (Figura 30), en promedio en esta región climática, se presentan precipitaciones de 9.3 mm/día (en un rango de 5.6-15.4 mm/día). Sin embargo, se puede alcanzar valores máximos como en 1972/73, 1982/83, 1992/93, 1997/98 y 2006/07 (eventos costeros El Niño, Anexo 1). En dichos años, en las estaciones analizadas se alcanzó valores máximos del índice (8.1 – 26 mm/día). Como se puede observar, estos no superan a los valores máximos del índice SDII en el Grupo 1 (región 0-500 msnm), a pesar que en promedio la precipitación del Grupo 2 sea ligeramente superior (9.3 mm/día) a la del Grupo 1 (8.8 mm/día).



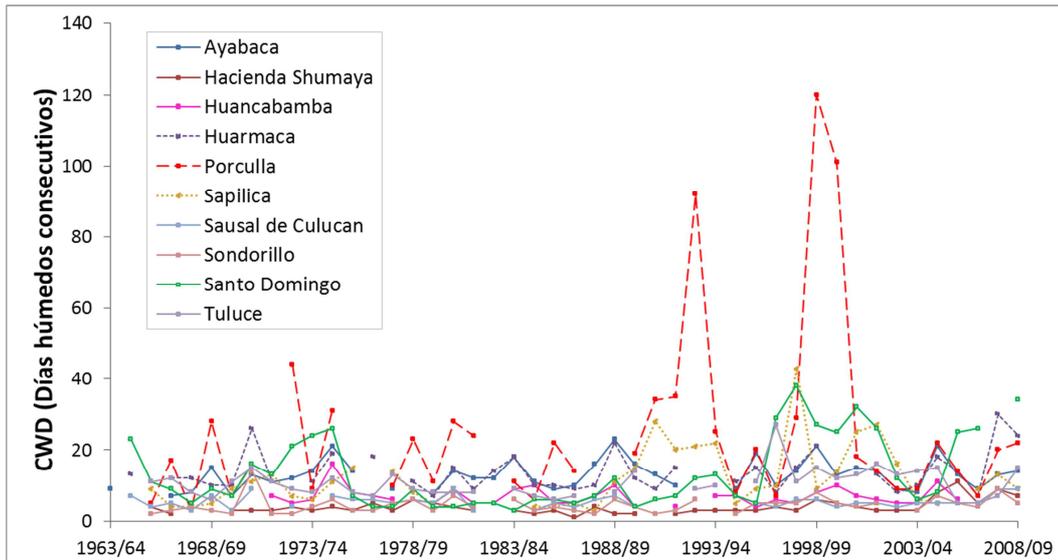
**Figura 30: Índice de la Precipitación promedio anual (SDII) para el Grupo 2**

Los Días húmedos consecutivos (*CWD*) para el Grupo 1 (Figura 31) presenta periodos húmedos máximos de 51 días para la estación San Pedro en 1997/98 y de 26 días para la estación Pananga en el 2000/01 (este último fue un evento puntual para esa estación). Asimismo, se observa un incremento del índice en la mayoría de estaciones para 1982/83 y 1997/98, lo cual indicaría que durante estos eventos extremos se presentaron mayores periodos húmedos consecutivos. Por otra parte, en el Grupo 1 existen valores mínimos del índice iguales a cero; es decir, no se presentaron precipitaciones superiores a 1 mm (1969/70, 1967/68, 1977/78 y 1984/85). Estos años corresponden a eventos La Niña en la costa norte peruana (Anexo 1), lo cual explicaría los periodos secos encontrados.



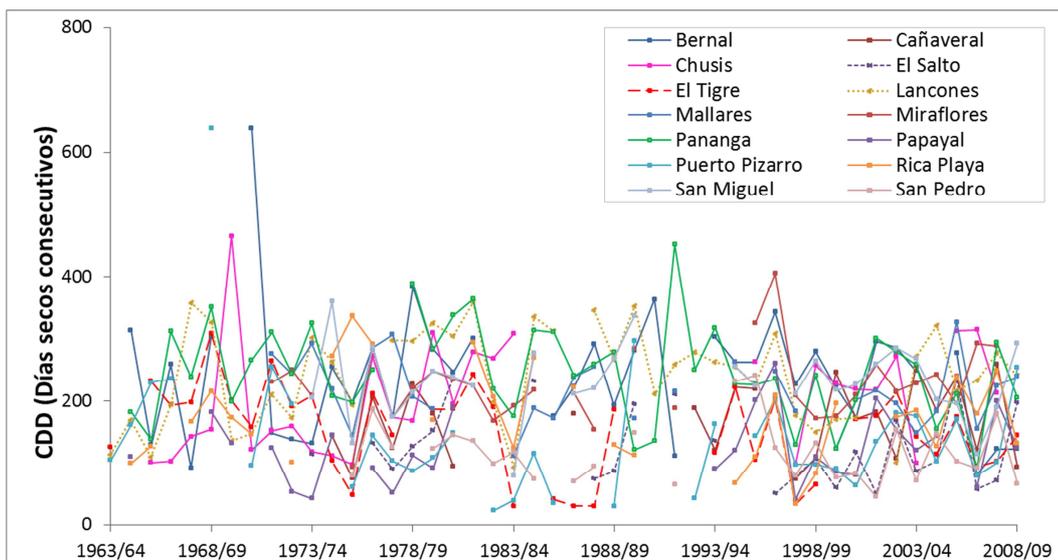
**Figura 31: Índice anual de los Días húmedos consecutivos (*CWD*) para el Grupo 1**

Respecto a los Días húmedos consecutivos (*CWD*) para el Grupo 2 (Figura 32), se presentan periodos húmedos máximos de 120 días para la estación Porculla en 1998/99 (enfriamiento de la región Niño 3.4, La Niña), así como también se presentó en el resto de estaciones a excepción de las estaciones Sapilica y Santo Domingo. Se observa que el evento La Niña (enfriamiento del Pacífico Central) representa un rol importante en la generación de lluvias en la región comprendida entre los 500-1000 msnm (Grupo 2), lo cual está acorde a lo encontrado por Lavado y Espinoza (2014). Por otro lado, existen valores mínimos del índice *CWD* entre 1 a 7 días; es decir, a diferencia del Grupo 1, en esta región climática por lo menos en un día del año se presenta una precipitación superior a 1 mm.



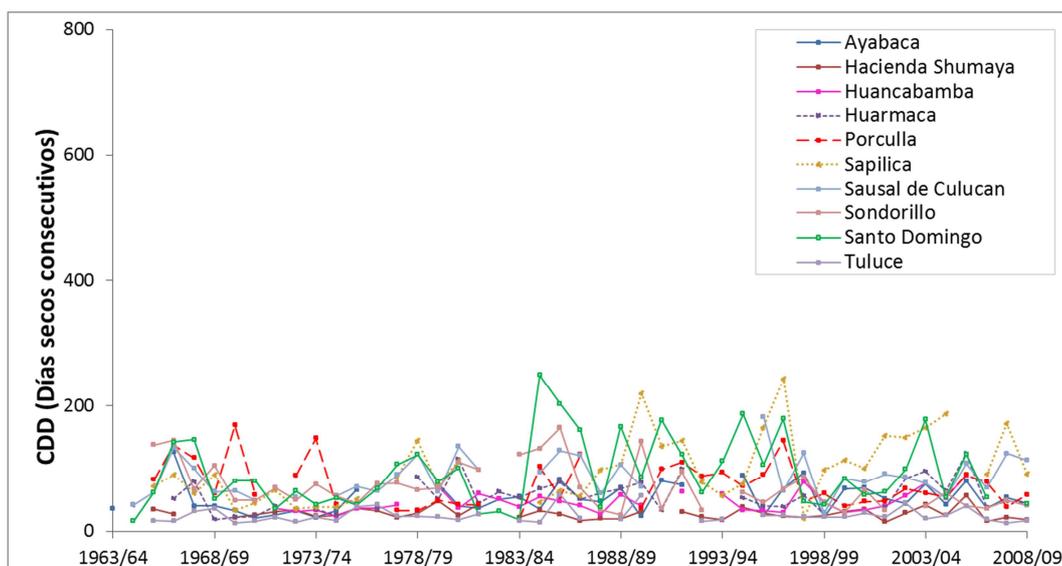
**Figura 32: Índice anual de los Días húmedos consecutivos (CWD) para el Grupo 2**

Los Días secos consecutivos (*CDD*) para el Grupo 1 (Figura 33), presentan periodos secos de hasta 638 días para las estaciones: Puerto Pizarro, en 1968 y 1969 y para Bernal, en 1970 y 1971. Es decir, esta zona pueden presentarse periodos secos de hasta dos años de duración. Los años 1967/68 y 1970/71 corresponden a eventos La Niña costera de magnitud fuerte (Anexo 1). Asimismo, se observa una disminución del índice en la mayoría de estaciones durante 1982/83 y 1997/98, lo cual indicaría que durante estos eventos extremos se presentaron menos días secos de lo normal.

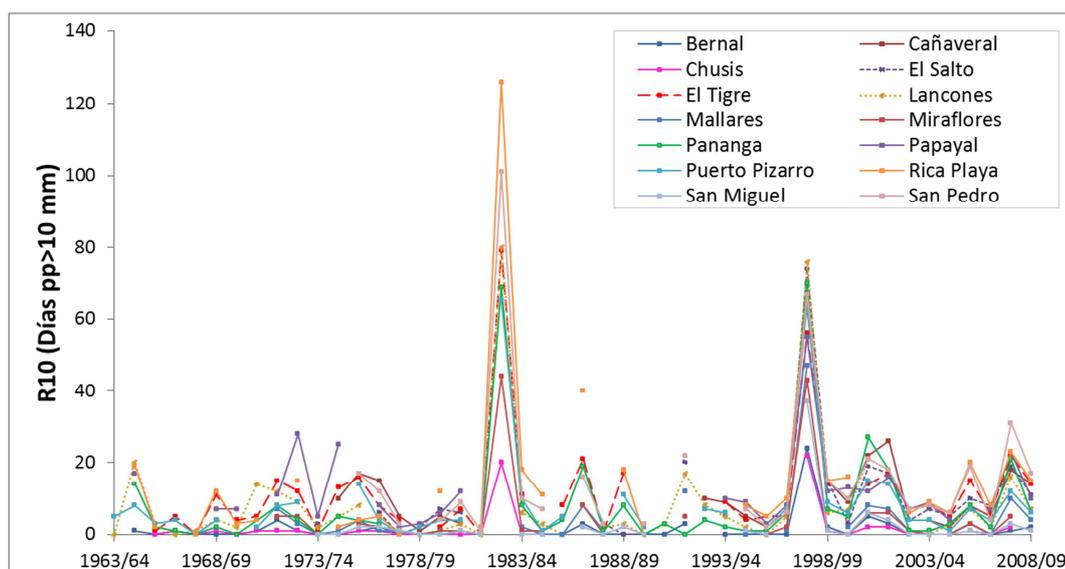


**Figura 33: Índice anual de los Días secos consecutivos (CDD) para el Grupo 1**

Por otro lado, los mínimos valores de Días secos consecutivos – *CDD* (Figura 33) para el Grupo 1 son: 23 días secos consecutivos para la estación Puerto Pizarro (1982/83) y 33 días para la estación Rica Playa (1997/98); es decir, en todo el año hidrológico aproximadamente once meses presentaron días húmedos (precipitación diaria mayor a 1 mm). Mientras que, los Días secos consecutivos - *CDD* para el Grupo 2 (Figura 34), presenta periodos secos de hasta 249 días para la estación Santo Domingo en 1984/85. La mínima duración de un periodo seco, correspondió al valor de 13 días, durante 1969/70 y 2007/08 para la estación Tuluze.



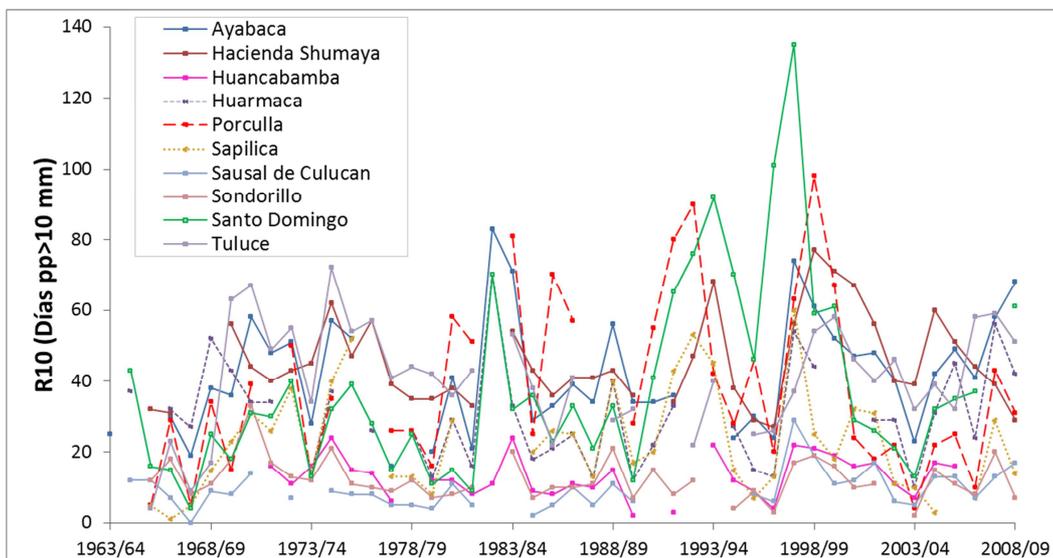
**Figura 34: Índice anual de los Días secos consecutivos (CDD) para el Grupo 2**



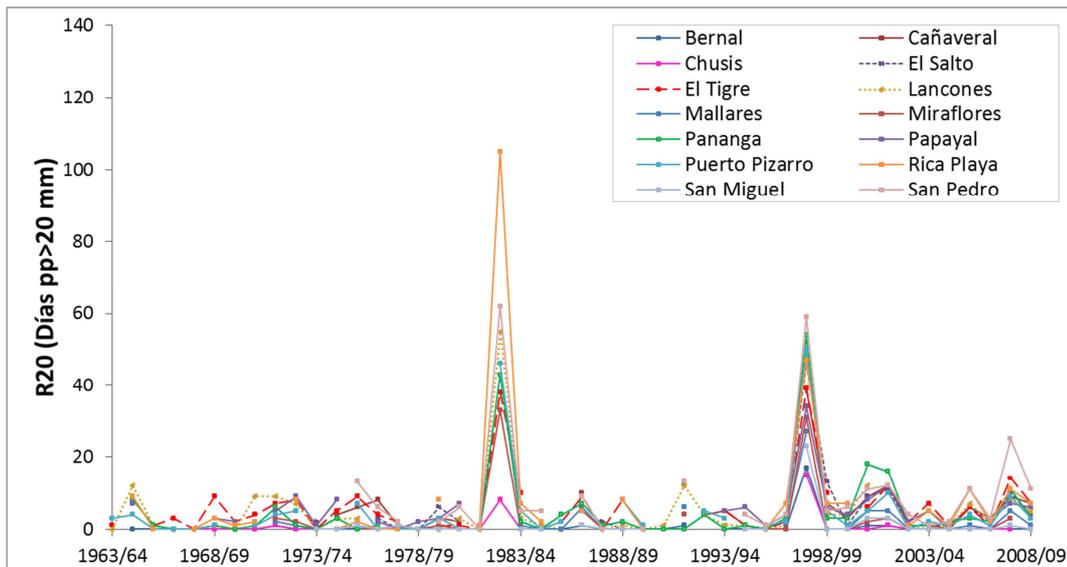
**Figura 35: Índice anual de la cantidad de Días cuya precipitación diaria fue superior a los 10 mm (R10) para el Grupo 1**

Respecto a la variación interanual de los Días en el año donde la precipitación diaria es superior a los 10 mm (*R10*) en el Grupo 1 (Figura 35), los valores máximos corresponden a la estación Rica Playa, con 126 días en 1982/83 y 76 días en 1997/98, para la estación Lancones. Mientras que, para el Grupo 2 (Figura 36) el valor máximo corresponde a 135 días, en 1997/98, para la estación Santo Domingo.

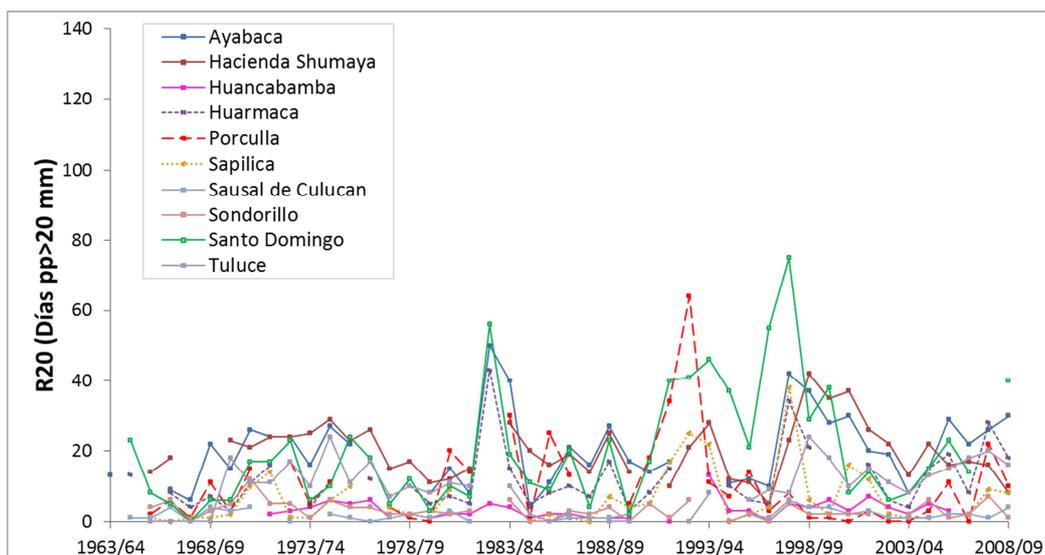
La mínima cantidad de Días en el año donde la precipitación diaria es superior a los 10 mm (*R10*), para ambos grupos de estaciones, es de cero días. En el Grupo 1 (Figura 35), todas las estaciones, a excepción de Cañaverl, Papayal y San Pedro, presentan más de un año con valores de *R10* iguales a cero. La estación Bernal llega a presentar hasta 24 años, de un total de 40 años de estudio, donde en ningún día se presentó una precipitación diaria mayor a los 10 mm. Por otro lado, para el Grupo 2 (Figura 36), un valor de *R10* igual a cero solamente se presentó en una estación (Sausal de Culucan en 1967/68). En promedio, en el Grupo 1 (< 500 msnm) se presentan 8 días (rango de 1-15 días) con precipitación diaria menor a los 10 mm, mientras que en el Grupo 2 (>1000 msnm) este valor es de 30 días (rango de 9-45 días).



**Figura 36: Índice anual de la cantidad de Días cuya precipitación diaria fue superior a los 10 mm (*R10*) para el Grupo 2**



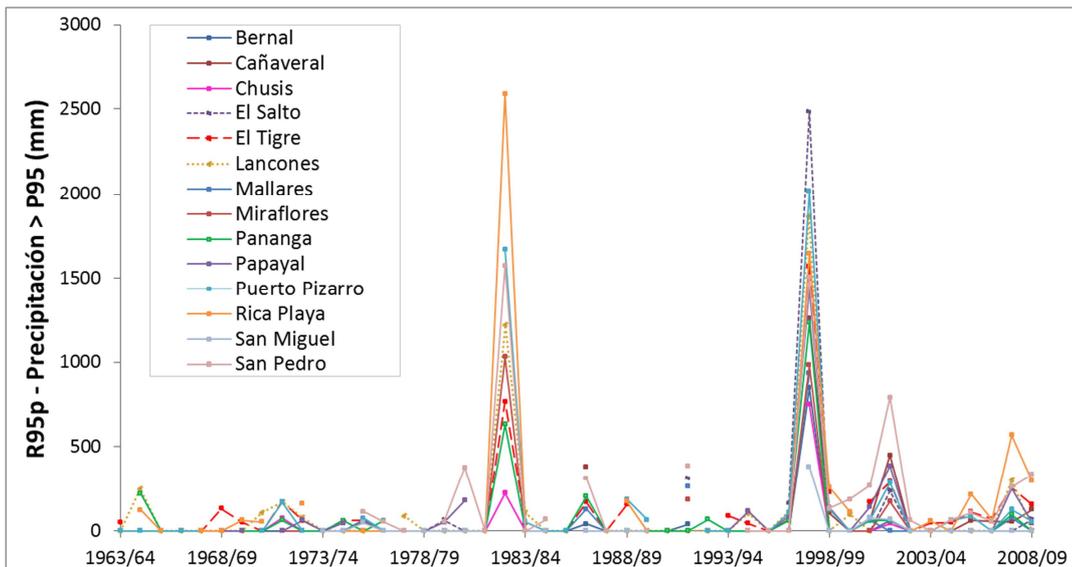
**Figura 37: Índice anual de la cantidad de Días cuya precipitación diaria fue superior a los 20 mm (R20) para el Grupo 1**



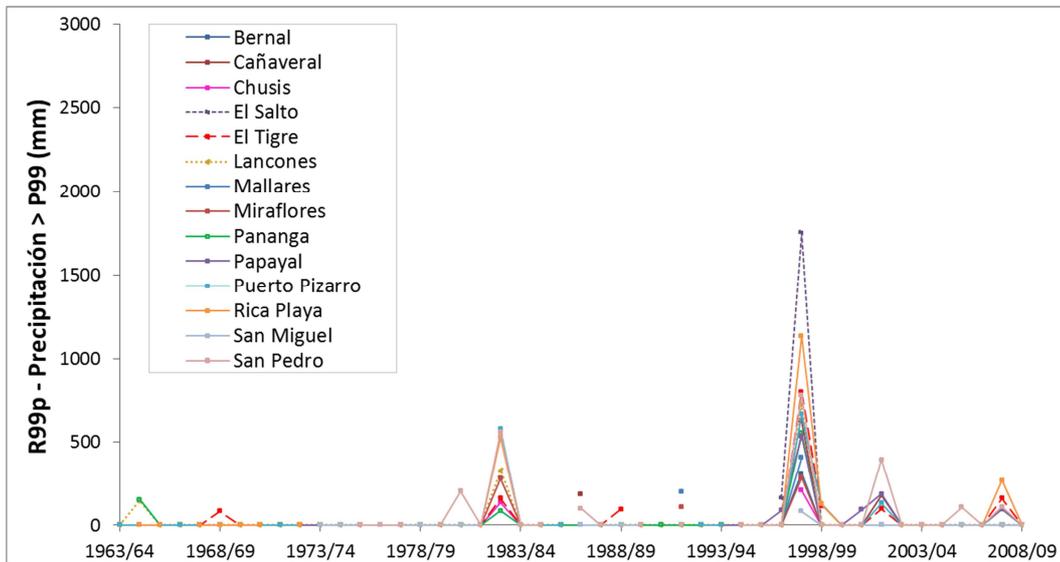
**Figura 38: Índice anual de la cantidad de Días cuya precipitación diaria fue superior a los 20 mm (R20) para el para el Grupo 2**

En lo que respecta a la variación interanual de los Días en el año donde la precipitación diaria es superior a los 20 mm - *R20* (Figura 37), en el Grupo 1, los valores máximos del índice corresponden a la estación Rica Playa, con 105 días en 1982/83, y la estación San Pedro, con 59 días en 1997/98. Mientras que, para el Grupo 2 (Figura 38), el valor máximo corresponde a 75 días en 1997/98, para la estación Santo Domingo. Por otro lado, el mínimo valor del índice *R20*, para ambos grupos de estaciones, es de cero días al igual que los mínimos valores del índice *R10*. En el Grupo 1 (Figura 37), todas las estaciones presentan más de un año con

valores de  $R20$  iguales a cero. La estación Bernal presenta hasta 34 años, de un total de 40 años de estudio, donde en ningún día se presentó una precipitación diaria mayor a los 20 mm. Respecto al Grupo 2 (Figura 38), todas las estaciones, a excepción de Ayabaca, Hacienda Shumaya y Huarmaca, presentaron valores mínimos de  $R20$  iguales a cero.

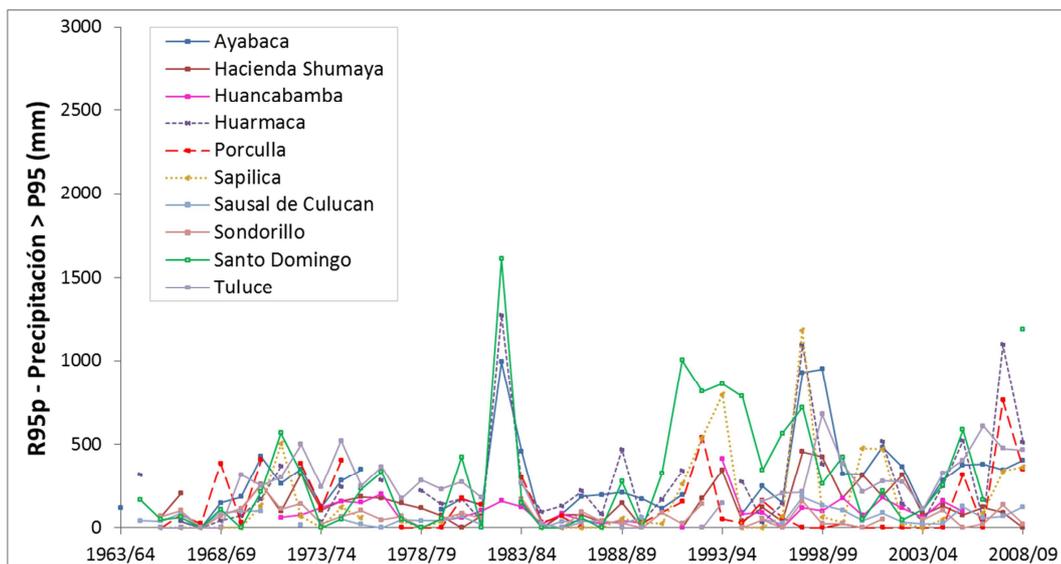


**Figura 39: Índice anual de la suma de la Precipitación diaria superior al percentil 95 (R95p) para el Grupo 1**



**Figura 40: Índice anual de la suma de la Precipitación diaria superior al percentil 99 (R99p) para el Grupo 1**

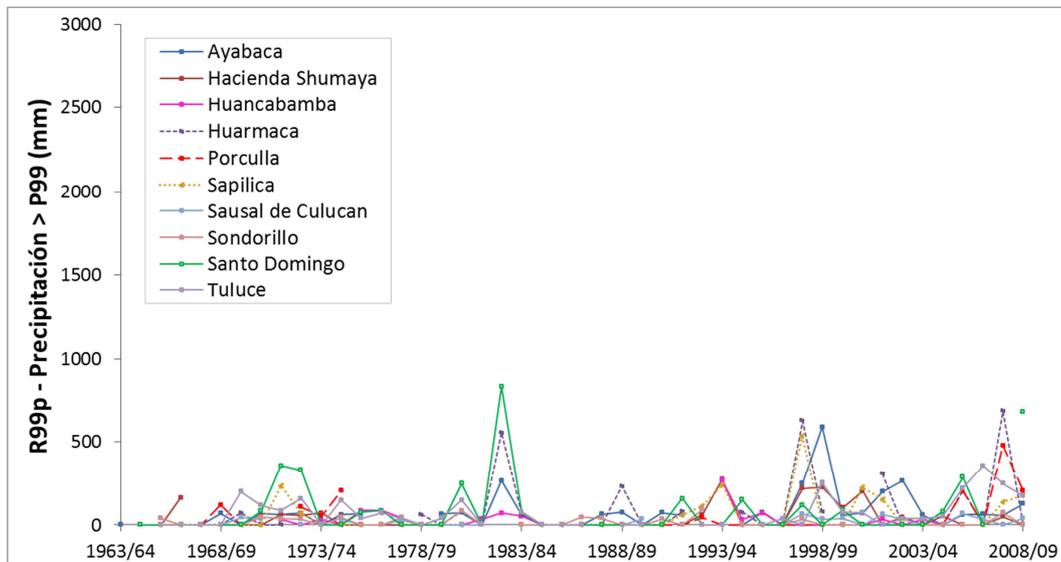
Analizando las precipitaciones extremas, mediante la Precipitación total anual, cuando la precipitación diaria es superior al Percentil 95 ( $R95p$ ), en el Grupo 1 (Figura 39), los valores máximos de este índice corresponden a la estación Rica Playa con un valor de 2591.8 mm en 1982/83 y El Salto con 2483.5 mm en 1997/98. Mediante el índice  $R99p$  (Figura 40), se puede observar que las precipitaciones diarias mayores al Percentil 99 ocurren principalmente durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98, siendo mucho más anómalas para el segundo evento. La estación El Salto (cercana a la zona del Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes) presentó un valor de 1750.5 mm en 1997/98.



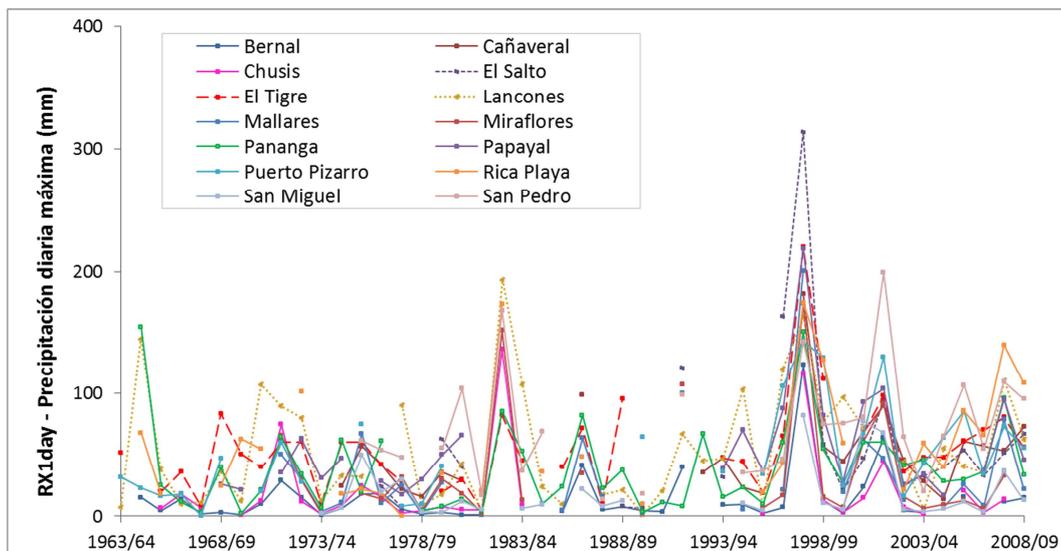
**Figura 41: Índice anual de la suma de la Precipitación diaria superior al percentil 95 ( $R95p$ ) para el Grupo 2**

El máximo valor de la Precipitación total anual, cuando la precipitación diaria es superior al Percentil 95 ( $R95p$ ), en el Grupo 2 (Figura 41), corresponde a la estación Santo Domingo, con 1609.4 mm para 1982-83. Mediante el índice  $R99p$  (Figura 42), se puede observar que destacan los años 1982/83, 1997/98, 1998/99 y 2007/08. El máximo valor de este índice también se presenta en la estación Santo Domingo con 828.9 mm en 1982/83. Los años 1982/83 y 1997/98 corresponden a eventos El Niño de magnitud extraordinaria (Anexo 1). El año 1998/99 corresponde a un evento La Niña reportado a nivel mundial. Asimismo, se reportaron inundaciones en la Amazonía en 1999, que correspondió a una anomalía negativa de temperatura superficial del mar en el Pacífico Central ecuatorial, que provocó flujos anómalos de transporte de humedad al noroeste de la Amazonía (Espinoza et.

al, 2012). Este es un ejemplo de la influencia del ENSO y sus teleconexiones climáticas.



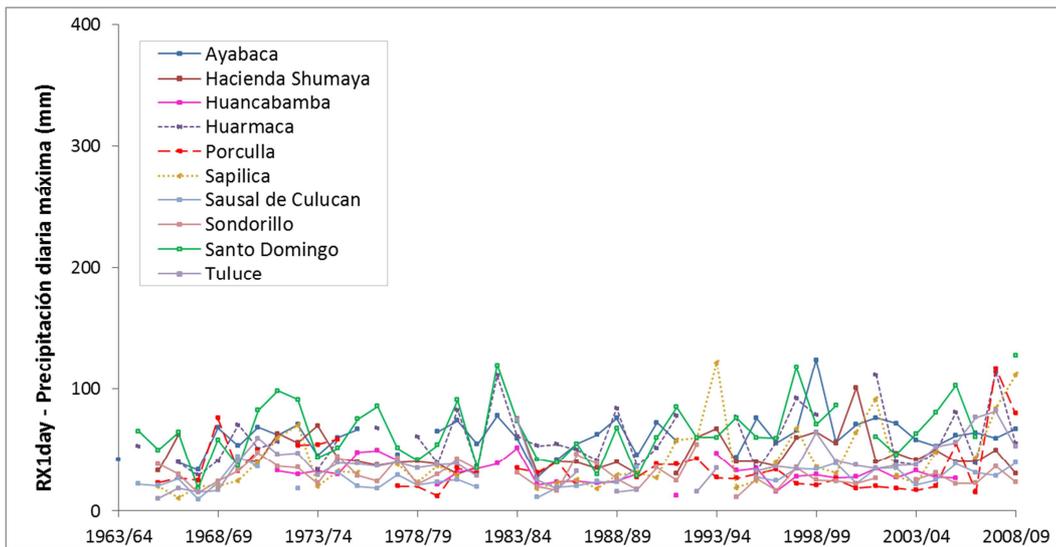
**Figura 42: Índice anual de la suma de la Precipitación diaria superior al percentil 99 (R99p) para el Grupo 2**



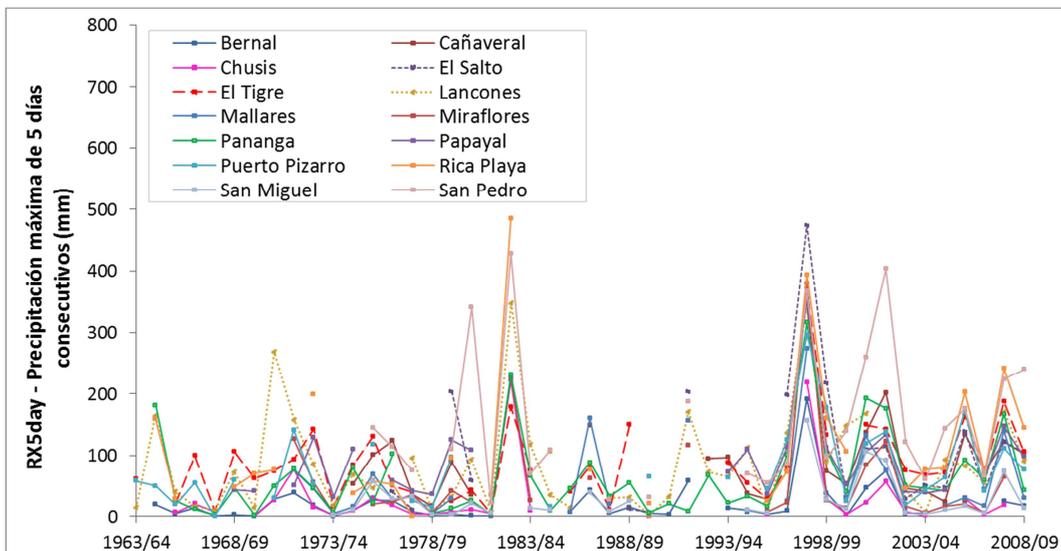
**Figura 43: Índice anual de la Precipitación diaria máxima (RX1day) para el Grupo 1**

De los resultados del índice de la Precipitación diaria máxima anual (*RX1day*) para las estaciones del Grupo 1 (Figura 43), se obtuvo que el 8 de febrero de 1998 se registró una precipitación diaria de 313.7 mm en la estación El Salto, siendo a su vez, la máxima precipitación diaria histórica de toda la región de estudio (periodo 1963/64-2008/09). Esto se corrobora con el índice *R99p* (Figura 40), que indica que se produjeron días extremadamente más húmedos (mayores al Percentil 99),

durante El Niño de 1997-98 respecto a 1982-83. Asimismo, el 6 de abril del 2002, se registró una precipitación diaria de 199.3 mm (estación San Pedro), y el 26 de abril de 1983, se registró una precipitación máxima de 193.8 mm en la estación Lancones. El mínimo valor de *RX1day* se presenta en la estación Puerto Pizarro con 0.4 mm el 7 de febrero de 1967.



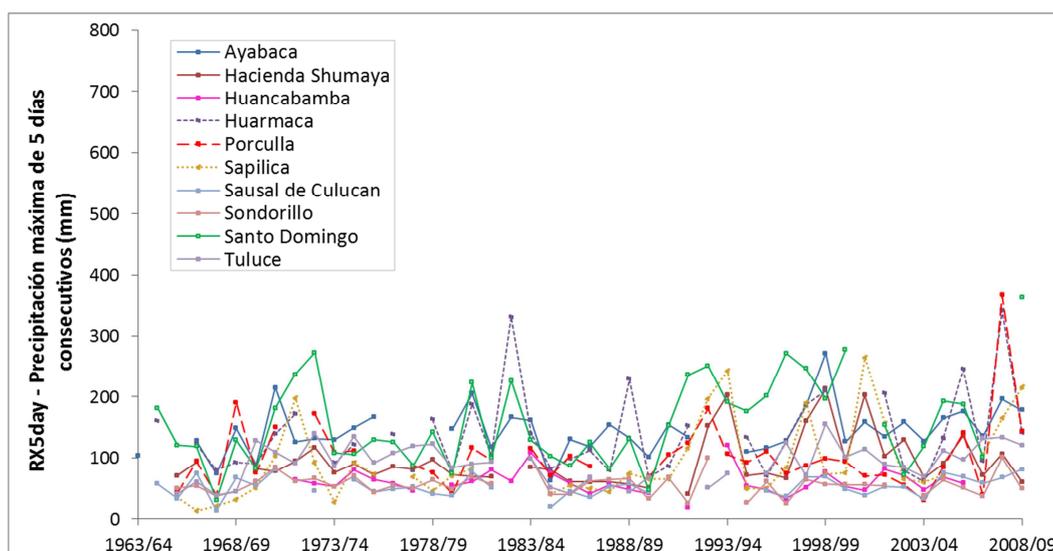
**Figura 44: Índice anual de la Precipitación diaria máxima (RX1day) para el Grupo 2**



**Figura 45: Índice anual de la Precipitación diaria máxima de 5 días consecutivos (RX5day) para el Grupo 1**

Para el caso del Grupo 2, la Precipitación diaria máxima en un año hidrológico (*RX1day*, Figura 44), se presenta el 13 de febrero del 2009, con un valor de 127.9 mm, en la estación Santo Domingo. Mientras que, el mínimo valor del índice se

presenta el 30 de abril de 1968, para la estación Sausal de Culucan. Respecto a la máxima precipitación de cinco días consecutivos-*RX5day* (Figura 46), se presenta en la estación Porculla, con 366 mm, en 2007/08. El mínimo valor se presenta en la estación Sapilica, con 13.1 mm, en 1966/67. Por otro lado, el máximo valor del índice *RX5day* para el Grupo 1 (Figura 45), se presenta en la estación Rica Playa, con 484.7 mm, en 1982/83; y el mínimo valor, en la estación Puerto Pizarro, con 0.4 mm, en 1967/68.



**Figura 46: Índice anual de la Precipitación diaria máxima de 5 días consecutivos (RX5day) para el Grupo 2**

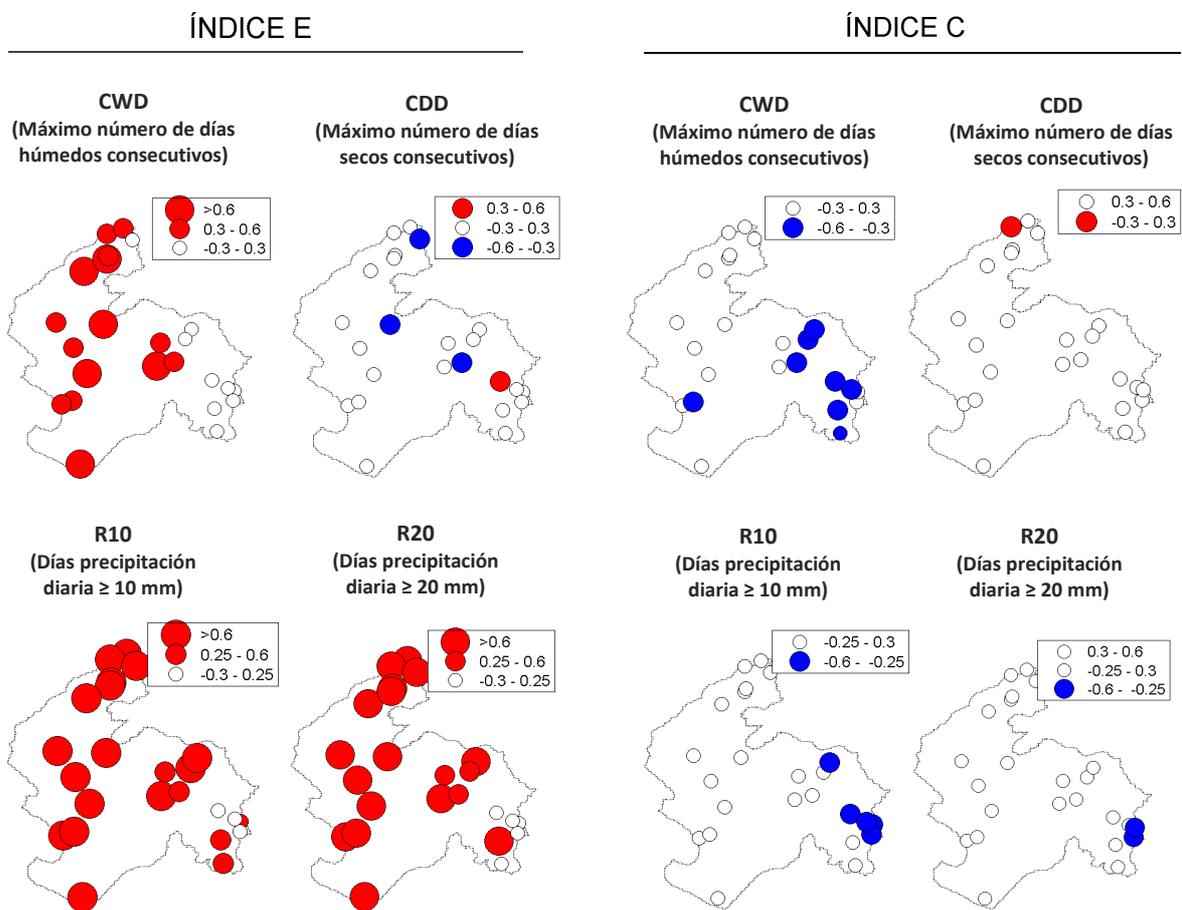
En resumen, ocho de los diez índices analizados (*PRCPTOT*, *CWD*, *R10*, *R20*, *R95p*, *R99p*, *RX1day* y *RX5day*), asociados a la precipitación total, precipitaciones extremas y frecuencia de periodos húmedos en el año, muestran una variabilidad interanual fuertemente modulada por los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98, para el Grupo 1 (Figura 27, 31, 35, 37, 39, 40, 43 y 45). Mientras que, para el Grupo 2, el fenómeno El Niño no es el principal modo de variabilidad de la totalidad de los índices de precipitación calculados. En este grupo también se observa la influencia de eventos La Niña (1988/89, 1998/99 y 2007/08), en el incremento de la precipitación total anual y precipitaciones extremas (Figura 28, 30, 32, 36, 38, 41, 42, 44 y 46).

El resumen de las estadísticas descriptivas de los índices anuales de precipitación (*PRCPTOT*, *SDII*, *R10mm*, *R20mm*, *CDD*, *CWD*, *R95p*, *R99p*, *RX1day* y *RX5day*),

considerando el periodo de 1963/64 a 2008/09 para el Grupo 1 y 2 de estaciones obtenidas a partir del MVR, se presenta en la Tabla 12 y 13, del Anexo 3.3.

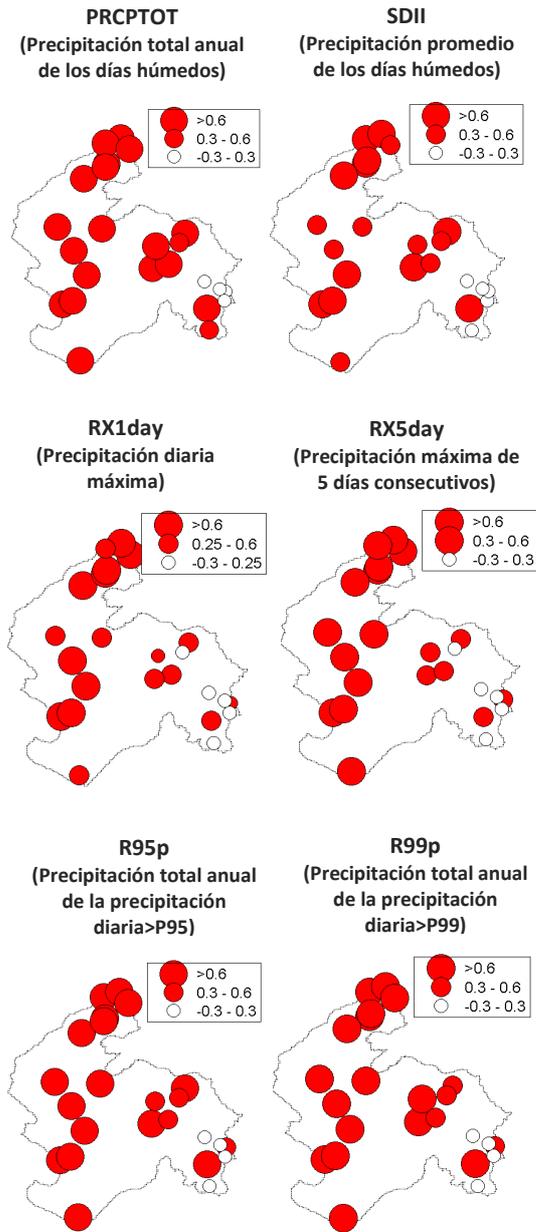
**Relación entre los índices de precipitación y los índices E y C**

La correlación de los índices de precipitación con el promedio de los índices E y C, durante diciembre a marzo, se muestra en la Figura 47 y 48. Las correlaciones no estadísticamente significativas al 90 por ciento se encuentran de color blanco, las positivas significativas de color rojo y las negativas significativas de color azul.

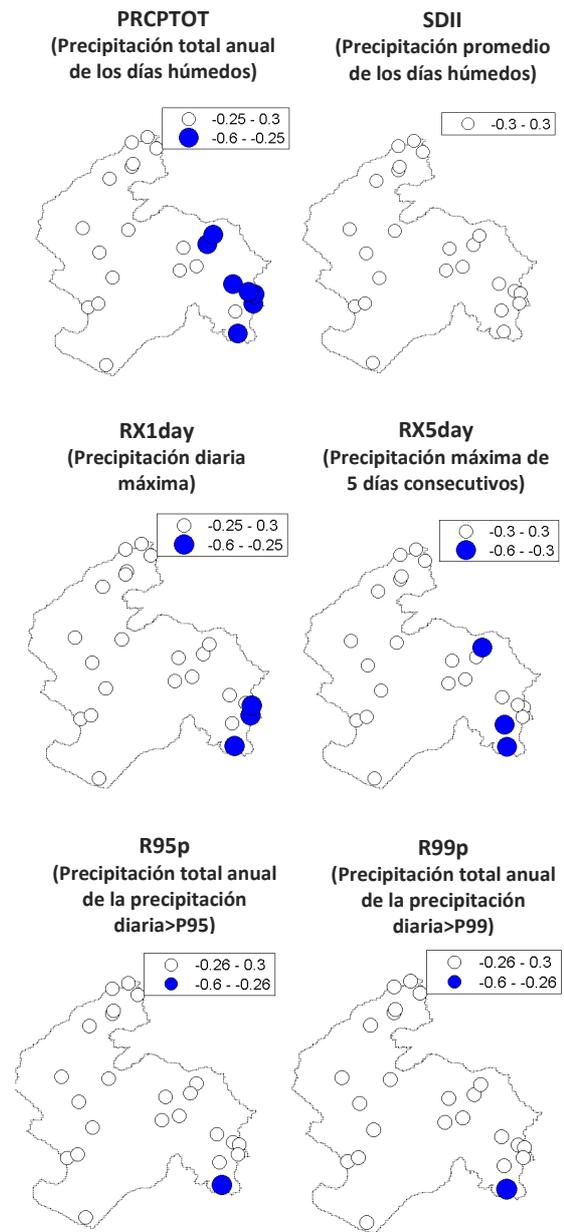


**Figura 47: Correlación de los índices anuales de precipitación asociados a la frecuencia de la precipitación (días) y los índices E y C durante el periodo de diciembre a marzo. Los círculos blancos corresponden a valores no estadísticamente significativos al 90%**

## ÍNDICE E



## ÍNDICE C



**Figura 48: Correlación de los índices anuales de precipitación asociados a la intensidad de la precipitación (mm) y los índices E y C durante el periodo de diciembre a marzo. Los círculos blancos corresponden a valores no estadísticamente significativos al 90%**

Los índices *PRCPTOT*, *R10* y *CWD*, en la zona de la planicie costera de la zona de estudio (Tumbes y Bajo Piura), están correlacionados positivamente con el índice *E*, mientras que la cuenca alta (Alto Piura) están correlacionados negativamente con el índice *C*. Esta agrupación es similar a la obtenida por los vectores regionales

(Figura 17). Respecto al índice *PRCPTOT*, la relación con los índices *E* y *C* obtenida está acorde a lo esperado, según el estudio de Lavado y Espinoza (2014).

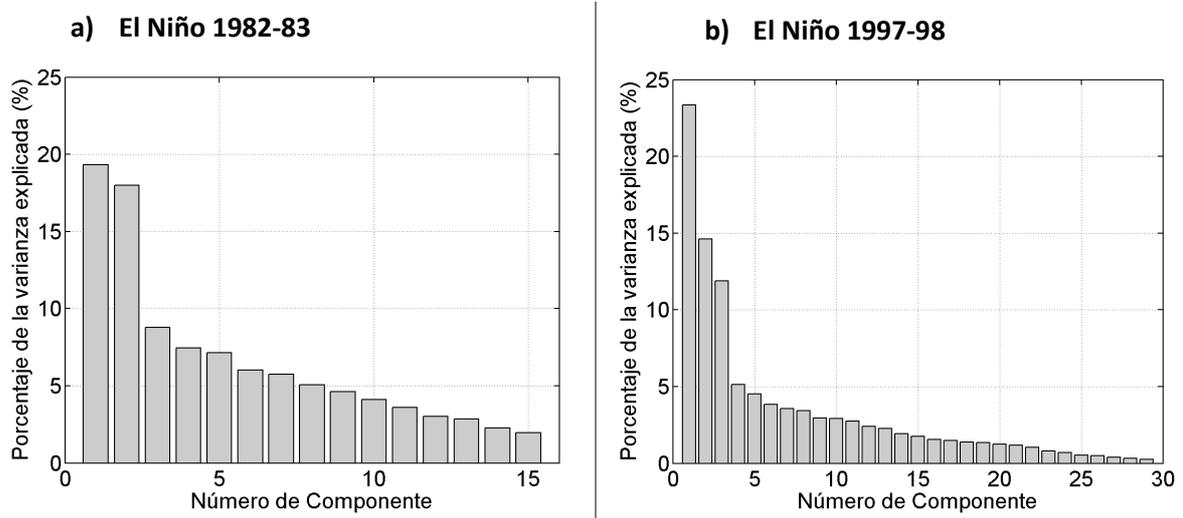
Los índices *SDII*, *RX1day*, *RX5day*, *R95p*, *R99p* y *R20*, se encuentran correlacionados positivamente con el índice *E* en casi la totalidad de las estaciones analizadas, a excepción de algunas estaciones del Grupo 2. Es decir, el calentamiento del Pacífico Este provoca mayor intensidad y frecuencia en la precipitación total y extrema de la planicie costera. Respecto a su relación con el índice *C*, presenta correlaciones no significativas en escasas estaciones, lo cual no permite afirmar un comportamiento regional.

## **4.2 VARIABILIDAD DIARIA DE LA PRECIPITACIÓN Y SU RELACIÓN CON LOS CAUDALES DURANTE LOS EVENTOS EL NIÑO 1982-83 Y 1997-98**

### **4.2.1 PATRONES ESPACIO-TEMPORALES DE PRECIPITACIÓN DIARIA**

Las series temporales de precipitación total diaria de las 15 y 29 estaciones meteorológicas para los periodos de enero a mayo de 1983 y, diciembre de 1997 a mayo de 1998, respectivamente, se presentan en la Figura 77 y 78, del Anexo 4.1. Del Análisis de Componentes Principales, basado en la matriz de correlaciones, se obtuvo la misma cantidad de componentes como estaciones meteorológicas analizadas. Estos 15 y 29 componentes principales explican la totalidad de la variabilidad de la precipitación diaria en la costa norte del Perú (Tumbes y Piura) durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98, respectivamente.

De enero a mayo de 1983 (Figura 49-a), los dos primeros componentes principales representan el 37.3 por ciento de la varianza (19.3 por ciento para el CP-1 y 18 por ciento para el CP-2). Mientras que, durante diciembre de 1997 y mayo de 1998 (Figura 49-b), los dos primeros componentes representan el 38 por ciento de la varianza (23.4 por ciento para el CP-1 y 14.6 por ciento para el CP-2).

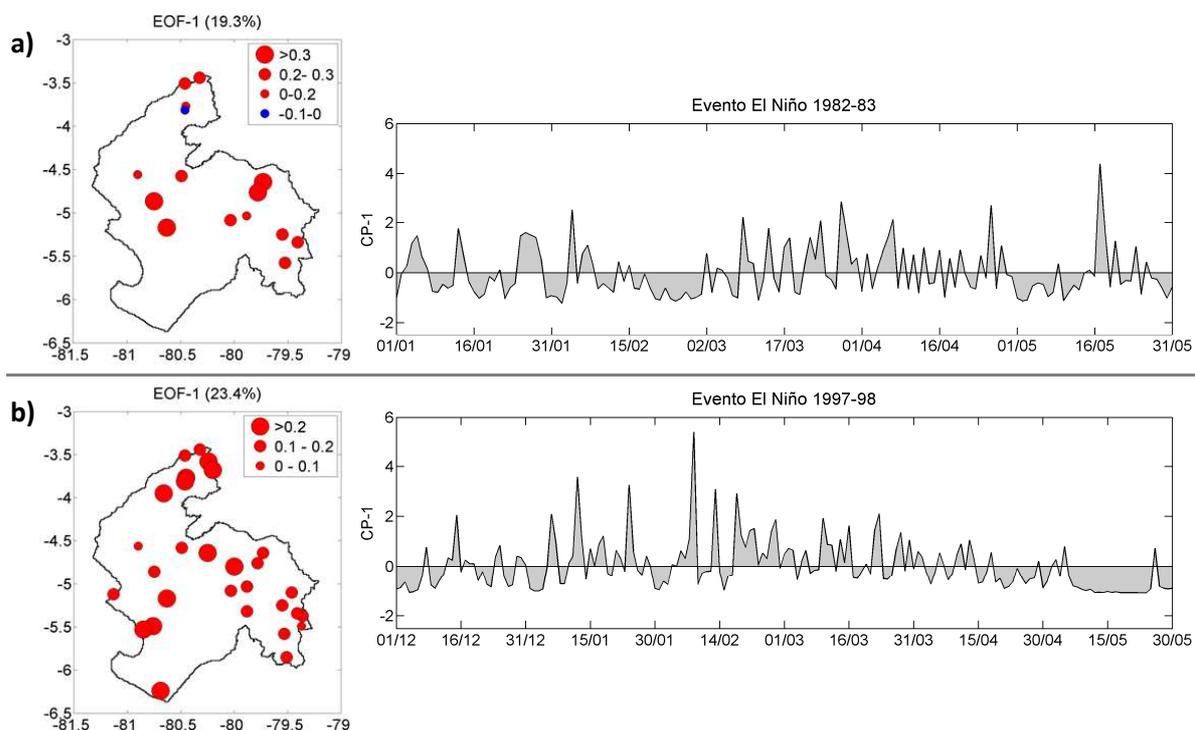


**Figura 49: Porcentaje de varianza explicada por cada componente principal: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**

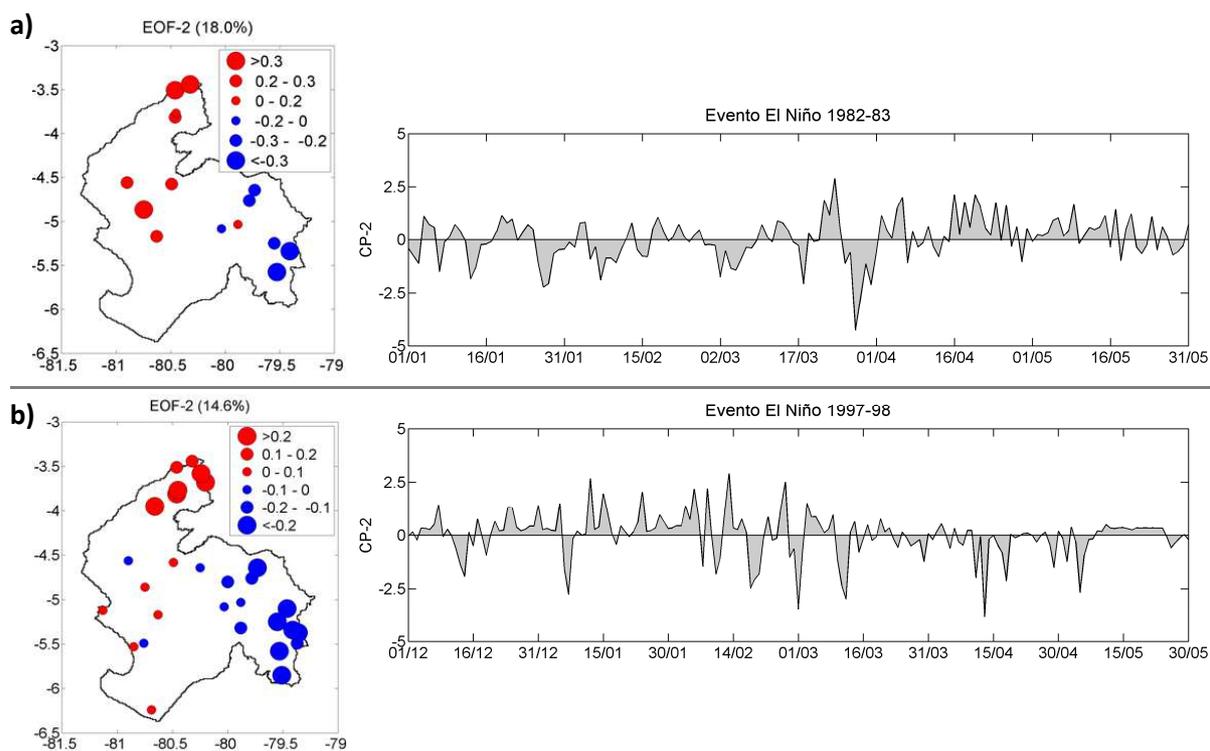
### *Análisis espacio-temporal de la precipitación*

En el análisis de la variabilidad diaria de la precipitación durante ambos eventos El Niño, se estudiaron el primer y segundo componente principal: CP-1 y CP-2 (variabilidad temporal) y EOF-1 y EOF-2 (variabilidad espacial). La Figura 50 y 51, muestran tanto las variaciones espaciales y temporales de las precipitaciones diarias durante los eventos El Niño de 1982-1983 y 1997-98 respectivamente.

Los resultados del evento El Niño 1982-1983 a nivel espacial (Figura 50-a), muestran que para el EOF-1 existe correlación positiva entre todas las estaciones, a excepción de la estación Rica Playa, que presenta correlación negativa. Para el EOF-1 del evento El Niño de 1997-98 (Figura 50-b), se observa una correlación positiva con las 29 estaciones meteorológicas analizadas. Respecto al CP-1 (Figura 50-a), se puede observar que el periodo más lluvioso ocurrió durante marzo a abril de 1983, mientras el mes menos lluvioso fue febrero. Por otro lado, la precipitación diaria durante el evento El Niño de 1997-98 presenta diferencias a escala temporal, respecto al evento de 1982-1983. En el CP-1 (Figura 50-b), se observa que a partir de la primera semana de mayo de 1998 existe un descenso abrupto de la precipitación diaria. Además, en la zona de estudio, el periodo más lluvioso fue enero-marzo de 1998.



**Figura 50: Variación temporal y espacial de la precipitación diaria del EOF-1 durante el evento: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**



**Figura 51: Variación temporal y espacial de la precipitación diaria del EOF-2 durante el evento: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**

Respecto al segundo modo de variabilidad de la precipitación diaria o EOF-2 (Figura 51), en ambos eventos El Niño, la zona alta de las cuencas de la región Piura está correlacionada negativamente, mientras que la zona baja de Piura y la región Tumbes se encuentra correlacionada positivamente. Por tanto, los valores positivos (negativos) del segundo componente principal (CP-2) representarán la precipitación diaria de la cuenca baja (alta) de la zona de estudio.

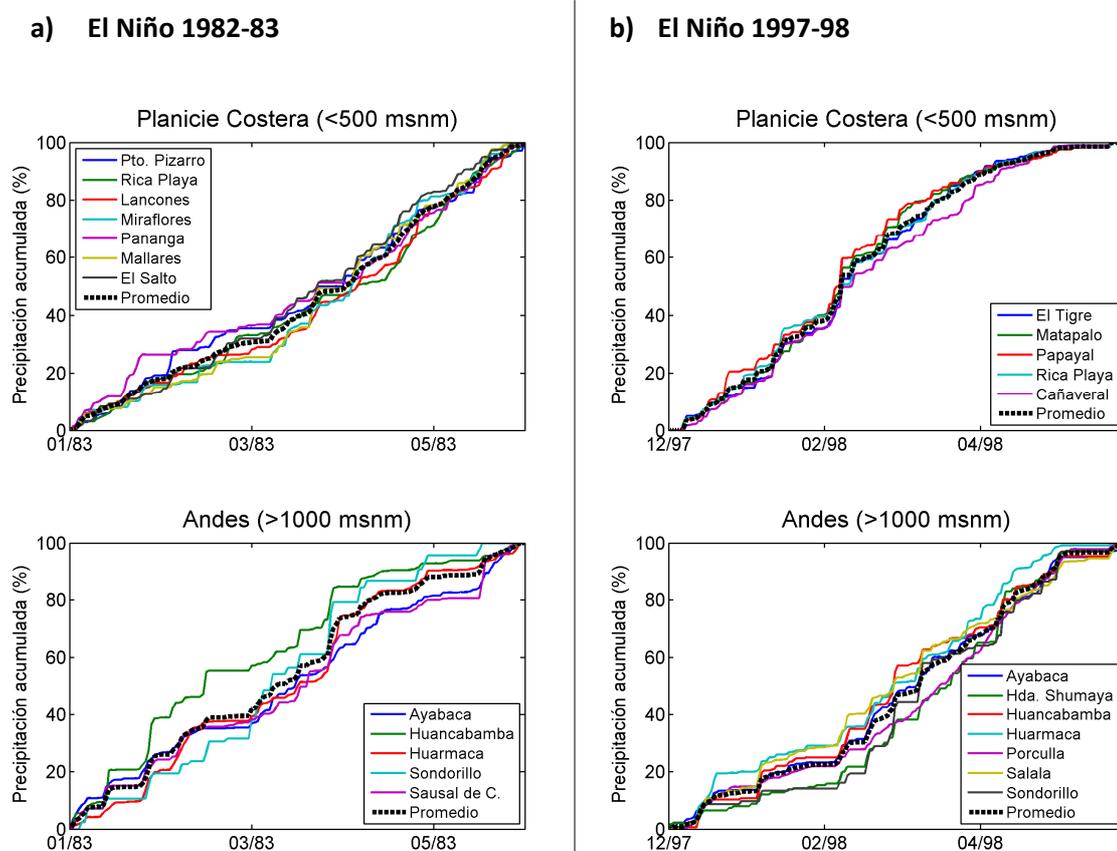
Durante el evento El Niño de 1982-83, respecto al CP-2 (Figura 51-a), se observa un periodo muy lluvioso a partir de abril, para las estaciones de la planicie costera (Tumbes y Bajo Piura), siendo un periodo seco para la zona de los Andes (Alto Piura), donde se observa la correlación negativa del EOF-2. En la zona de los Andes, la precipitación se presenta con mayor intensidad que en la zona costera, en los meses previos (enero a marzo). Durante el evento El Niño de 1997-98, para el CP-2 (Figura 51-b), se observa un periodo lluvioso durante diciembre de 1997 a febrero de 1998, para las estaciones de la zona costera, principalmente de la región Tumbes, mientras que en el Alto Piura (zona de los Andes) se presentan a mediados de febrero, hasta inicios de mayo.

El detalle de los dos primeros EOFs por estación, se presenta en la Tabla 14 y 15, del Anexo 4.2, para los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98, respectivamente. De los valores del EOF-2, se observa que las estaciones ubicadas por encima de los 1000 msnm presentaron correlación negativa del EOF-2 en ambos eventos El Niño, a excepción de las estaciones con correlación en el rango de -0.10 y 0. Esta altitud es similar a la obtenida de la agrupación mediante el Método del Vector Regional (MVR) y lo encontrado por Mikami (1986).

Se sabe que si una estación presenta una mayor correlación con el componente principal, la precipitación diaria de dicha estación está siendo representada por el componente. Por ello, se agruparon las estaciones ubicadas en la parte alta y baja de la zona de estudio considerando un umbral de correlación de  $\pm 0.2$ . Esto permitió seleccionar las estaciones cuyo comportamiento está siendo reflejado por el componente principal.

Durante el evento El Niño de 1982-83, la agrupación de las estaciones ubicadas en la planicie costera (< 500 msnm) acorde al EOF-2 considerando solo las estaciones con valores de correlación mayores a 0.2, es la siguiente: El Salto, Mallares, Pananga, Miraflores, Lancones, Rica Playa y Puerto Pizarro. Mientras que las estaciones ubicadas en la zona de los Andes (mayor a 1000 msnm), considerando valores de correlación menores a -0.2 son: Ayabaca, Huancabamba, Huarmaca, Sondorillo y Sausal de Culucan.

Durante el evento El Niño de 1997-98, la agrupación de las estaciones ubicadas en la planicie costera acorde al EOF-2, considerando solo las estaciones con valores de correlación mayores a 0.2 son: El Tigre, Matapalo, Papayal, Rica Playa y Cañaverl (ubicadas en la región Tumbes). Mientras que las estaciones ubicadas en la zona de los Andes (mayor a 1000 msnm), considerando valores de correlación menores a -0.2 son: Ayabaca, Huancabamba, Huarmaca, Sondorillo, Hacienda Shumaya, Porculla y Salala.



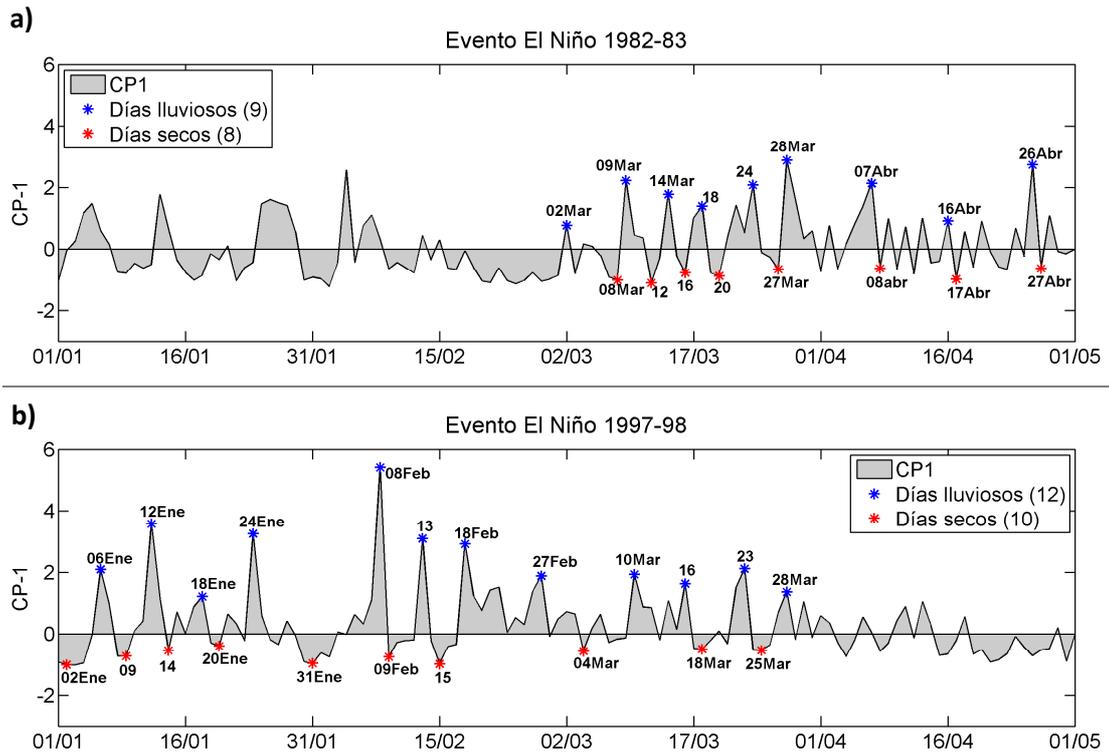
**Figura 52: Variación porcentual de la precipitación diaria acumulada: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**

Se puede afirmar que existe un patrón espacial este-oeste (asociado a la altitud) de la variabilidad de la precipitación diaria en las regiones de Tumbes y Piura durante los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98. La Figura 52 muestra las variaciones porcentuales de la precipitación acumulada durante los eventos El Niño analizados, acorde a la agrupación previamente realizada según los signos del EOF-2. De ella se observa que durante el evento El Niño de 1982-83 (Figura 52-a), a inicios de abril de 1983 la precipitación alcanzó en promedio el 49 por ciento de la precipitación total en la zona de la planicie costera, mientras que en la zona de los Andes (mayor a los 1000 msnm) había alcanzado cerca del 74 por ciento de la precipitación total. Por el contrario, durante el evento El Niño de 1997-98 (Figura 52-b), a mediados de febrero de 1998 la precipitación alcanzó, en promedio, el 60 por ciento de la precipitación total en la zona de la planicie costera, mientras que para la zona de los Andes había alcanzado cerca del 30 por ciento de la precipitación total.

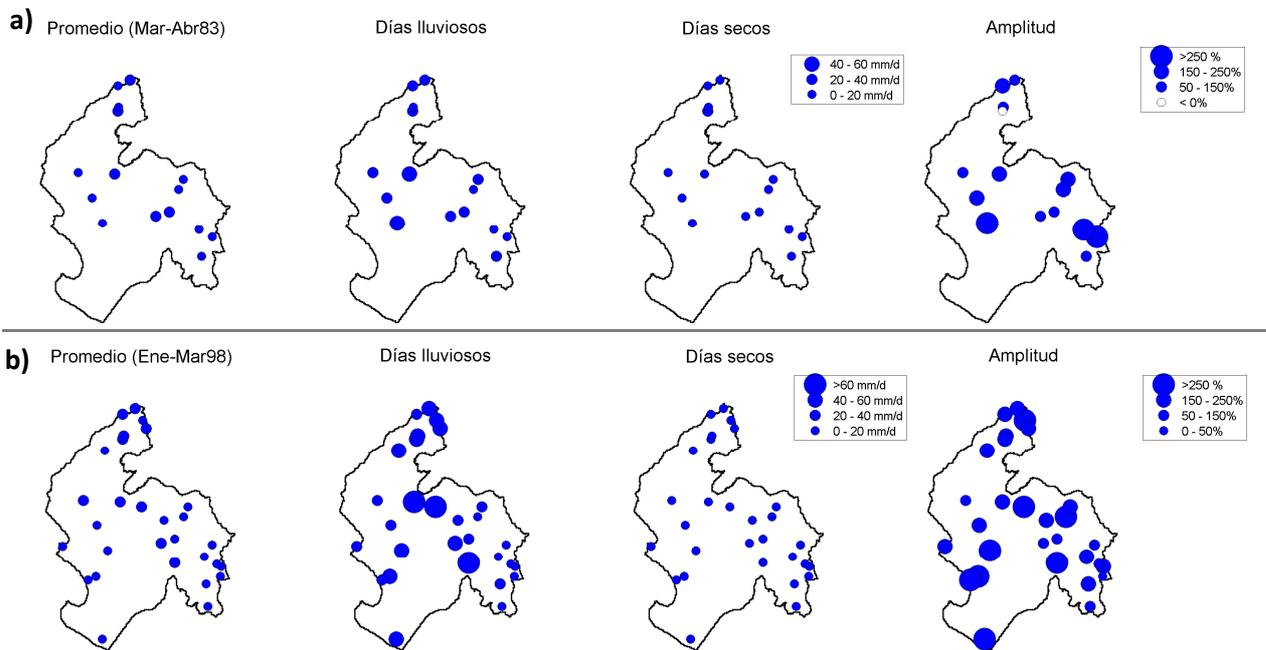
#### **Selección de días lluviosos y secos**

La lista de los días lluviosos y secos definidos a partir del primer componente principal (CP-1, Figura 50), se muestran en la Tabla 16 del Anexo 4.2 y, gráficamente, en la Figura 53. Cabe recordar que valores positivos del CP-1 corresponden a días con abundante precipitación en toda la zona de estudio, mientras que valores negativos del CP-1 indican días con escasa precipitación.

Se seleccionaron los días de precipitación más y menos intensa (días lluviosos y días secos) durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98, obteniéndose un total de 9 días lluviosos y 8 días secos para el periodo marzo-abril de 1983 y un total de 12 días lluviosos y 10 días secos para el periodo enero-marzo de 1998. Asimismo, se observa que existe una periodicidad promedio de 7 días entre los días lluviosos, lo cual es similar a lo encontrado por Takahashi (2004).



**Figura 53: Días lluviosos y secos según el primer modo de variabilidad (CP-1) durante el evento: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**



**Figura 54: Distribución espacial del promedio de la precipitación total diaria durante el periodo analizado (mm/d), días muy lluviosos (mm/d), secos (mm/d) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo durante el evento: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**

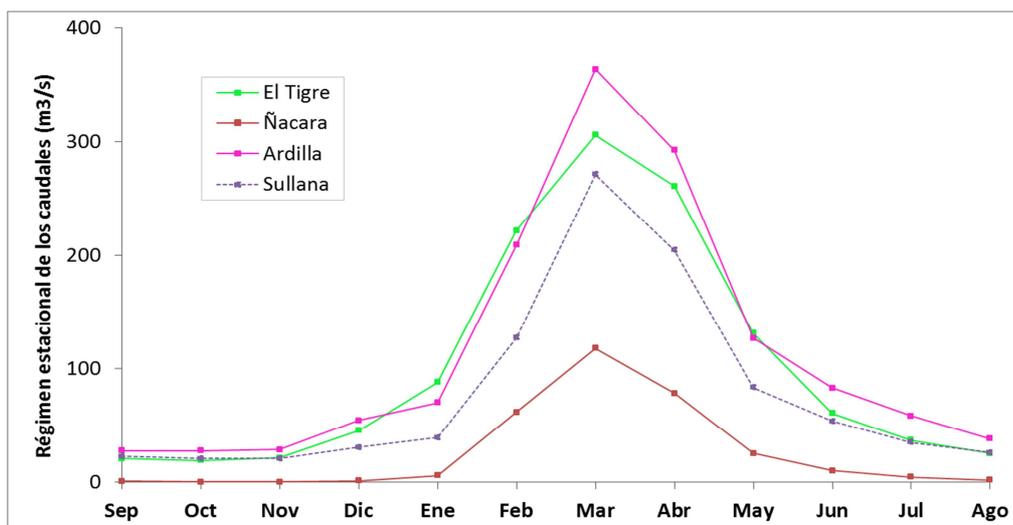
De marzo a abril de 1983 (Figura 54-a), la precipitación promedio en la mayoría de estaciones fue menor a 20 mm/día. Durante los días lluviosos de dicho periodo, la precipitación promedio se encontró en el rango de 20-40 mm/día, e inclusive, hasta los 54.4 mm/día (estación Bernal). Por otro lado, durante los días secos, la precipitación promedio fue menor a 20 mm/día y a la precipitación promedio, a excepción de la estación Rica Playa (Tumbes), donde se presentó una amplitud negativa. Esta estación presenta correlación negativa con el primer componente principal (Figura 50-a), lo cual explica este resultado. Para el resto de estaciones, la amplitud fue en su mayoría mayor al 100 por ciento; es decir, las diferencias entre un día lluvioso y un día seco fueron mayores a la media. El valor más alto observado de amplitud fue de 441 por ciento en la estación Sondorillo (parte alta de Piura).

Mientras que, de enero a marzo de 1998 (Figura 54-b), la precipitación promedio, en la mayoría de las estaciones, fue similar al evento 1982-83, menor a 20 mm/día. Durante los días lluviosos de dicho periodo, la precipitación promedio osciló entre 20 mm/día y 77 mm/día (estación Partidor, Piura). Respecto a los días secos, la precipitación osciló entre 0 y 20 mm/día, siendo menor a la precipitación promedio observada durante los días lluviosos. La amplitud fue, en su mayoría, superior al 100 por ciento. El valor máximo se presentó en la estación Bernal (parte baja de Piura) con 404 por ciento. El detalle de los resultados de la precipitación diaria promedio durante: el periodo de estudio, días lluviosos, días secos y la amplitud se presentan en la Tabla 17 y 18, del Anexo 4.2, para los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98, respectivamente.

#### **4.2.2 RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA**

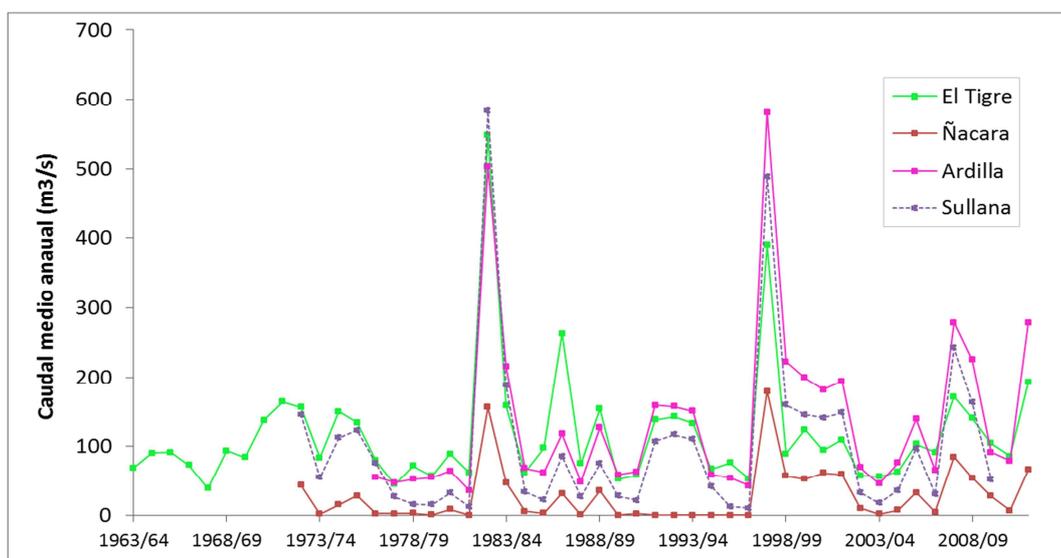
##### **Caracterización de la hidrometría**

Según el régimen estacional (Figura 55), marzo es el mes de mayor caudal, tanto en Tumbes (río Tumbes) y Piura (ríos Chira y Piura). Ambas regiones presentan comportamientos similares en el régimen de caudales. La época de avenidas se produce entre enero a mayo, mientras que la época de estiaje se presenta entre julio y noviembre. La estación Ñacara (río Piura) presenta un régimen de menor magnitud al resto de las estaciones, lo cual se puede deber a la ubicación de la estación en la parte alta de la cuenca.



**Figura 55: Régimen estacional de los caudales**

El detalle de las series temporales de los caudales medios mensuales de las estaciones hidrométricas para el periodo de 1963-2012, se presenta en la Figura 79, del Anexo 4.3. El caudal medio mensual máximo corresponde a la estación Ardilla con  $1862 \text{ m}^3/\text{s}$ , en abril de 1998 (anomalía del 537 por ciento). El segundo caudal medio mensual máximo, corresponde a la estación Sullana con  $1646 \text{ m}^3/\text{s}$ , en abril de 1983 (anomalía del 705 por ciento).

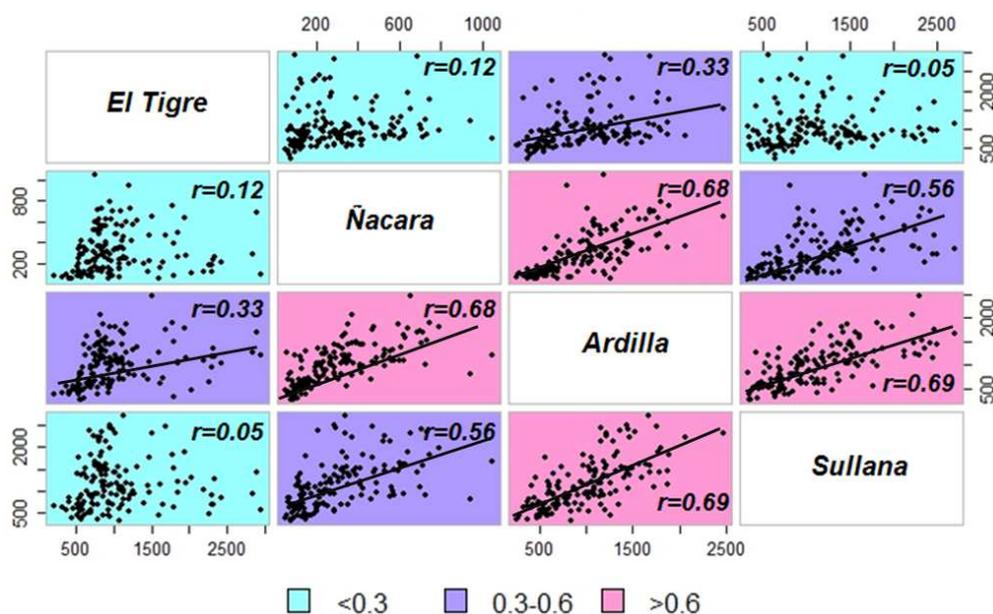


**Figura 56: Series de caudal medio anual (periodo 1963/64 – 2011/12)**

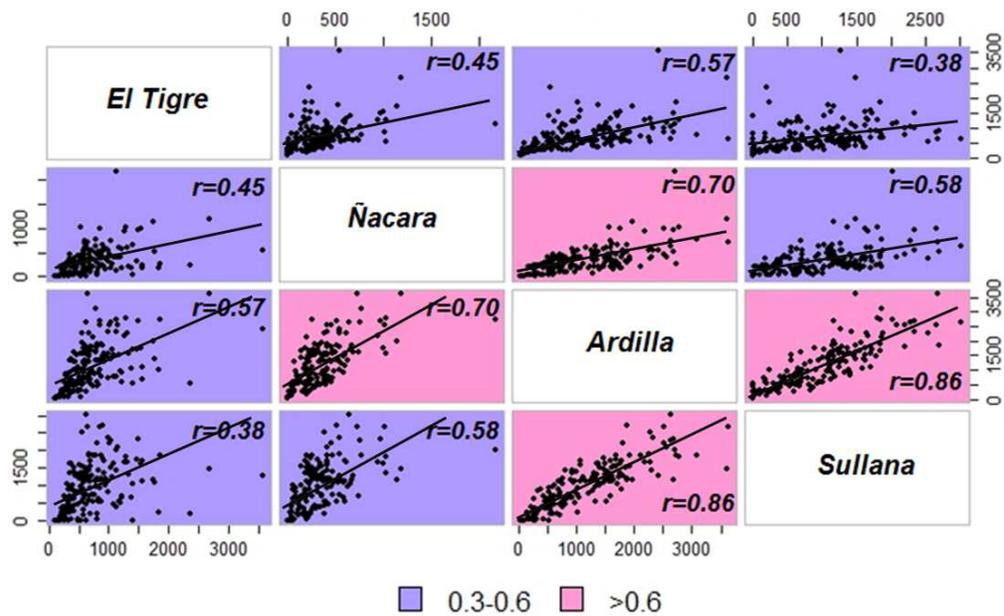
De la Figura 56, donde se muestran las series de caudales medios anuales para todas las estaciones hidrométricas, se observa claramente picos de caudal en los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98. Los valores máximos corresponden a la estación Sullana con 582.7 m<sup>3</sup>/s, en 1982/83 (anomalía del 660 por ciento) y la estación Ardilla con 581 m<sup>3</sup>/s, en 1997/98 (anomalía del 415 por ciento).

**Correlación entre las estaciones hidrométricas durante los eventos El Niño**

Del análisis de correlación de los caudales diarios para el evento El Niño 1982-83 y El Niño 1997-98 (Figura 57 y 58, respectivamente), se aprecia que la estación El Tigre presenta bajas correlaciones con el resto de estaciones. Estas tienen una mejor asociación entre ellas, siendo más notorio durante el evento El Niño 1982-83 (Figura 57). Existe una diferencia entre la variabilidad de los caudales entre las regiones Tumbes y Piura. Esto corrobora la necesidad de calcular índices de caudales para cada una de las regiones de estudio por separado (Tumbes y Piura). Las series temporales de caudal medio diario para las 4 estaciones hidrométricas para los periodos de enero a mayo de 1983 y diciembre de 1997 a mayo de 1998, se presentan en la Figura 80 y 81, del Anexo 4.3 respectivamente.



**Figura 57: Matriz de correlación de los caudales medios diarios (ene83-may83)**  
 \*Matrices coloreadas según nivel de correlación. Se muestra la línea de tendencia cuando la correlación es significativa al 95%



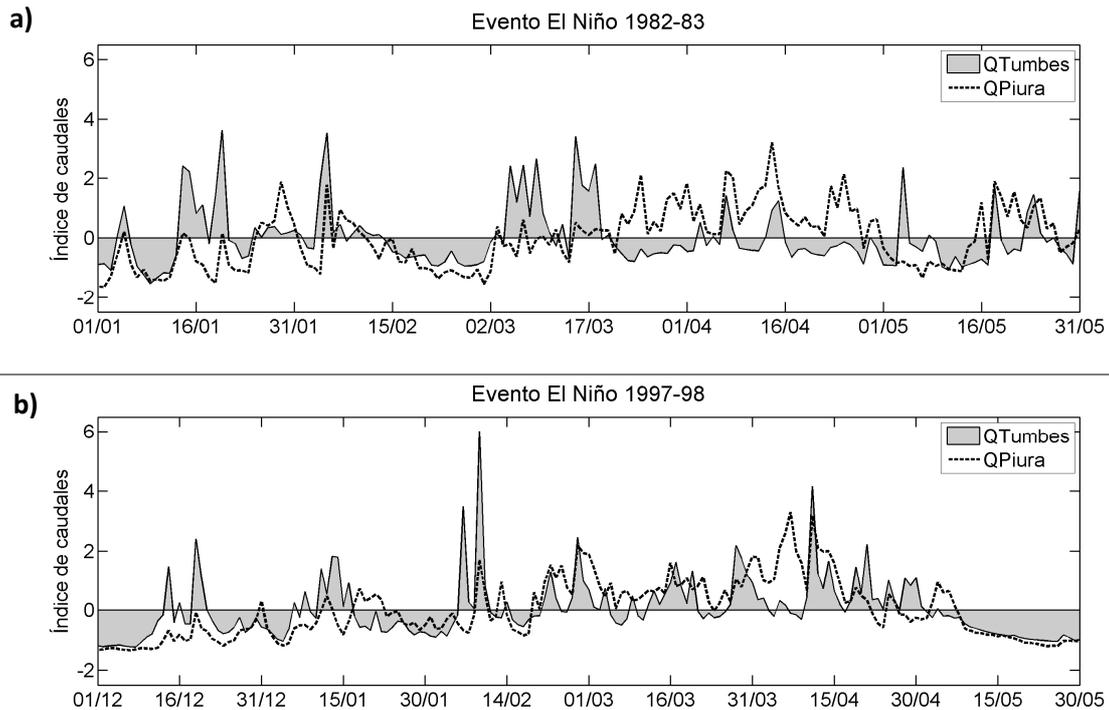
**Figura 58: Matriz de correlación de los caudales medios diarios (dic97-may98)**  
 \*Matrices coloreadas según nivel de correlación. Se muestra la línea de tendencia cuando la correlación es significativa al 95%

**Índices de caudales por región (Tumbes y Piura)**

Los resultados del análisis de regresión lineal múltiple de los caudales diarios en la región de Piura (Tabla 7), muestran fuertes asociaciones entre los caudales de la región. El índice de caudales de Piura para el evento El Niño 1982-83, representa el 70 por ciento ( $r^2=0.70$ ) de la variabilidad de los caudales de Piura, mientras que, durante el evento El Niño 1997-98, representa el 87 por ciento ( $r^2=0.87$ ) de la variabilidad de los caudales de Piura. Finalmente, las series temporales de los índices de caudales para las regiones de Tumbes y Piura durante los periodos de enero a mayo de 1983 y diciembre de 1997 a mayo de 1998, se presentan en la Figura 59.

**Tabla 7: Correlación lineal múltiple de los caudales medios diarios en la región Piura**

Estadísticas de la regresión	El Niño 1982-83	El Niño 1997-98
Coefficiente de correlación múltiple ( $r^2$ )	0.70	0.87
Coefficiente de determinación $R^2$	0.49	0.75
Error típico	396.0	343.67
Observaciones	151	182
Intercepción	273.47	110.41
Ardilla ( $r_1$ )	0.73	0.78
Ñacara ( $r_2$ )	0.47	-0.11



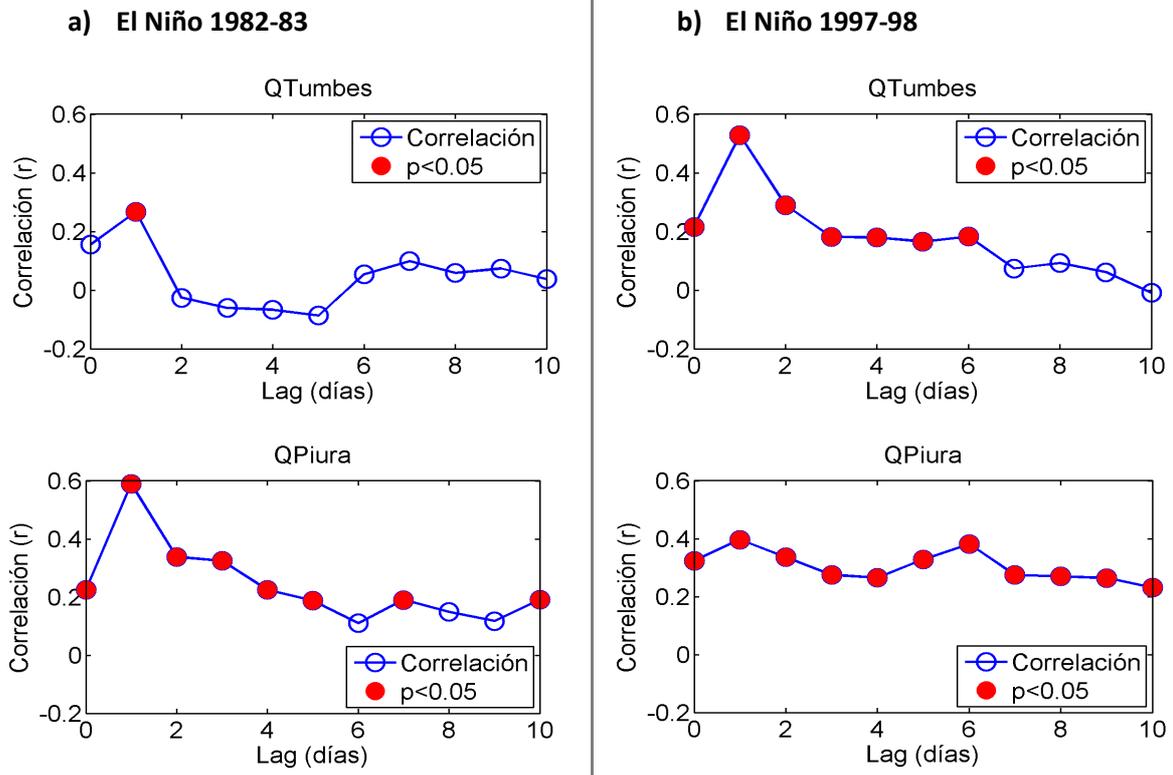
**Figura 59: Series de los índices de caudales por región durante: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**

**Relación precipitación-escorrentía**

Existe un tiempo de desfase o respuesta entre la ocurrencia de la precipitación y la escorrentía. Este valor ha sido determinado estadísticamente mediante una correlación cruzada empleando hasta 10 días de desfase o *lag* entre el índice de caudales según región Tumbes o Piura (Figura 59) y el primer componente principal de la precipitación diaria (CP-1, Figura 50) para los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98.

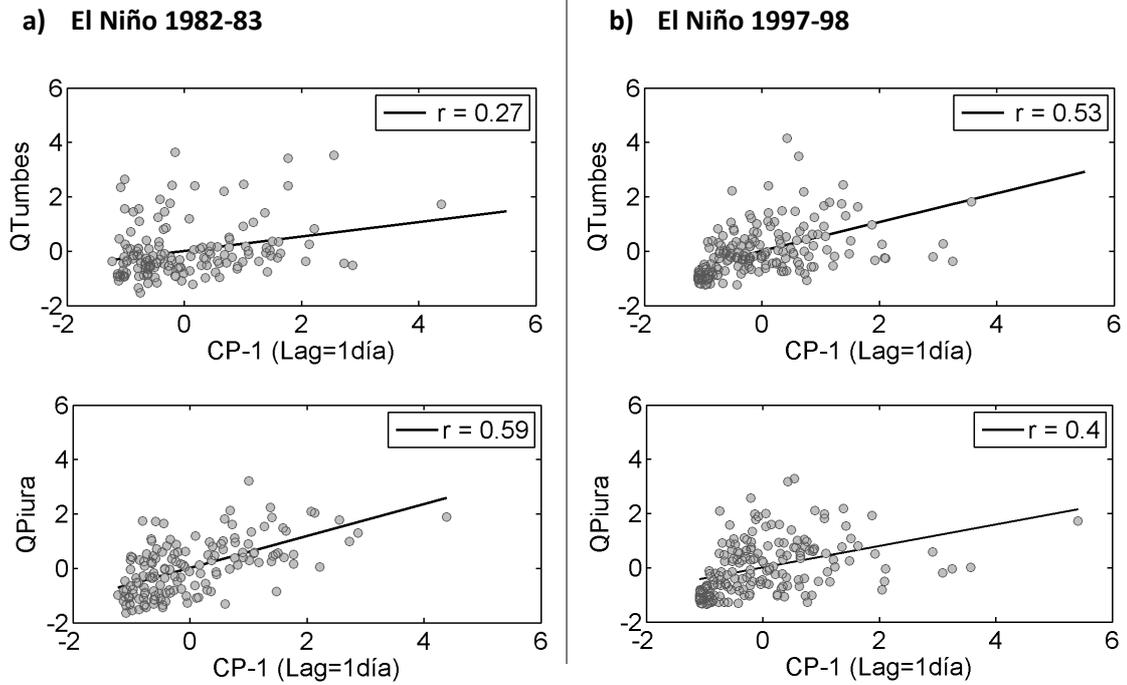
El desfase o *lag* entre la precipitación y escorrentía diaria obtenido es igual a 1 día, donde la correlación es máxima y a su vez significativa al 95 por ciento (Figura 60). Es decir, tras la ocurrencia de una precipitación intensa, el caudal máximo se presentará en el siguiente día. A partir de este valor, las correlaciones disminuyen en todos los casos. Este comportamiento no es muy claro en el evento de 1997-98 para la región Piura; sin embargo, también se considera *lag=1 día* como el valor máximo de correlación. El valor de desfase puede ser menor (horas); sin embargo, escapa a los límites de los datos analizados (diarios). Esto se puede deber también a los horarios de registro de la información, así como a la falta de datos pluviométricos en toda la cuenca de Tumbes y Chira, cuya parte alta se encuentra

del lado ecuatoriano y sobre la cual no se pudieron obtener datos. Cabe resaltar que el desfase entre la relación precipitación-escorrentía también estará influenciada por otros procesos de superficie, como la humedad del suelo o las aguas subterráneas, etc.

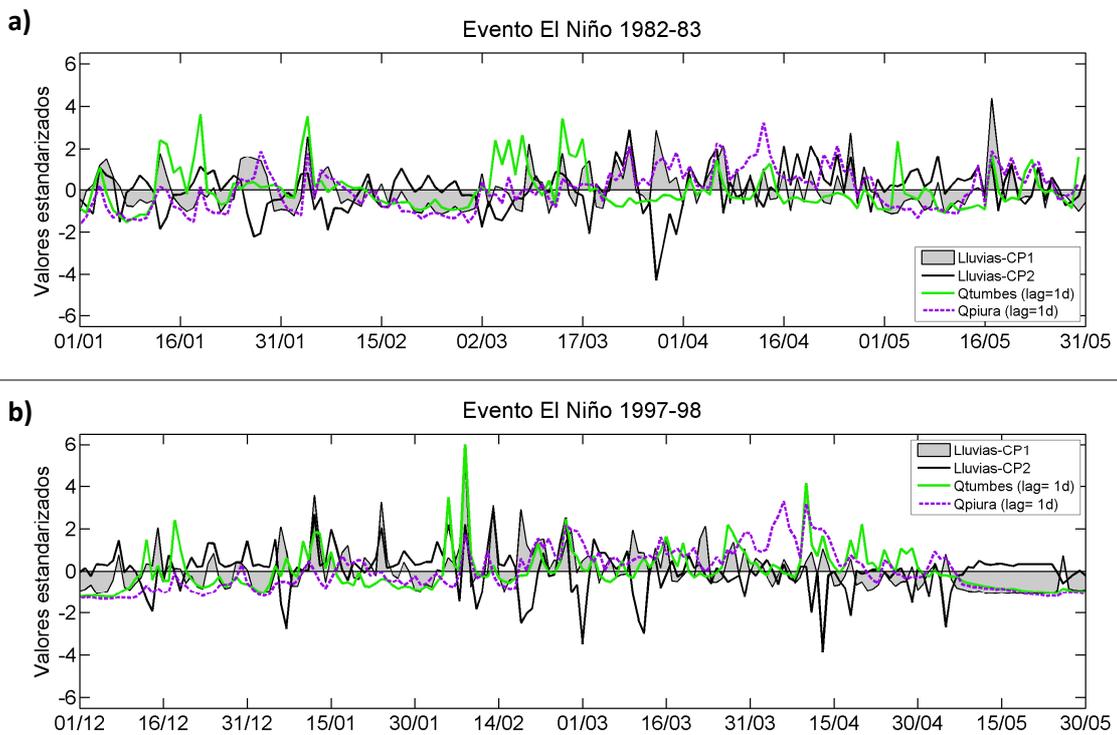


**Figura 60: Análisis de la correlación lineal cruzada entre el primer componente principal de precipitación diaria (CP-1) y el índice de caudales de la región Tumbes y Piura: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**

La correlación entre el primer componente principal y el índice de caudales por región considerando un  $lag=1día$ , se muestra en la Figura 61. De ella se observa que existe una mejor correlación en el evento de 1997-98 ( $r=0.53$ ) a diferencia del evento 1982-83 ( $r=0.27$ ) en la región de Tumbes. Mientras que, para la región Piura, existe una mayor correlación para el evento de 1982-83 ( $r=0.59$ ) que para el evento de 1997-98 ( $r=0.4$ ).



**Figura 61. Diagrama de dispersión entre el primer componente principal de precipitación diaria (CP-1) con un día de desfase y el índice de caudales de la región Tumbes y Piura: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**



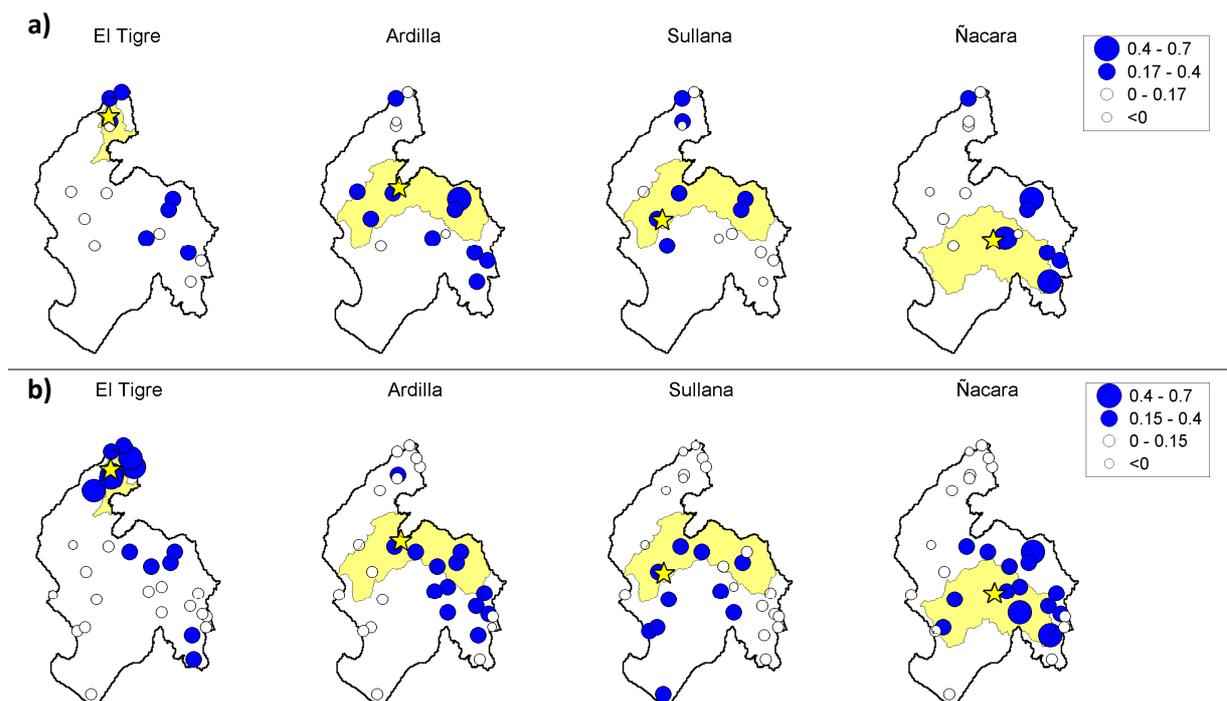
**Figura 62: Variabilidad diaria de las lluvias (CP-1 y CP-2) y caudales (Índice de caudales de las regiones Tumbes y Piura) durante: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**

De modo general, las series temporales del primer y segundo componente principal (CP-1 y CP-2), así como los índices de caudales de las regiones Tumbes y Piura, se muestran en la Figura 62. Al realizar la correlación múltiple de los índices de caudales con el primer y segundo modo de variabilidad de precipitación diaria (CP1 y CP-2, Figura 50 y 51), la correlación no fue superior que al emplear únicamente el CP-1. El detalle de las estadísticas de la regresión múltiple entre los índices de caudales por región y el primer y segundo componente principal (con desfase de 1 día) para los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98, se presentan en la Tabla 19 y 20 (Anexo 4.4), respectivamente.

De enero a mayo de 1983, el 19 por ciento de la varianza del primer modo de variabilidad de la precipitación diaria en la zona de estudio (CP-1), explica el 27 por ciento ( $r_1=0.27$ ) de la variabilidad de los caudales en Tumbes (Tabla 19) y el 59 por ciento ( $r_1=0.59$ ) de la variabilidad de los caudales en Piura (Tabla 20). Por otro lado, el 18 por ciento de la varianza del segundo modo de variabilidad de la precipitación diaria (CP-2), solo explica el 7 por ciento ( $r_2=0.07$ ) de los caudales en Tumbes y el 4 por ciento ( $r_2=0.04$ ) de los caudales en Piura. Esto ocurre debido a la bipolaridad del EOF. Cuando se correlacionan ambos componentes y el índice de caudales, se obtiene que el 37 por ciento de la varianza de la precipitación explica el 28 por ciento ( $r_{12}=0.28$ ) de los caudales en Tumbes y el 59 por ciento ( $r_{12}=0.59$ ) en Piura.

De diciembre de 1997 a mayo de 1998, el 23 por ciento de la varianza del primer modo de variabilidad de la precipitación diaria en la zona de estudio (CP-1), explica el 53 por ciento ( $r_1=0.53$ ) de los caudales en Tumbes (Tabla 19) y 40 por ciento ( $r_1=0.40$ ) de la variabilidad de los caudales en Piura (Tabla 20). Por otro lado, el 15 por ciento de la varianza del segundo modo de variabilidad de la precipitación diaria (CP-2), solo explica el 2 por ciento ( $r_2=0.02$ ) de los caudales en Tumbes y 20 por ciento ( $r_2=0.20$ ) de los caudales en Piura. Cuando se correlacionan ambos componentes y el índice de caudales, se obtiene que el 38 por ciento de la varianza de las precipitaciones explican el 53 por ciento ( $r_{12}=0.53$ ) de los caudales en Tumbes y el 45 por ciento ( $r_{12}=0.45$ ) de los caudales en Piura.

La relación precipitación-escorrentía encontrada es modesta con valores de correlación que no superan  $r=0.6$  (Figura 60 y 61). Esto podría estar relacionado a factores como: el porcentaje de varianza explicado por los componentes principales de la variabilidad diaria de las lluvias que no supera el 25 por ciento por componente, la incertidumbre de un tiempo de respuesta menor a 1 día o el monitoreo insuficiente de las lluvias en la zona de estudio.



**Figura 63: Correlación entre las series de caudales medios diarios de la estación hidrométrica (representada por una estrella) y las series de precipitación total diaria durante: a) Ene83-May83 y b) Dic97-May98**

Esto motivó a realizar una correlación entre las series de cada una de las estaciones con información pluviométrica y las estaciones con información hidrométrica diaria durante los eventos El Niño, considerando el tiempo de desfase obtenido (1 día) (Figura 63, los detalles por estación se muestran en la Tabla 21 y 22 del Anexo 4.4). De enero a mayo de 1983 (Figura 63-a), la estación hidrométrica El Tigre presenta coeficientes de correlación mayores a 0.3 y significativos al 95 por ciento con las estaciones meteorológicas Ayabaca y Puerto Pizarro; la estación hidrométrica Ardilla, con: Ayabaca, Lancones, Puerto Pizarro, Sausal de Culucan y San Pedro; la estación hidrométrica Ñacara, con: Huarmaca, San Pedro, Ayabaca, Sausal de Culucan, Sondorillo y Huancabamba (estaciones ubicadas en la parte alta

de la cuenca Chira y Piura), y la estación hidrométrica Sullana, con la estación Lancones.

De diciembre de 1997 a mayo de 1998 (Figura 63-b), la estación hidrométrica El Tigre presenta coeficientes de correlación mayores a 0.3 y significativos al 95 por ciento con las estaciones meteorológicas: Cañaverl, Matapalo, Papayal, El Tigre, Rica Playa, El Salto, Ayabaca y Sausal de Culucan; la estación hidrométrica Ardilla, con: Huarmaca, Sausal de Culucan y Ayabaca; la estación hidrométrica Ñacara, con: Malacasi, Huarmaca, Ayabaca, Sausal de Culucan, Santo Domingo y San Pedro, y la estación hidrométrica Sullana, con: Partidor y Lancones.

Analizando la relación precipitación-escorrentía por estación, se puede observar que la estación hidrométrica Ñacara (ubicada a 76 msnm, cuenca Piura) presenta una mayor correlación con una mayor cantidad de estaciones meteorológicas (ubicadas en la parte alta) para ambos eventos El Niño, a diferencia de las estaciones hidrométricas El Tigre, Ardilla y Sullana. La parte alta de la cuenca Piura se encuentra mejor monitoreada que en las cuencas Tumbes y Chira cuya extensión abarca parte del país vecino Ecuador. Cabe resaltar que la estación Huarmaca (ubicada a 2142 msnm) es la estación meteorológica que presenta la mayor correlación con la estación hidrométrica Ñacara, tanto para el evento El Niño 1982-83 ( $r=0.54$ ) como para El Niño 1997-98 ( $r=0.62$ ).

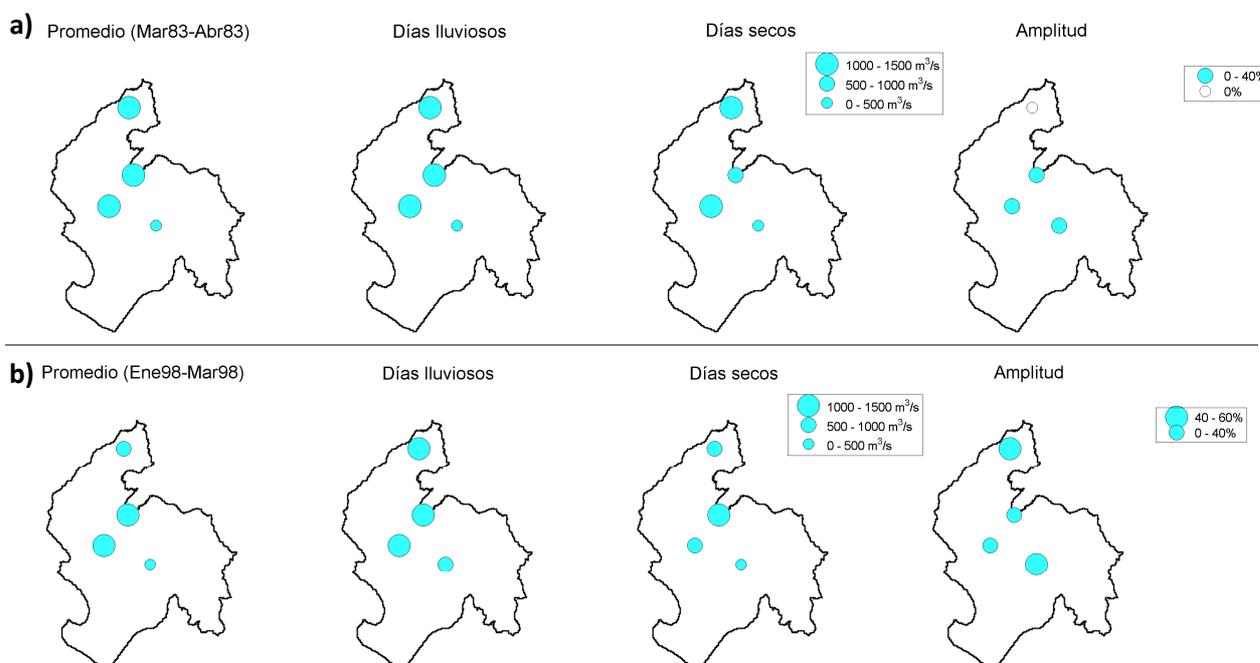
#### **Comportamiento espacial de los caudales durante días lluviosos y secos**

De las 4 estaciones hidrométricas, se obtuvieron los promedios de los caudales medios diarios para: el periodo en estudio, los días seleccionados como lluviosos y secos, así como la amplitud para cada uno de los eventos El Niño (Tabla 23 y 24 del Anexo 4.4). En este caso también se consideró el  $lag=1día$ . Es decir, para analizar el caudal se consideró el valor presentado el día posterior al día lluvioso o día seco, según sea el caso.

En ambos eventos El Niño 1982-83 y 1997-98 (Figura 64), la diferencia entre los caudales promedios presentados durante los días lluviosos y días secos seleccionados a partir del primer modo de variabilidad de la precipitación, no es muy amplia. La amplitud no es superior al 100 por ciento como en el caso de la

variable precipitación (Figura 54); es decir, las diferencias entre el caudal durante un día lluvioso y un día seco son menores a la media. Durante el evento El Niño de 1982-83 (Figura 64-a), la amplitud es casi cero para la estación El Tigre (río Tumbes). Asimismo, los caudales presentados durante días lluviosos son ligeramente mayores a los de los días secos, con amplitudes de hasta el 33 por ciento en las estaciones Ardilla y Ñacara (región Piura). Mientras que, durante el evento de 1997-98 (Figura 64-b), se presentaron amplitudes de hasta 86.5 por ciento para la estación Ñacara.

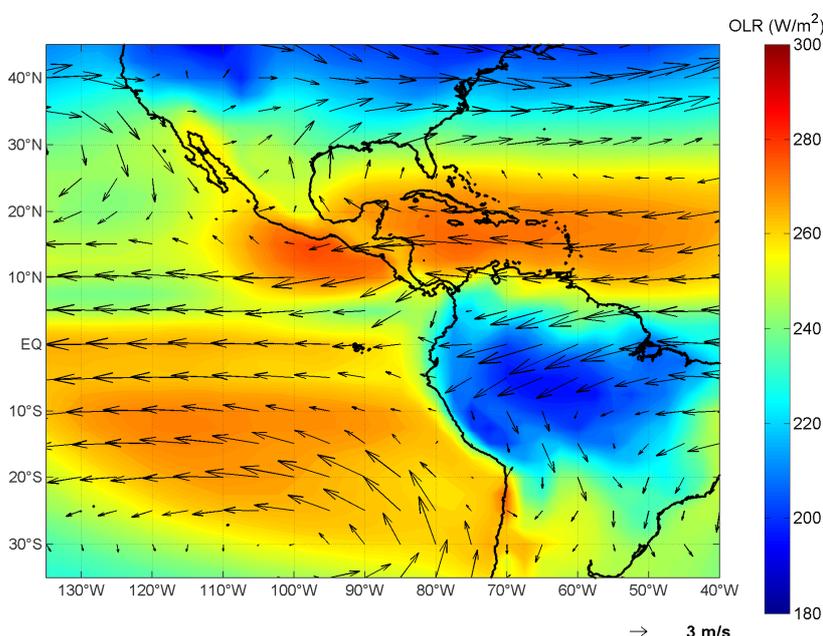
Como se observa en la Figura 64, las amplitudes entre los días lluviosos y días secos de los caudales para el evento El Niño 1997-98 (Figura 64-b) son superiores a las del evento El Niño 1982-83 (Figura 64-a). Esto se podría explicar debido al insuficiente número de estaciones meteorológicas durante el evento El Niño 1982-83 (15) respecto al evento El Niño de 1997-98 (29) para representar los caudales de los ríos de la zona de estudio. Asimismo, se observa que Ñacara presenta nuevamente los mejores resultados debido al mejor monitoreo de la precipitación en la cuenca.



**Figura 64: Distribución espacial del promedio de caudales medios diarios durante el periodo analizado ( $m^3/s$ ), días muy lluviosos ( $m^3/s$ ), secos ( $m^3/s$ ) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo: a) El Niño 1982-83 y b) El Niño 1997-98**

### 4.3 LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y SU RELACIÓN CON LA OCURRENCIA DE DÍAS LLUVIOSOS Y SECOS DURANTE LOS EVENTOS EL NIÑO 1982-83 Y 1997-98

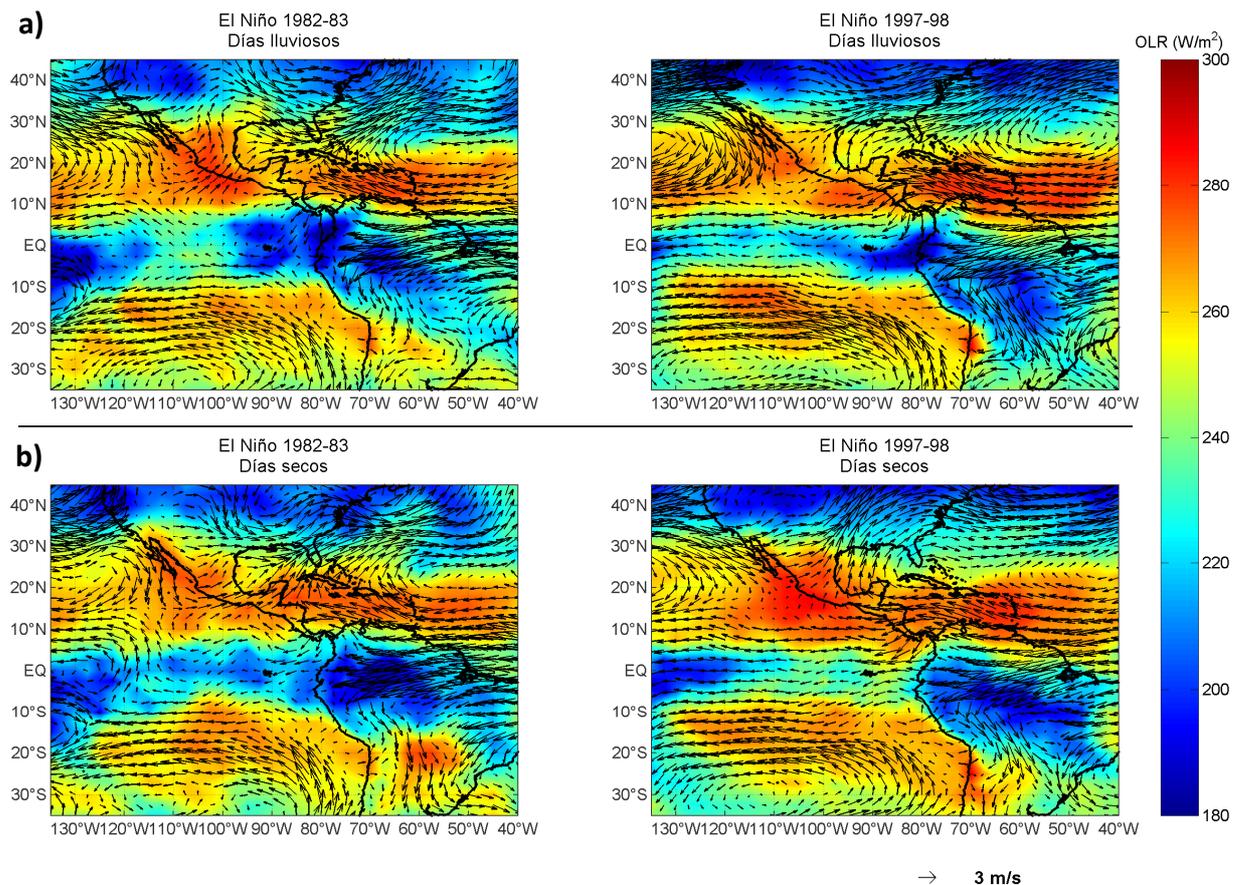
El promedio de las variables de radiación de onda larga saliente (OLR) y vientos a 850 hPa durante enero a abril (periodo 1981-2010), se presenta en la Figura 65. Se observa que los vientos alisios, tal como la bibliografía indica, se dirigen de este a oeste a lo largo del Pacífico Ecuatorial. Asimismo, existe mayor actividad convectiva (menor energía saliente) en la zona de los Andes del Perú y el noroeste de Brasil y menor o nula actividad convectiva en la costa peruana (mayor energía saliente).



**Figura 65: Condiciones promedio de radiación de onda larga saliente (OLR) de la NOAA/OAR/ESRL y vientos a 850 hPa del NCEP/NCAR Reanalysis para el periodo enero-abril (Periodo 1981-2010)**

#### *Análisis durante días lluviosos y secos*

Los resultados del promedio de las variables climáticas (OLR y vientos) durante los días lluviosos y secos para los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98, se presentan en la Figura 66. Estos días fueron seleccionados según el primer modo de variabilidad de la precipitación diaria obtenida previamente bajo un Análisis de Componentes Principales (Figura 53). Durante los días lluviosos (Figura 66-a), en ambos eventos, existe una alta actividad convectiva entre los 75°W- 90°W y 10°N-10°S, la cual no se presenta con la misma intensidad durante los días secos.



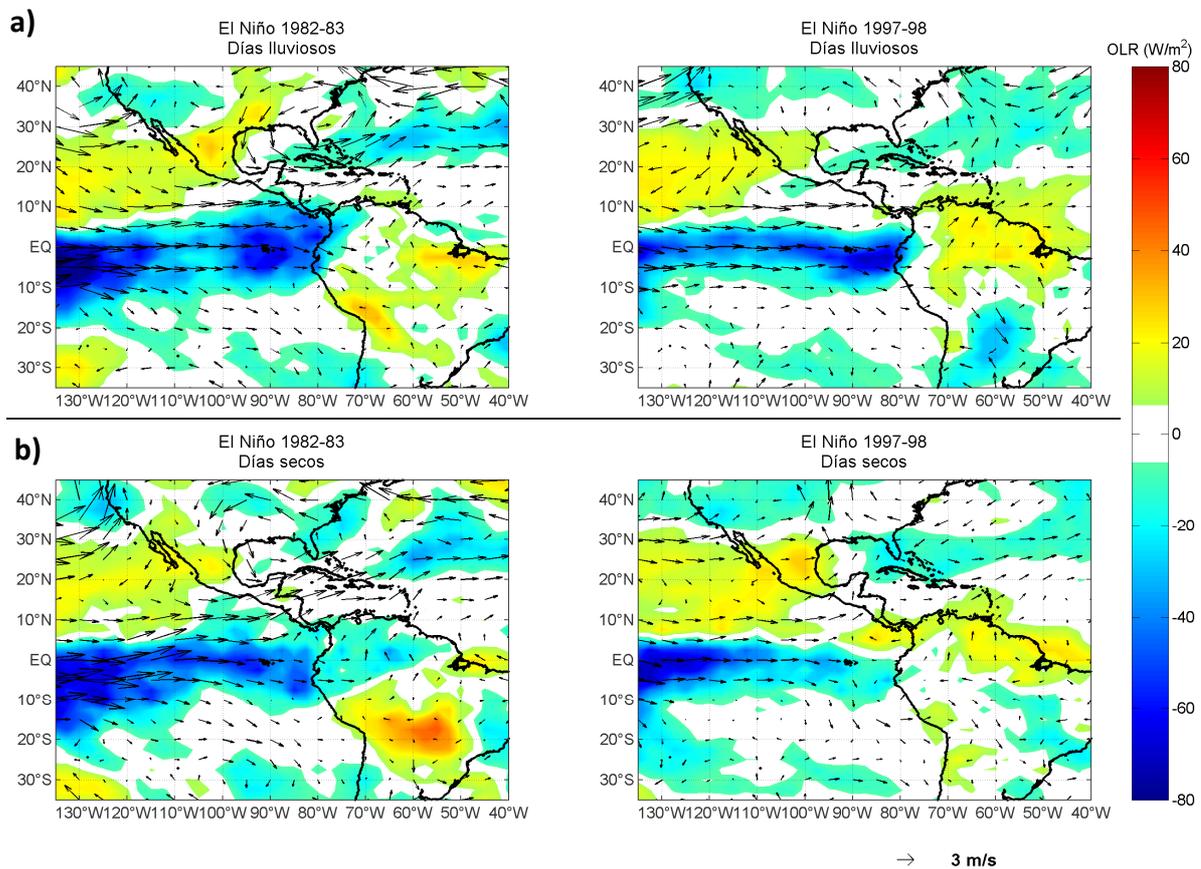
**Figura 66: Promedios de NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos (m/s) a 850 hPa y NOAA/OAR/ESRL composites de OLR ( $W/m^2$ ) durante El Niño 1982-83 y El Niño 1997-98 para: a) Días lluviosos y b) Días secos**

Durante los días lluviosos del evento El Niño de 1982-83 (Figura 66), se observa que los vientos alisios se dirigen de oeste a este entre los  $0^{\circ}$ - $5^{\circ}$ S y  $95^{\circ}$ W- $80^{\circ}$ W (cercano a la costa norte peruana). Asimismo, se observa vientos de gran magnitud que se dirigen desde Panamá, recorriendo la costa colombiana y ecuatoriana, hacia el noroeste de Tumbes. Esto representa una particularidad, dado que no es un aspecto de las condiciones promedio de los vientos a 850 hPa. Durante los días lluviosos del evento El Niño de 1997-98, se observa un comportamiento de los vientos similar al ocurrido durante los días lluviosos del evento El Niño 1982-83, para el cual se produce un ingreso de vientos del oeste hacia la costa norte peruana, mas no se observan vientos provenientes del norte. Asimismo, a lo largo del Pacífico Ecuatorial existe un debilitamiento de los vientos alisios en ambos eventos principalmente durante días lluviosos, siendo la magnitud del viento menor a la presentada según el promedio histórico (Figura 65).

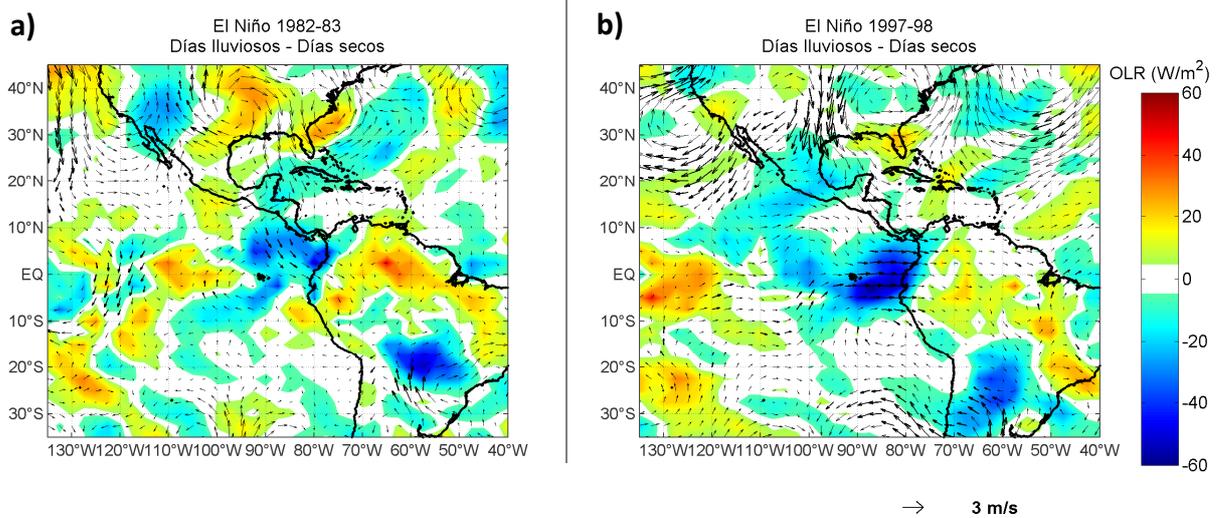
Durante los días secos del evento El Niño de 1982-83 (Figura 66), no se muestra el ingreso de vientos del norte, mientras que los vientos del oeste se presentan, aunque de menor

magnitud a la de los días lluviosos, a lo largo del ecuador entre los 100°W-80°W. Mientras que, durante los días secos del evento El Niño de 1997-98, se observa claramente que la dirección de los vientos a lo largo del Pacífico Tropical es muy similar a la del promedio histórico calculado.

Si se calculan las anomalías de OLR y vientos a 850hPa, considerando las condiciones promedio de dichas variables para enero a abril (meses que corresponden a los días lluviosos y secos) mostrada en la Figura 65, se obtiene que las anomalías de los vientos alisios ecuatoriales del oeste acompañan a las anomalías negativas de OLR (Figura 67). Este comportamiento se produce en la costa norte peruana durante días lluviosos en ambos eventos, mientras que, para los días secos estas anomalías son de menor magnitud.



**Figura 67: Anomalías (promedio de la circulación atmosférica durante días lluviosos o secos menos condiciones promedio Ene-Abr) de NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos (m/s) a 850 hPa y NOAA/OAR/ESRL composites de OLR ( $W/m^2$ ) durante El Niño 1982-83 y El Niño 1997-98: a) Días lluviosos y b) Días secos**



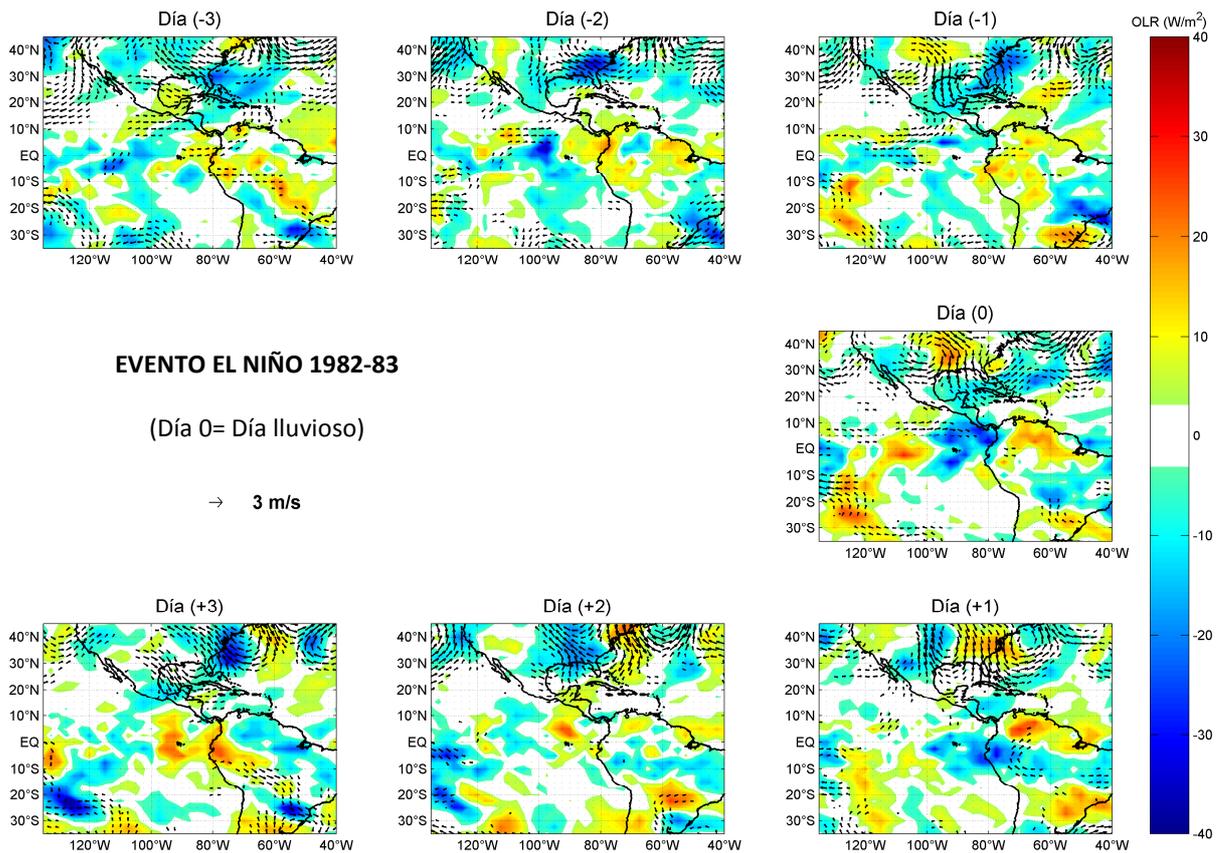
**Figura 68: Diferencias de la circulación atmosférica entre los días lluviosos y secos (Figura 66a - 66b) de NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos (m/s) a 850 hPa y NOAA/OAR/ESRL composites de OLR ( $W/m^2$ ) durante: a) Marzo-Abril 1983 y b) Enero-Marzo 1998.**

\*La diferencia de los vectores para el que al menos uno de sus componentes supere la prueba de t-student al 90% de nivel de significancia se muestra con mayor grosor.

De la diferencia de la circulación atmosférica entre los días lluviosos y secos durante el evento El Niño de 1982-83 (Figura 68-a), se observa que los vientos más significativos provienen del noroeste de la zona de estudio, entre los  $5^{\circ}S$  y  $10^{\circ}N$ . Durante el evento El Niño de 1997-98 (Figura 68-b), los vientos más significativos provienen del oeste y se ubican entre los  $80^{\circ}W$ - $90^{\circ}W$  y  $5^{\circ}N$ - $10^{\circ}S$ . Esta es una diferencia remarcable entre ambos eventos, respecto a la circulación atmosférica para la generación de días lluviosos y secos durante eventos extremos El Niño. Asimismo, se observa mayor actividad convectiva durante los días lluviosos para las regiones de Tumbes y Piura, siendo la diferencia de mayor magnitud para el evento El Niño de 1997-98 que para el evento de 1982-83. Por otro lado, en ambos eventos, se observa menor actividad convectiva en la Amazonía (noroeste de Brasil) durante los días lluviosos (Figura 68).

### **Análisis de la propagación de las perturbaciones atmosféricas**

Para una mejor observación de la propagación de las perturbaciones atmosféricas, se calcularon las anomalías para tres días antes y tres después de días lluvioso considerando el promedio de todo el periodo (Enero-Abril). De esta manera, se podrán observar las variaciones dentro de un evento El Niño. Se consideraron tres días antes y tres días después dado que la periodicidad promedio encontrada entre días lluviosos era de 7 días.

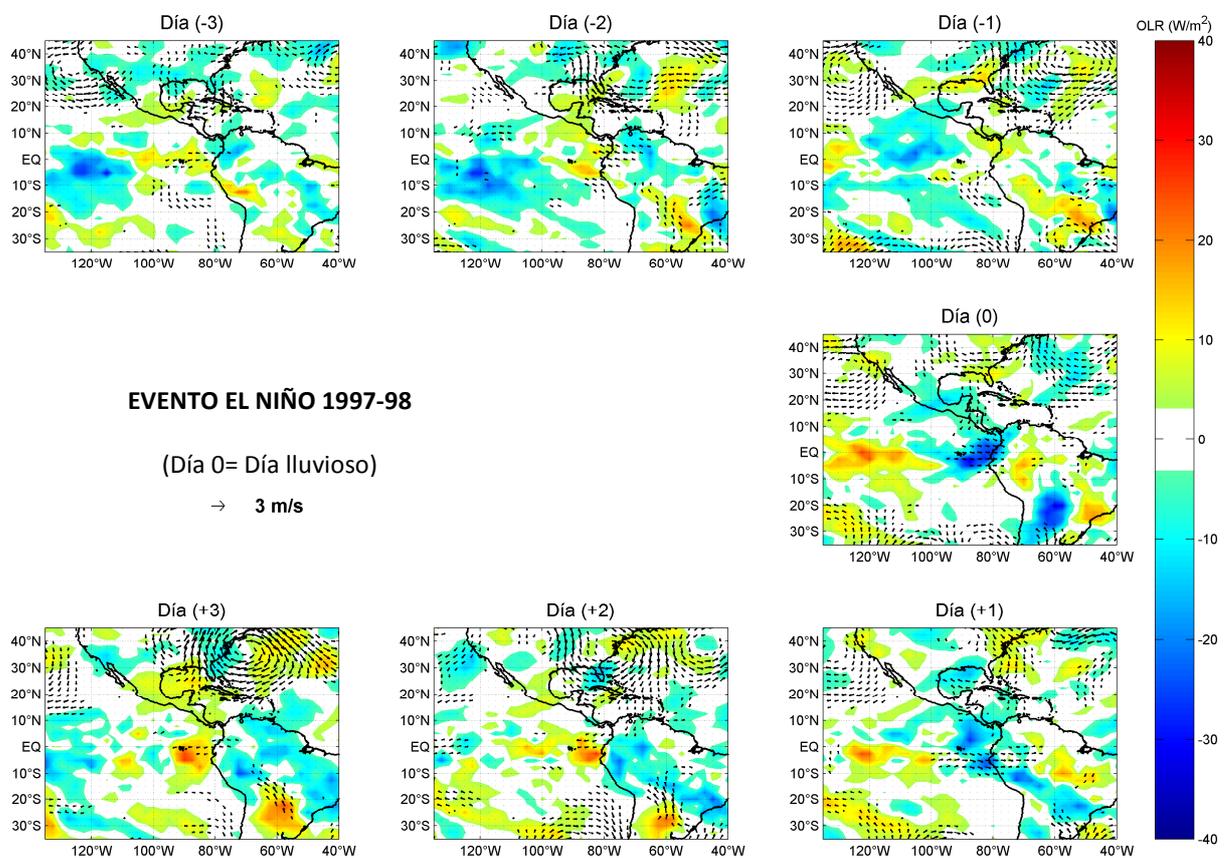


**Figura 69: Anomalías (promedio de la circulación atmosférica durante días lluviosos menos promedio del periodo Mar83-Abr83) de NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos a 850 hPa y NOAA/OAR/ESRL composites de OLR tres días antes y tres días después del día lluvioso (*día 0*)**

\*Se muestran los vientos que se encuentran en el rango de la media más la desviación estándar y la media menos la desviación estándar considerando las condiciones del día cero.

La propagación de las perturbaciones atmosféricas para los días  $t=-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ , durante los eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98, se muestran en la Figura 69 y 70, siendo el día lluvioso el *Día 0*. De dichas figuras, se observa una aproximación de la actividad convectiva del oeste hacia la costa norte del Perú en el Pacífico Tropical (entre los  $10^{\circ}\text{N}$  y  $10^{\circ}\text{S}$ ) durante ambos eventos El Niño; siendo la actividad convectiva mucho mayor para el día lluvioso (*Día 0*) y presentándose una disminución de la actividad convectiva (anomalías positivas de OLR) para el *Día+2* y *Día+3* para la zona de estudio. No obstante, para el evento El Niño 1982-83 (Figura 69), la actividad convectiva tres días después del día lluvioso se presenta regionalmente no solo para la costa norte peruana, sino para todo el norte y parte central del Perú, Ecuador y el noroeste de Brasil.

Durante el evento El Niño 1982-83 (Figura 69), se observa que la propagación de la actividad convectiva está acompañada de anomalías de vientos del noroeste principalmente en la región de 10°N-0° y 90°W-85°W, los cuales son significativos para el *Día 0*. Asimismo, en la región de los 10°N-0° y 110°W-90°W se observan anomalías de viento solamente del oeste para el día lluvioso. Sin embargo, en el día posterior *Día+1*, dichas anomalías dejan de ser significativas. Mientras que, durante El Niño 1997-98 (Figura 70), el comportamiento es diferente donde se observa claramente las anomalías de vientos del oeste en la región de los 5°N-5°S y 85°W-75°W sobre la costa norte peruana, las cuales se mantienen en el día posterior expandiéndose en la región de los 0°-5°S y 100°W-70°W.

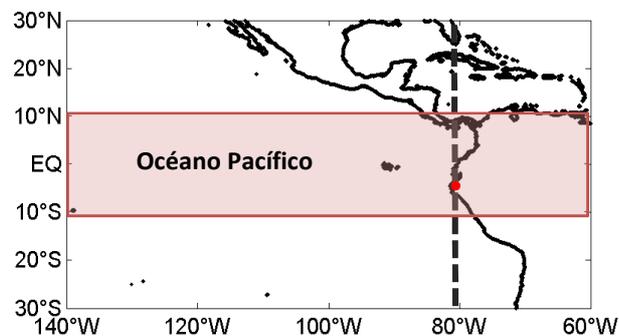


**Figura 70: Anomalías (promedio de la circulación atmosférica durante días lluviosos menos promedio del periodo Ene98-Mar98) de NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos a 850 hPa y NOAA/OAR/ESRL composites de OLR tres días antes y tres días después del día lluvioso (*día 0*)**

\*Se muestran los vientos que se encuentran en el rango de la media más la desviación estándar y la media menos la desviación estándar considerando las condiciones del día cero.

Posteriormente, se promediaron los valores de las anomalías de OLR y vientos zonales (este-oeste) para la región entre los 10°N y 10°S entre los 140°W y 60°W del Océano Pacífico (sombreado en la Figura 71). Asimismo, se calcularon las anomalías porcentuales

de la precipitación tres días antes y tres días después del día lluvioso. Estos resultados se muestran en la Figura 72 y 73 para los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98, respectivamente. De estos resultados es más evidente la aproximación de la actividad convectiva a lo largo del Pacífico Ecuatorial Central (anomalías negativas de OLR, color azul) tres días antes del día lluvioso (*Día -3*) hacia la costa norte peruana ( $80^{\circ}\text{W}$ ) en el día lluvioso (*Día 0*), persistiendo incluso en el día posterior (*Día +1*) y desapareciendo en el *Día +2*. Esto desata abundante precipitación en la costa norte peruana principalmente en el día considerado como lluvioso (anomalías porcentuales mayores al 250 por ciento, Figura 72-b y Figura 73-b). Durante los días previos y posteriores al día lluvioso, se observan anomalías porcentuales de precipitación negativa en la mayoría de estaciones analizadas, indicativo de escasa precipitación (Figura 72-b y Figura 73-b).

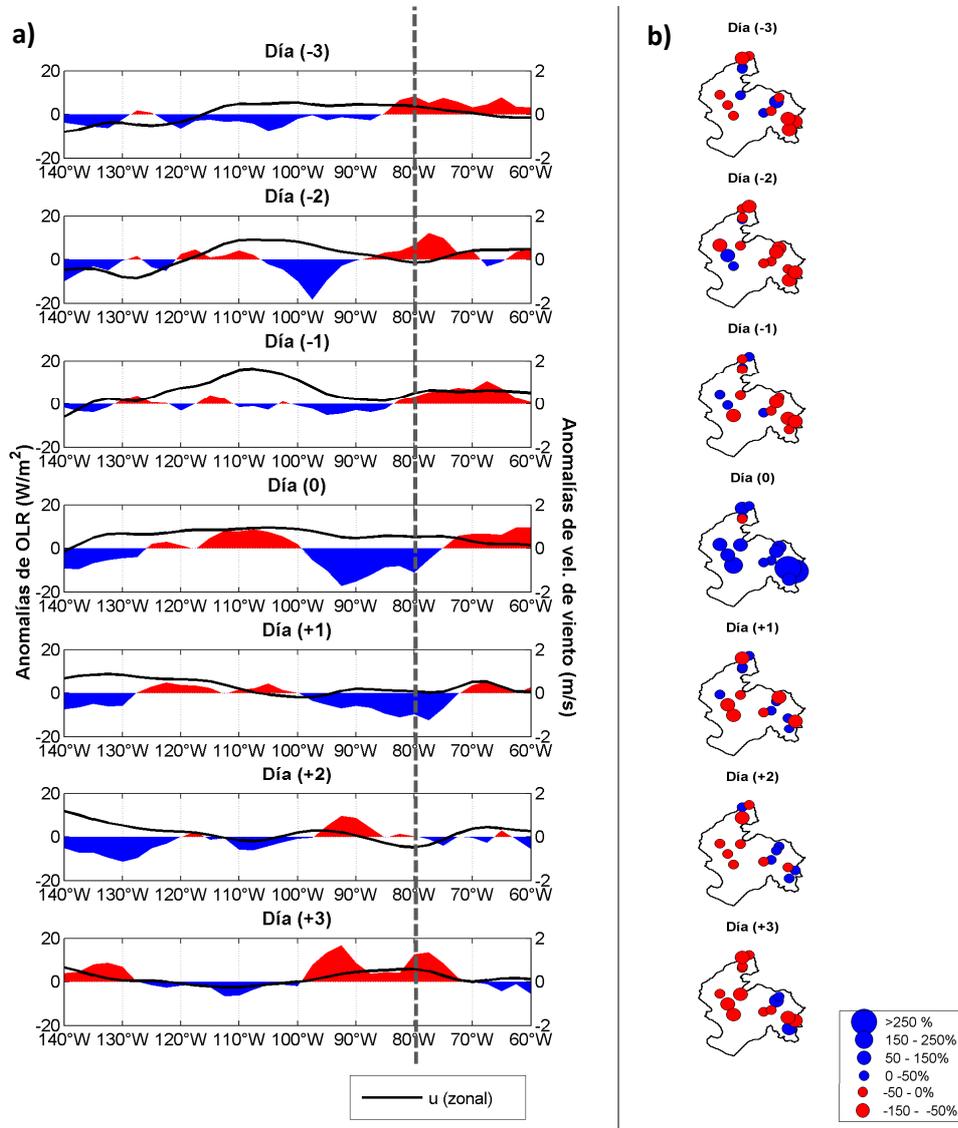


**Figura 71: Mapa de referencia de ubicación de la costa norte peruana ( $80^{\circ}\text{W}$ ) y región del Océano Pacífico comprendida entre los  $10^{\circ}\text{N}$ - $10^{\circ}\text{S}$**

Para el evento El Niño 1982-83 (Figura 72-a), la aproximación de la actividad convectiva es mucho más rápida que para el evento El Niño 1997-98 (Figura 73-a). Para el evento de 1997-98, estas anomalías negativas de OLR (color azul) se observan claramente tres días antes del día lluvioso (*Día -3*) desde los  $140^{\circ}\text{W}$  y progresivamente la actividad convectiva se acerca a la zona de estudio ( $80^{\circ}\text{W}$ ) hacia el *Día 0*. Mientras que para el evento de 1982-83, la anomalía no presenta un valor muy elevado tres días antes, siendo más claro para el *Día -2* ( $100^{\circ}\text{W}$ ). Luego desaparece (*Día -1*) y reaparece abruptamente durante el día lluvioso (*Día 0*).

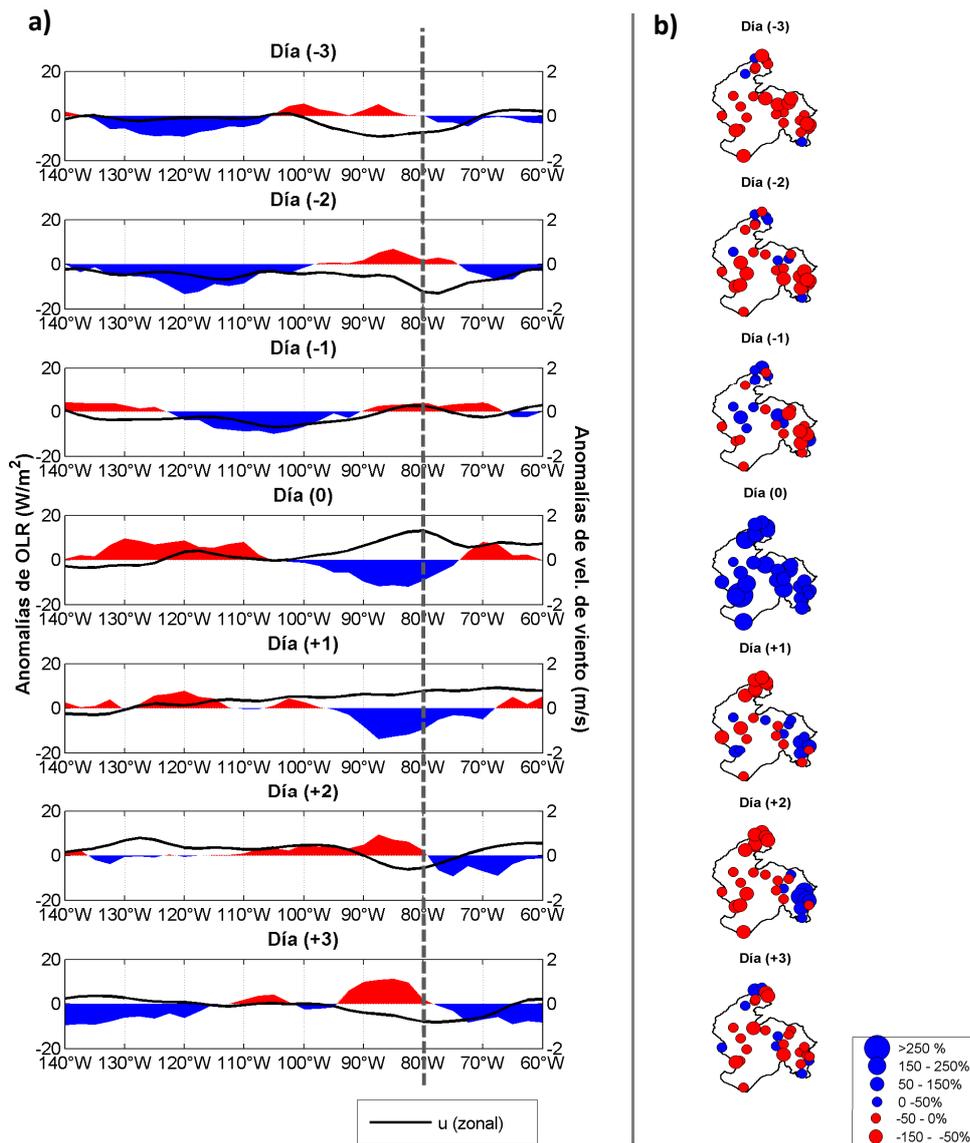
Asimismo, se observan anomalías positivas de vientos zonales (hacia el este) para el evento de 1982-83 (Figura 72-a), las cuales aparentemente propagan la actividad convectiva. Sin embargo, el rol de los vientos zonales no es muy claro para el evento de 1997-98 donde solo se aprecia una anomalía positiva de viento zonal en los  $80^{\circ}\text{W}$  para el

día lluvioso (*Día 0*). Por tanto, las anomalías de vientos del oeste son un factor importante para la generación de lluvias muy intensas en la costa norte peruana.



**Figura 72: Anomalías (promedio de la circulación atmosférica durante días lluviosos menos promedio del periodo Mar83-Abr83) tres días antes y tres días después del día lluvioso (día 0) entre los 10°N-10°S para el evento El Niño 1982-83 de: a) NOAA/OAR/ESRL composites de OLR y NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos zonales y b) Precipitación observada (anomalías porcentuales)**

\*Las anomalías negativas se presentan de color azul y las anomalías positivas de color rojo, las anomalías del viento zonal mediante una línea negra. Las anomalías de precipitación son representadas mediante círculos azules (anomalías positivas) y círculos rojos (anomalías negativas). Se ha colocado una línea punteada de referencia a los 80°W (costa norte peruana).



**Figura 73: Anomalías (promedio de la circulación atmosférica durante días lluviosos menos promedio del periodo Ene98-Mar98) tres días antes y tres días después del día lluvioso (día 0) entre los 10°N-10°S para el evento El Niño 1997-98 de: a) NOAA/OAR/ESRL composites de OLR y NCEP/NCAR Reanalysis composites de vientos zonales y b) Precipitación observada (anomalías porcentuales)**

\*Las anomalías negativas se presentan de color azul y las anomalías positivas de color rojo, las anomalías del viento zonal mediante una línea negra. Las anomalías de precipitación son representadas mediante círculos azules (anomalías positivas) y círculos rojos (anomalías negativas). Se ha colocado una línea punteada de referencia a los 80°W (costa norte peruana).

Respecto a la distribución día a día de la precipitación (Figura 72-b y 73-b), se observa que antes del día lluvioso (*Día -1*) se inicia la precipitación en la planicie costera, en el día lluvioso (*Día 0*) se desata la precipitación en toda la región de estudio y en los días

posteriores (*Día +1* y *Día +2*) la precipitación ocurre principalmente en la parte alta (Alto Piura). Esto se observa con mayor claridad, dada la mayor densidad de estaciones meteorológicas, durante el evento El Niño 1997-98.

Estos patrones de circulación atmosférica son congruentes con la literatura, donde ampliamente se conoce que durante un evento El Niño se produce un debilitamiento estacional de la Circulación de Walker invirtiendo el sentido de los vientos alisios ecuatoriales (este-oeste). Asimismo, estos resultados complementarían y reforzarían la hipótesis propuesta en Takahashi (2004), donde se analizó un solo caso (evento El Niño de 1997-98) y, según la cual, el flujo de vientos provenientes del oeste en la tropósfera baja en la costa norte peruana estaría relacionado a ondas convectivas ecuatoriales Kelvin y Rossby. No obstante, existen diferencias entre ambos eventos El Niño para el desencadenamiento de lluvias extremas, tanto a nivel espacial como temporal.

## V. CONCLUSIONES

Las conclusiones serán abordadas según los objetivos específicos planteados:

### **Objetivo Específico 1: Explicar la variabilidad interanual de la precipitación en la costa norte del Perú durante el periodo 1963/64-2008/09.**

Se identificaron dos regiones climáticas de variabilidad interanual de precipitación. La primera se caracteriza por ser una zona de clima desértico y presentar estaciones ubicadas en la región Tumbes y cuenca baja de Piura (menor o igual a 500 msnm), mientras que la segunda región climática presenta estaciones ubicadas en la cuenca alta de Piura (por encima de 1000 msnm). La variabilidad interanual de la precipitación de la primera región climática está fuertemente modulada por los eventos extraordinarios El Niño de 1982-83 y 1997-98 donde se producen las precipitaciones más extremas de la región (superando los percentiles 95 y 99). Por el contrario, esto no ocurre en la segunda región climática donde, si bien se observa en algunas estaciones un aumento de las lluvias durante estos dos eventos El Niño extraordinarios, éstos también son comparables con otros años como el evento La Niña de 1998/99 donde se produjo un enfriamiento de la región Niño 3.4 (Pacífico central).

Del estudio de la variabilidad interanual de los índices de precipitación, donde preliminarmente se vincularon los años atípicos con la relación de eventos El Niño y La Niña costeros clasificados mediante el Índice Costero El Niño – ICEN, se evidencia que no es suficiente analizar una sola región del Pacífico Ecuatorial para explicar la totalidad de la variabilidad interanual de la precipitación. Por lo tanto, el uso de los índices E y C de Takahashi et al. (2011) permitió distinguir la influencia de los diferentes tipos de El Niño en la variabilidad interanual de la precipitación de la costa norte peruana.

El calentamiento del Pacífico Este (eventos El Niño) durante diciembre a marzo (DEFM), genera un incremento de la precipitación total anual, precipitaciones extremas y frecuencia de días húmedos, principalmente en la primera región climática (menor a 500 msnm). No obstante, para algunas estaciones de la segunda región climática (ubicadas a más de 1000 msnm) también son relevantes las anomalías de temperatura superficial del mar en el Pacífico Este. Mientras que, para el periodo de DEFM, el enfriamiento del Pacífico Central (eventos La Niña) provoca un aumento en la frecuencia de días húmedos y la magnitud de la precipitación total anual sólo en la segunda región climática.

El índice E tiene una mejor correlación positiva con la mayoría de índices anuales de precipitación (índices sobre la intensidad de la precipitación total anual, intensidad de precipitaciones extremas y frecuencia de periodos húmedos) en casi toda la costa norte peruana. El índice C presentó una mejor correlación negativa en la parte alta de la región Piura; sin embargo, solo para algunos índices de precipitación (Precipitación total anual de los días húmedos - *PRCPTOT*, Días en el año donde la precipitación diaria es mayor a 10 mm - *R10* y Máximo número de días húmedos consecutivos - *CWD*). Estos resultados sugieren que aún no es posible explicar la totalidad de la variabilidad pluviométrica de la región andina de la costa norte peruana (pendiente oeste de los Andes) únicamente con índices del Pacífico.

### **Objetivo Específico 2: Determinar la relación entre la variabilidad diaria de la precipitación y los caudales durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98.**

Los caudales medios diarios durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98 de la región Tumbes (río Tumbes) y la región Piura (ríos Chira y Piura), presentan una alta variabilidad propia de cada región. Del análisis estadístico de la relación precipitación-escorrentía para ambas regiones, se concluye que existe un tiempo de respuesta (desfase entre lluvias y escorrentía) de 1 día durante estos eventos extremos El Niño. Esto permitió la correlación de los índices de caudales por región con los modos de variabilidad de la precipitación diaria; sin embargo, las correlaciones fueron modestas. Asimismo, cuando se realizó el análisis del comportamiento de los caudales durante los días seleccionados como lluviosos y secos, no se encontró una buena relación entre las precipitaciones más intensas y los caudales más extremos durante los eventos El Niño analizados. Sin embargo, en la cuenca Piura donde la precipitación se encuentra mejor monitoreada, la estación hidrométrica

Ñacara (río Piura) presenta una mayor correlación ( $r \geq 0.54$ ) con la estación meteorológica Huarmaca (aguas arriba) durante ambos eventos extremos El Niño.

### **Objetivo Específico 3: Determinar la relación entre la ocurrencia de días lluviosos y secos y la circulación atmosférica durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98**

La precipitación diaria en las regiones de Tumbes y Piura durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98, presentó una alta variabilidad con días lluviosos y secos. Se determinó que las anomalías de los vientos provenientes del noroeste (El Niño de 1982-83) y del oeste (El Niño de 1997-98) son importantes en la generación de días lluviosos en la costa norte peruana. Sin embargo, luego de realizar un análisis de la propagación de estas anomalías tres días antes y tres días después del día lluvioso, se corroboró que los vientos del oeste son los que propician la convección y por tanto, la precipitación intensa en la zona de estudio. Para el evento de 1997-98, la propagación de las anomalías de vientos no se presentó en los días previos al día lluvioso tal como se presentó en las anomalías de OLR. Para el evento El Niño 1982-83, también se observa claramente una aproximación de la actividad convectiva (anomalías negativas de OLR) a lo largo del Pacífico Ecuatorial Central hacia la costa norperuana, la cual genera las precipitaciones más intensas en el día considerado como lluvioso y precipitaciones menos abundantes en los tres días previos y tres posteriores. Esta propagación se produjo de manera mucho más rápida durante el evento El Niño 1982-83, mientras que en el evento 1997-98 la actividad convectiva se desplaza casi uniformemente hacia las regiones de Tumbes y Piura (desde los  $140^{\circ}\text{W}$  hacia los  $80^{\circ}\text{W}$ ). Los resultados encontrados en la presente investigación podrían servir como bases para la previsión de lluvias intensas asociadas a eventos El Niño extraordinarios en la costa norte del Perú.

## VI. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación proponen nuevas perspectivas de investigación y recomendaciones que son detalladas a continuación:

- Analizar otros índices climáticos para explicar la variabilidad interanual de la precipitación en la región andina de la costa norte peruana. Recientes estudios sugieren que existen otros factores climáticos (no necesariamente en el Pacífico) como la temperatura superficial del mar en el Atlántico Tropical, que pueden explicar la variabilidad de las lluvias en la región andina (e.g. Espinoza et al., 2009; Espinoza et al., 2011; Lavado et al., 2012; Lavado y Espinoza, 2013).
- Realizar un análisis más profundo de la relación precipitación-escorrentía a escala horaria durante los eventos El Niño 1982-82 y 1997-98, considerando otros factores importantes durante el ciclo hidrológico, como la humedad del suelo. También sería importante enriquecer la información pluviométrica con información ecuatoriana del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador). En particular, sería de utilidad utilizar un modelo hidrológico distribuido que permita describir el movimiento del agua a través del espacio, reproduciendo las características observadas durante los eventos extremos El Niño para conocer lo que ocurriría en las regiones de Tumbes y Piura respecto a zonas de inundación, volumen colmatado en los reservorios de la zona, impactos en la agricultura, etc.
- Realizar un análisis de los vientos a diferentes niveles de presión, así como el perfil vertical del viento, el transporte de humedad, etc, durante los días lluviosos y secos definidos en la presente investigación. Se puede emplear otras bases de datos para la información de vientos, por ejemplo, del conjunto de datos Era-Interim Reanalysis del Centro Europeo para la Predicción del Tiempo a Plazo Medio (ECMWF por sus siglas en inglés).

- Continuar con el análisis de la variabilidad diaria de la precipitación durante otros eventos El Niño y La Niña, con el fin de encontrar y caracterizar los patrones de circulación atmosférica asociados a precipitaciones extremas durante otros tipos de eventos El Niño (Modoki o Canónico) en otras regiones del Perú.
- Analizar si los patrones encontrados durante eventos El Niño extraordinarios (u otro tipo de eventos) son simulados por Modelos de Circulación Global Atmosféricos bajo escenarios de cambio climático (NCAR- Community Atmospheric Model).

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdi, H. 2003. Factor Rotation in Factor Analyses. The University of Texas at Dallas. En M. Lewis-Beck, A. Bryman, T. Futing (Eds): Encyclopedia for research methods for the social sciences. Thousand Oaks (CA): Sage. p. 978-982.
2. Ahrens, C. D. 2014. Essentials of Meteorology: An invitation to the atmosphere. 7ma Ed. Cengage Learning, USA. 492 p.
3. Ashok, K., Behera, S. K., Rao S. A., Weng, H. y Yamagata, T. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.*, 112. 78 p.
4. Barnston, A. G., Chelliah, M., Goldenberg, S. B. 1997. Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial Pacific: Research note. *Atmosphere-Ocean*, 35(3): 367-383.
5. Bayer, A., Danysh, H., Garvich, M., González G., Checkley, W., Álvarez, M., Gilman, R. H. 2008. An unforgettable event: a qualitative study of the 1997-98 El Niño in northern Peru. *Disasters*, 38(2): 351-374.
6. Bjerkness, J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 7(3): 163-172.
7. Bridgman, H. A. y Oliver J. E. 2006. *The Global Climate System: Patterns, Processes, and Teleconnections*. Cambridge University Press. Reino Unido. 331 p.
8. Brunet-Moret. 1979. Homogénéisation des précipitations. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, 26(3): 147- 170.
9. CAF (Corporación Andina de Fomento). 2000. *El Fenómeno El Niño 1997-98. Memoria, retos y soluciones*. Vol. 5: Perú. 304 p.
10. Cane, M. A. 1983. Oceanographic events during El Niño. *Science*, 222(4629): 1189-1195.
11. Carranza, L. 1891. Contra-corriente marítima, observada en Paita y Pacasmayo, *Bol. Soc. Geogr. Lima*, 1(9): 344-345.
12. Carrillo, C. N. 1892. Hidrografía oceánica, *Bol. Soc. Geogr. Lima*, 2: 72-110.
13. Casas C., M. y Alarcón J., M. 1999. *Meteorología y clima*. Universidad Politécnica de Catalunya. 1era Ed. Edicions UPC. Barcelona. 155 p.

14. CPNTC-IGP (Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima - Instituto Geofísico del Perú). 2014. Base de datos de los índices E y C. Consultado el 10 de enero del 2014. Disponible en: <http://www.met.igp.gob.pe/datos/EC.txt>
15. Cuadras, C. M. 2014. Nuevos métodos de Análisis Multivariante. CMC Editions. Barcelona, España. 304 p.
16. Dinse, K. 2011. Climate Variability and Climate Change. What is the difference? Michigan Sea Grant Climate Change Fact Sheet Series, Estados Unidos. Consultado el 2 de septiembre del 2013. Disponible en: <http://www.mseagrant.umich.edu/downloads/climate/11-703-Climatic-Variability-and-Climatic-Change.pdf>.
17. Douglas, M. W., Mejia, J., Ordinola, N., Boustead, J. 2009. Synoptic Variability of Rainfall and Cloudiness along the Coasts of Northern Peru and Ecuador during the 1997/98 El Niño event. *Monthly Weather Review*, 137: 116-136.
18. Eguiguren, V. 1984. Las lluvias en Piura. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*. Lima, p. 241-258.
19. ENFEN (Estudio Nacional del Fenómeno El Niño). 2012. Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú. Nota Técnica. 3 p.
20. Espinoza, J. C. 2005. Manual escrito con motivo del curso taller: Utilización del método del Vector Regional con HYDRACCESS. SENAMHI-Perú. Colaboración de Philippe Vauchel (IRD-Perú) y Josyane Ronchail (UP7-LOCEAN, Paris). 9 p.
21. Espinoza, J. C. 2009. Impact de la variabilité climatique sur l'hydrologie du bassin amazonien. Tesis de doctorado. Université Paris 6- Pierre et Marie Curie. 203 p.
22. Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot J.L., Junquas C., Vauchel P., Lavado W.S., Drapeau G., Pombosa R. 2011. Climate variability and extremes drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophys. Res. Lett.*, DOI:10.1029/ 2011GL047862.
23. Espinoza, J. C. , J. Ronchail, J. Guyot, C. Junquas, G. Drapeau, J. Martinez, W. Santini, P. Vauchel, W. Lavado, J. Ordoñez, y R. Espinoza, 2012. From drought to flooding: understanding the abrupt 2010-2011 hydrological annual cycle in the Amazonas River and tributaries, *Environmental Research Letters*, 7 024008, doi:10.1088/1748-9326/7/2/024008.
24. Espinoza J. C., Ronchail J., Frappart F., Lavado W., Santini W., Guyot J. L. 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*, doi: 10.1175/JHM-D-12-0100.1.
25. Glantz, M. H. 2001. *Currents of Change: Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society*. 2da Ed. Cambridge University Press. Reino Unido. 253 p.
  26. Godfrey, J. S., Johnson, G. C., McPhaden, M. J., Reverdin, G., Wijffels, S. 2001. The Tropical Ocean Circulation. Subcapítulo del libro “Ocean circulation and Climate: Observing and Modelling the Global Ocean”. Academic Press, International Geophysics Series, p. 215-246.
  27. Haylock, M. R., Peterson, T. C., Alves, L. M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y. M. T., Baez, J., Barros, V. R., Berlato, M. A., Bidegain, M., Coronel, G., Corradi, V., Garcia, V. J., Grimm, A. M., Karoly, D., Marengo, J. A., Marino, M. B., Moncunill, D. F., Nechet, D., Quintana, J., Rebello, E., Rusticucci, M., Santos, J. L., Trebejo, I. & Vincent, L. A. 2006. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, 19: 1490-1512.
  28. Hewitt, C. N. y Jackson, A. V. 2009. *Atmospheric Science for Environmental Scientists*. Willey-Blackwell, USA. 300 p.
  29. Hiez, G. 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, 14(2).
  30. Horel, J. D. y Cornejo-Garrido, A. G. 1986. Convection along the coast of northern Peru during 1983: Spatial and temporal variation of clouds and rainfall”. *Monthly Weather Review*, 114: 2091–2105.
  31. IMARPE (Instituto del Mar del Perú). 1999. El Fenómeno de El Niño. Artículo del compendio de investigaciones del Programa de Investigación Académica: “Perú et El Niño”, p. 13-27.
  32. INEI/DNCN (Instituto Nacional de Estadística e Informática /Dirección Nacional de Cuentas Nacionales). 2013. Base de datos INEI- Información económica (en línea). Perú. Consultado el 10 de enero del 2014. Disponible en: <http://iinei.inei.gob.pe/iinei/siemweb>.
  33. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza, 104 p.
  34. Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins,

- W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., and Joseph, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
35. Lagos P., Silva, Y., Nickl, E., y Mosquera, K. 2008. El Niño - related precipitation variability in Perú. *Advances in Geosciences*, 14: 231-237.
  36. Lavado, W. S., Silvestre E., Pulache, W. 2010. Tendencias en los extremos de lluvias cerca a la ciudad del Cusco y su relación con las inundaciones de enero del 2010. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA(2)*: 89-98.
  37. Lavado, W. S. 2012. Apuntes de clases del curso “Métodos Estadísticos en Hidrología”. Escuela de Post-Grado, UNALM.
  38. Lavado, W. S. y Espinoza, J. C. 2014. Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2): 171-182.
  39. Liebmann, B. y Smith, C. A. 1996. Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77: 1275-1277.
  40. Lorenz, Edward N. 1956. *Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction*. Massachusetts Institute of Technology Department of Meteorology. Cambridge, Massachusetts. 52 p.
  41. MEF (Ministerio de Economía y Finanzas). 1999. Estudio Hidrológico-Meteorológico en la Vertiente del Pacífico del Perú con fines de evaluación y pronóstico del fenómeno El Niño para prevención y mitigación de desastres. Estudio ejecutado por la Asociación BCEOM-SOFI CONSULT S.A – ORSTOM. Vol. 1, 201 p.
  42. MEF (Ministerio de Economía y Finanzas). 2014. Marco Macroeconómico Multianual 2015-2017. Lima, Perú. 97 p.
  43. Mikami, T. 1988. Precipitation in northern Peru during the 1982–1983 El Niño: Variations in daily precipitation patterns. *Tropical Rainfall Measurements*, editado por: Theon, J. S. and Fugono, N., Deepak Publishing, p. 147–150.
  44. Morales, P. 2013. *El Análisis Factorial en la construcción e interpretación de tests, escalas y cuestionarios*. Universidad Pontificia Comillas, Madrid. Consultado el 15 de septiembre del 2013. Disponible en: <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/AnalisisFactorial.pdf>
  45. Mosquera, K. 2014. Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico. *Boletín mensual “Generación de modelos climáticos para*

- el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”, Enero, Instituto Geofísico del Perú, 1(1): 4-7.
46. Murphy, R. C. 1926. Oceanic and climatic phenomena along the west coast of South America during 1925. *Geographical Review*, 16(1): 26-54.
  47. NCEP/NCAR-NOAA (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research - Oceanic and Atmospheric Administration). 2014. Base de datos de vientos de NCEP/NCAR Reanalysis. Consultado el 1 de febrero del 2014. Disponible en: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html>
  48. NOAA/OAR/ESRL (National Oceanic and Atmospheric Administration/ Oceanic and Atmospheric Research/ Earth System Research Laboratory). 2014. Base de datos de OLR interpolada de la NOAA (en línea). Consultado el 1 de febrero del 2014. Disponible en: [http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.interp\\_OLR.html](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.interp_OLR.html)
  49. Norris, J. 2001. EOF tutorial. Notes on the course Interannual to interdecadal extratropical coupled atmosphere–ocean variability. Universidad de California, San Diego. Consultado el 26 de septiembre del 2013. Disponible en: [http://meteora.ucsd.edu/~jnorris/sio209.sp01/EOF\\_tutorial.pdf](http://meteora.ucsd.edu/~jnorris/sio209.sp01/EOF_tutorial.pdf)
  50. Open Unniversity. 2001. *Ocean Circulation*. 2da Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford. 270 p.
  51. OPS (Organización Panamericana de la Salud). 2000. *Crónica de desastres: Fenómeno El Niño, 1997-98*. Washington D.C. 290 p.
  52. Ordinola, N., Douglas, M., Yauri, H., y Flores, L. 2001. Distribución de lluvias en el norte del Perú y sur de Ecuador durante el episodio El Niño 1997-1998. Documento no publicado. 24 p.
  53. Palacios E., J. 2009. Procesos físicos asociados a lluvias intensas en la costa norte durante El Niño y efectos del cambio climático. Compendio de trabajos de investigación realizados por estudiantes durante el año 2009. IGP, p. 63-69.
  54. Pearson, K. 1901. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine*, 2:559-572.
  55. Peixóto, J. P. y Oort, A. H. 1992. *Physics of climate*. American Institute of Physics, New York. 67 p.
  56. Philander, S. G. 1983. El Niño Southern Oscillation phenomena. *Nature*, 302: 295-301.

57. Rocha F., A. 2013. Meganiños de la costa norperuana en los últimos cinco siglos. Revista oficial del Colegio de Ingenieros del Perú. Ed. 11. 3 p.
58. Rasmusson, E. M. y Carpenter, T. H. 1982. Variations in tropical sea surface temperatura and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. Mon. Wea. Rev, 110: 354-384.
59. Salvador F., M; Gargallo, P. 2003. Análisis exploratorio de datos (en línea). Zaragoza, Universidad de Zaragoza. Consultado el 15 de agosto del 2013. Disponible en: <http://www.5campus.com/leccion/aed>
60. Sarachick, E. y Cane, M. A. 2010. The El Niño-Southern Oscillation Phenomenon. Cambridge University Press. Reino Unido. 369 p.
61. Searcy, J. K. y Hardison, C. H. 1960. Double-Mass Curves (en línea). Manual of Hydrology: Part 1. General Surface-Water Techniques. Washington, D.C., U.S. Consultado el 30 de agosto del 2013. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/wsp/1541b/report.pdf>.
62. SENAMHI. 1988. Mapa de Clasificación Climática del Perú. Método de Thornthwaite. Eds. Senamhi Perú, 14 pp.
63. Shlens, J. 2005. A tutorial on Principal Component Analysis. Systems Institute for Nonlinear Science, Unniversity of California. EE.UU. 13 p.
64. Simmons, A. J. y Hollingsworth A. 2002. Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction. Q. J. R. Meteorol. Soc, 128: 647-677.
65. Spearman, C. 1904. General intelligence objectively determined and measured. The American J. of Psychology, 15(2): 201-292.
66. Takahashi, K. 2004. The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru during 1997-1998 and 2002 El Niño events. Annales Geophysicae, 22: 3917–3926.
67. Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., Dewitte, B. 2011. ENSO Regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. Geophysical Research Letters, 38, L10704, doi: 10.1029/2011GL047364.
68. Takahashi, K. 2014. Variedades El Niño. Boletín Mensual “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”. Instituto Geofísico del Perú, 1(2): 4-7.
69. Trenberth, K. 1997. The definition of El Niño. American Meteorological Society, 78(12): 2771-2777.

70. Trenberth, K. y Stepaniak, D. 2000. Indices of El Niño evolution. *Journal of Climate*, 14: 1967-1701.
71. Tukey, W.J. 1977. *Exploratory data analysis*. United States of America, Addison Wesley.
72. Venegas, S. A. 2001. *Statistical Methods for Signal Detection in Climate*. Danish Center for Earth System Science (DCESS), Niels Bohr Institute for Astronomy, Physics and Geophysics, University of Copenhagen, Denmark. DCESS Report #2. 96 p.
73. Walker, G.T. 1928. World Weather. *Monthly Weather Review*, 56: 167-170.
74. Weng, H., Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Yamagata, T. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dynamics*, 29: 113-129.
75. Wilks, D. S. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2da Ed. International Geophysics Series. Estados Unidos. 649 p.
76. Woodman, R. 1999. Modelo Estadístico de Pronóstico de las Precipitaciones en la Costa Norte del Perú. IGP. 12 p.
77. Wyrtki, K. 1982. The Southern Oscillation, ocean-atmosphere interaction and El Niño. *Mar. Technol. Soc. J.* 16: 3-10.
78. Yeh, S.-W., Kug J.-S., Dewitte B., Kwon M.-H., Kirtman B., Jin, F.-F. 2009. El Niño in a changing climate. *Nature*, 461: 511-514.
79. Zang, X. y Yang F. 2004. RCLimDex(1.0). Manual del Usuario (en línea). Versión en español del Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno El Niño (CIIFN). Climate Research Branch Environment Canada. Consultado el: 14 de octubre del 2013. Disponible en: <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>.

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Lista de eventos El Niño y La Niña en la costa del Perú según Índice Costero El Niño (ICEN)

**Tabla 8:** Lista de eventos El Niño en la costa del Perú

<b>Año inicial</b>	<b>Mes inicial</b>	<b>Año final</b>	<b>Mes final</b>	<b>Duración (meses)</b>	<b>Magnitud</b>
1951	5	1951	10	6	Moderado
1953	3	1953	6	4	Débil
1957	3	1958	5	15	Moderado
1965	3	1965	10	8	Moderado
1969	4	1969	7	4	Moderado
1972	3	1973	2	12	Fuerte
1976	5	1976	10	6	Débil
1982	7	1983	11	17	Extraordinario
1986	12	1987	12	13	Moderado
1991	10	1992	6	9	Moderado
1993	3	1993	9	7	Débil
1994	11	1995	1	3	Débil
1997	3	1998	9	19	Extraordinario
2002	3	2002	5	3	Débil
2002	9	2003	1	5	Débil
2003	11	2004	1	3	Débil
2004	10	2004	12	3	Débil
2006	8	2007	2	7	Moderado
2008	7	2008	9	3	Débil
2009	5	2009	10	6	Débil

FUENTE: ENFEN, 2012.

**Tabla 9:** Lista de eventos La Niña en la costa del Perú

<b>Año inicial</b>	<b>Mes inicial</b>	<b>Año final</b>	<b>Mes final</b>	<b>Duración (meses)</b>	<b>Magnitud</b>
1950	2	1950	12	11	Fuerte
1952	8	1952	10	3	Débil
1954	1	1956	2	26	Fuerte
1956	9	1956	12	4	Moderado
1960	5	1960	7	3	Débil
1961	6	1961	10	5	Débil
1962	2	1962	8	7	Fuerte
1964	3	1964	11	9	Fuerte
1966	4	1966	7	4	Moderado
1967	7	1968	6	12	Fuerte
1970	4	1971	11	20	Fuerte
1973	5	1974	2	10	Moderado
1974	10	1975	1	4	Moderado
1975	7	1976	1	7	Fuerte
1978	4	1978	9	6	Débil
1985	2	1985	9	8	Moderado
1988	5	1988	10	6	Fuerte
1996	4	1996	7	4	Débil
2001	9	2001	12	4	Débil
2007	5	2007	12	8	Fuerte
2010	8	2010	11	4	Moderado

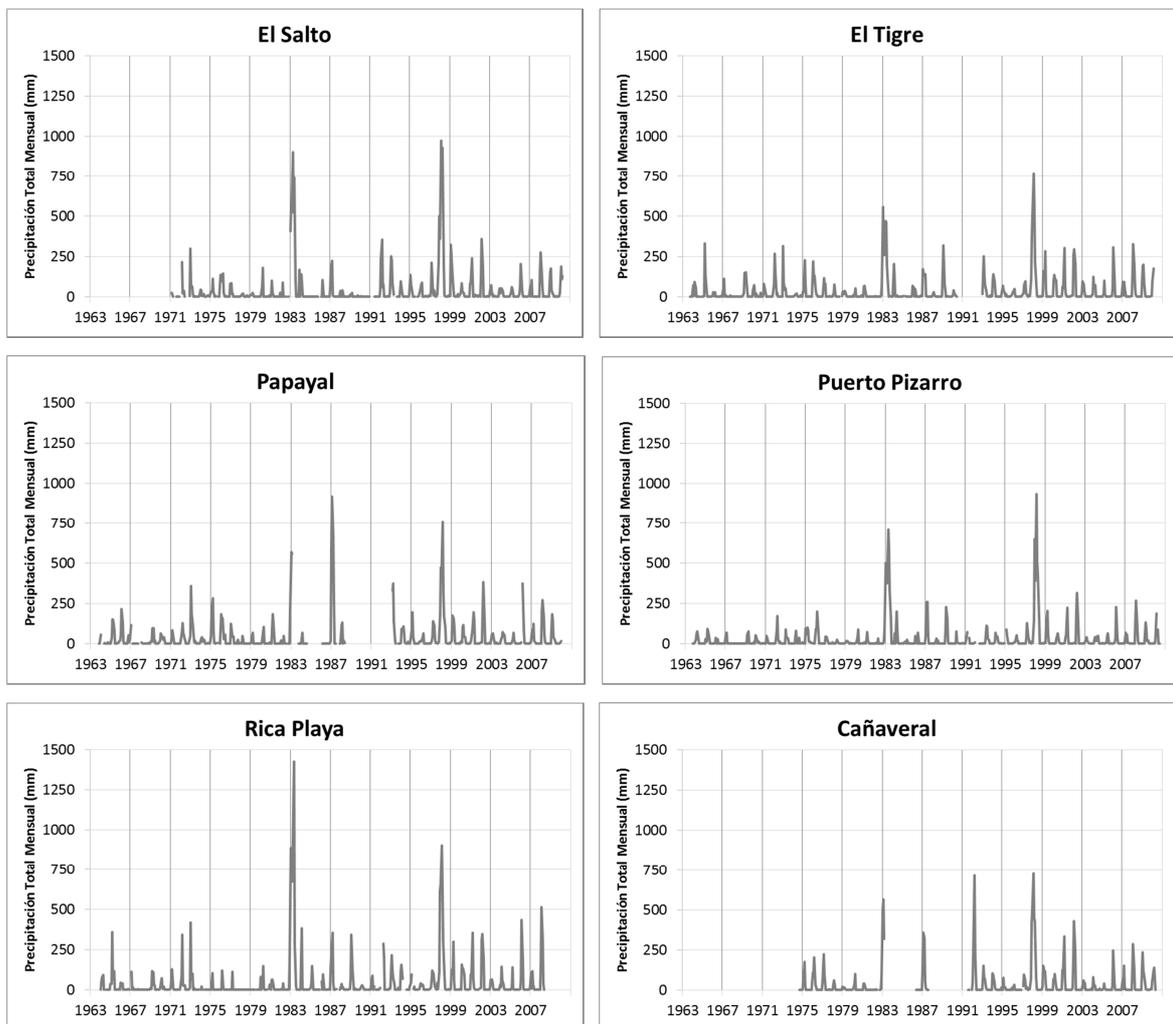
FUENTE: ENFEN, 2012.



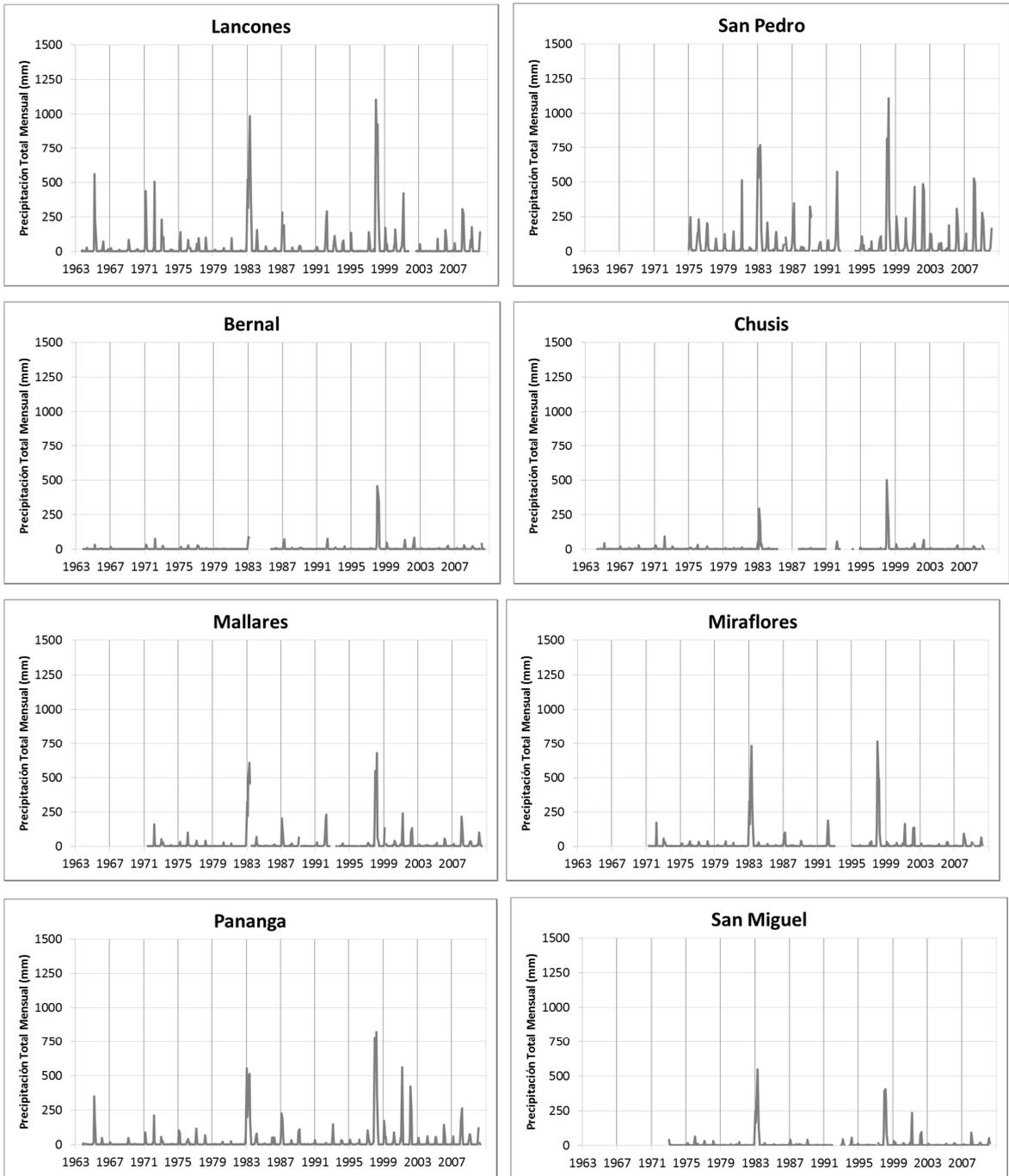
### Anexo 3: Análisis de la variabilidad interanual de la precipitación (1963/64 – 2008/09)

#### Anexo 3.1: Series de precipitación total mensual (1963-2009)

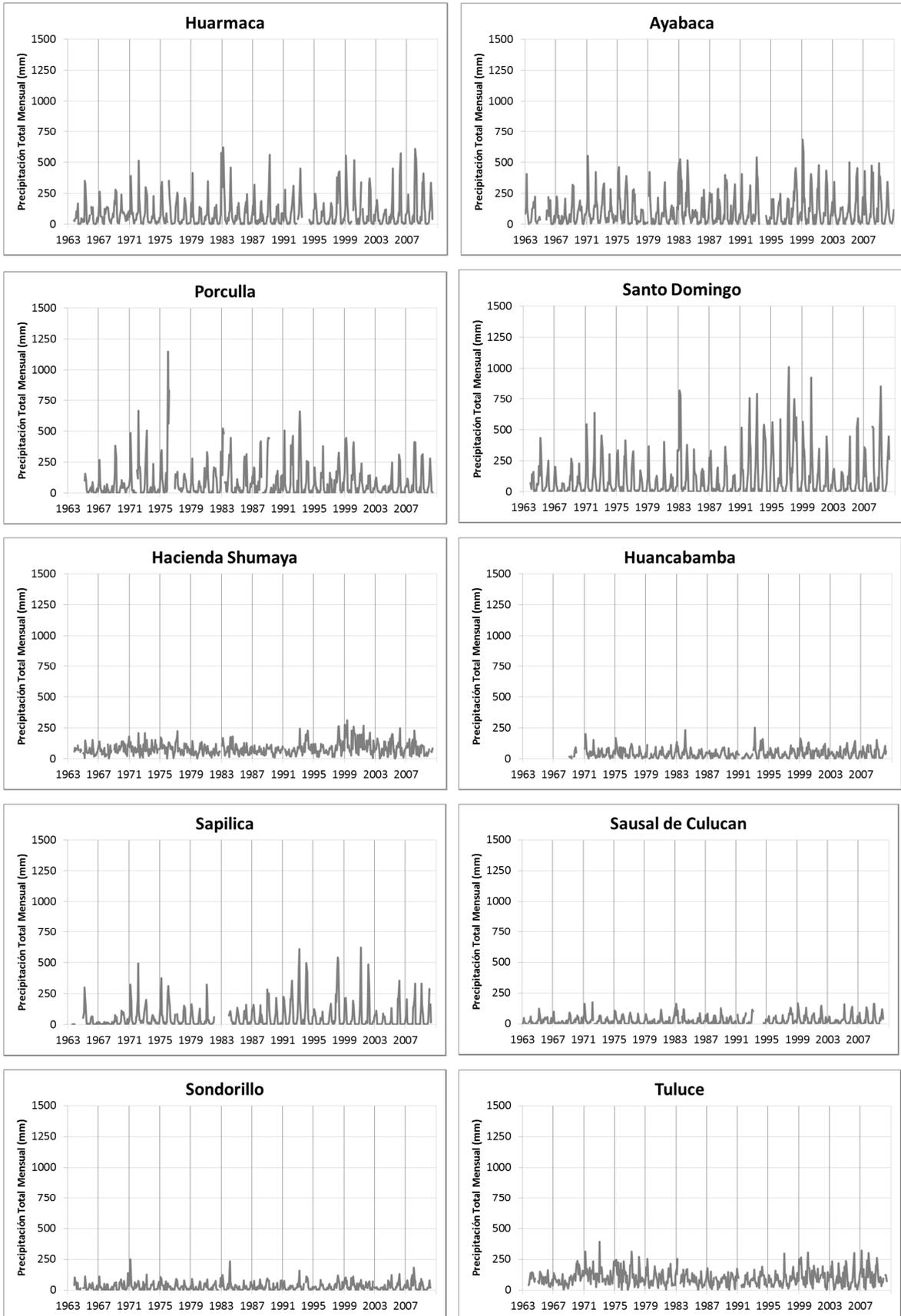
Figura 75: Histogramas de precipitación total mensual – Grupo 1



**Figura 75:** Histogramas de precipitación total mensual – Grupo 1 (continuación)



**Figura 76:** Histogramas de precipitación total mensual – Grupo 2



### Anexo 3. 2: Índices de calidad por estación acorde al Vector Regional

**Tabla 10:** Índices de calidad por estación del Grupo 1

N°	Estación	N° Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
1	Bernal	40	193.3	3.08	0.48	0.98
2	Chusis	31	205.4	2.53	0.93	0.96
3	Lancones	42	787	2.13	0.27	0.99
4	Mallares	31	357.6	2.18	0.29	0.99
5	Miraflores	31	519.9	2.43	0.41	0.99
6	Pananga	44	574.5	2.05	0.44	0.97
7	San Miguel	29	240.2	2.64	0.39	0.99
8	Cañaverl	24	536.6	1.25	0.52	0.98
9	El Salto	28	716.4	1.72	0.24	0.99
10	El Tigre	37	538.5	1.23	0.64	0.98
11	Papayal	28	437.9	1.00	0.66	0.96
12	Puerto Pizarro	41	671	1.82	0.23	0.99
13	Rica Playa	31	1061.7	1.85	0.65	0.96
14	San Pedro	28	859.5	1.25	0.67	0.98

**Tabla 11:** Índices de calidad por estación del Grupo 2

N°	Estación	N° Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
1	Ayabaca	39	486.5	0.38	0.11	0.96
2	Hacienda Shumaya	40	277.7	0.28	0.20	0.78
3	Huancabamba	34	143.4	0.29	0.25	0.72
4	Huarmaca	38	446.2	0.43	0.18	0.90
5	Porculla	38	461.4	0.51	0.32	0.73
6	Santo Domingo	44	774	0.62	0.38	0.74
7	Sapilica	39	431.5	0.65	0.38	0.77
8	Sausal de Culucan	36	123.8	0.39	0.23	0.92
9	Sondorillo	41	131.8	0.37	0.27	0.80
10	Tuluca	39	314	0.26	0.28	0.55

### Anexo 3.3: Estadísticas descriptivas de los índices de precipitación

**Tabla 12:** Resumen de las estadísticas descriptivas de los índices de precipitación para el Grupo 1

ÍNDICE	MEDIDA EST.	Bernal	Cañaverall	Chusis	El Salto	El Tigre	Lancones	Mallares	Miraflores	Pananga	Papayal	Puerto Pizarro	Rica Playa	San Miguel	San Pedro
CDD (días)	MIN.	81	74	97	49	30	93	111	93	91	40	23	33	79	45
	MAX.	638	260	465	239	309	359	327	405	452	261	638	337	360	242
	MEDIA	241.7	167.6	206.4	126.6	152.2	240.2	214.7	227.1	246.8	122.7	144.4	175.4	230.7	117.2
	DESV.	101.6	59.8	89.5	61.4	71.3	76.6	54.5	58.5	77.3	56.1	109.3	73.4	60.3	49.7
CWD (días)	MIN.	0	2	0	0	1	1	0	1	1	2	0	0	1	3
	MAX.	5	22	5	9	13	20	8	11	26	13	12	23	6	51
	MEDIA	1.9	5.7	2.0	4.2	5.3	4.3	3.0	2.9	3.6	5.1	3.9	6.6	2.2	9.9
	DESV.	1.2	4.0	1.3	2.4	2.8	3.9	1.7	2.3	4.2	2.7	2.2	4.7	1.3	9.5
PRCPTOT (mm)	MIN.	0	58.8	0	0	7.3	4.3	0	3.8	3	82.5	0	0	3.5	68.8
	MAX.	1227.9	2682.1	1021.1	3897.7	2603	3849.5	1960	2227.3	3059.7	2443.3	3217.4	5327.7	1304.4	3717.6
	MEDIA	59.8	426.3	78.3	416.1	422.9	361.5	163.7	216.2	280.0	433.4	377.3	578.1	88.8	684.0
	DESV.	192.0	535.4	204.8	759.5	530.4	778.7	361.6	525.8	574.5	446.0	701.3	1047.7	240.2	859.9
R10 (días)	MIN.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1
	MAX.	24	63	22	74	79	80	47	44	70	55	65	126	37	101
	MEDIA	1.4	12.1	1.8	10.0	11.8	8.5	4.1	4.8	7.8	12.2	9.0	15.7	2.2	15.9
	DESV.	3.9	12.8	5.2	14.7	14.8	16.5	8.8	10.8	14.9	10.8	14.0	24.0	6.8	21.1
R20 (días)	MIN.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MAX.	17	39	15	46	39	55	27	33	54	34	50	105	23	62
	MEDIA	0.6	5.9	0.9	5.5	6.2	5.2	2.1	2.9	4.7	5.6	5.2	8.3	1.1	10.1
	DESV.	2.7	7.9	3.0	9.4	8.6	11.2	5.1	8.0	10.5	6.4	10.7	19.5	4.3	15.3
R95p (mm)	MIN.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MAX.	841.6	1258.5	744.4	2483.5	1569.1	1868.8	932.5	1030.9	1234.3	1432.8	2015.4	2591.8	379.6	1570.8
	MEDIA	24.7	109.0	35.1	132.9	128.3	105.1	51.1	79.2	64.1	108.9	139.4	199.8	19.8	239.2
	DESV.	133.1	270.9	138.2	496.4	276.5	336.8	175.4	256.3	208.3	280.6	419.9	532.0	72.2	407.2

<b>R99p (mm)</b>	<b>MIN.</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>MAX.</b>	311.4	625.1	207.7	1750.5	795.1	723.2	407.8	285.6	551.8	535	662	1135.2	81.9	775.5
	<b>MEDIA</b>	7.8	41.3	11.1	76.5	39.6	27.9	20.2	22.5	20.2	37.0	40.5	64.3	2.8	80.3
	<b>DESV.</b>	49.2	134.6	43.9	350.3	133.8	121.5	81.7	73.6	87.2	109.2	143.8	221.6	15.2	188.7
<b>RX1day (mm)</b>	<b>MIN.</b>	0.9	14	0.6	6.5	4.7	1.5	0.9	2.2	2.2	17.2	0.4	0.5	2	14
	<b>MAX.</b>	123.2	181.3	136.2	313.7	220	193.8	201	173.6	154	219	143	174	81.9	199.3
	<b>MEDIA</b>	14.4	51.2	19.9	62.1	55.0	54.3	34.5	36.4	39.0	55.2	49.9	59.2	18.9	72.4
	<b>DESV.</b>	22.2	35.7	32.6	69.1	37.7	47.0	42.6	45.0	35.1	42.3	38.2	47.9	22.9	45.3
<b>RX5day (mm)</b>	<b>MIN.</b>	1.1	17	0.6	7	5.2	1.5	1.1	3.4	2.2	31.6	0.4	0.5	2.3	21.9
	<b>MAX.</b>	191.5	343.3	222.2	474	370	352.7	274	379.3	316.3	353.7	296.2	484.7	156.8	429
	<b>MEDIA</b>	20.9	92.4	29.2	108.6	89.4	86.0	53.4	57.6	64.6	88.6	77.5	113.4	28.7	154.6
	<b>DESV.</b>	33.0	71.2	54.7	108.1	67.8	84.1	65.4	82.3	68.2	65.7	63.4	110.2	37.0	116.5
<b>SDII (mm/d)</b>	<b>MIN.</b>	1.1	3.7	1.1	3.1	3.2	1.4	1.9	1.8	1.5	5.2	2.8	1.8	1.2	2.6
	<b>MAX.</b>	22.7	21.1	20	39.4	21.9	38.5	21.1	27.6	37.3	21.8	33.9	38.6	19.5	24.1
	<b>MEDIA</b>	4.8	9.7	4.7	10.3	9.1	12.7	7.1	7.4	11.1	9.8	9.3	11.1	5.5	10.0
	<b>DESV.</b>	4.3	4.1	4.2	7.6	3.9	8.0	5.1	6.2	8.0	4.3	6.3	7.2	4.7	5.6

**Tabla 13:** Resumen de las estadísticas descriptivas de los índices de precipitación para el Grupo 2

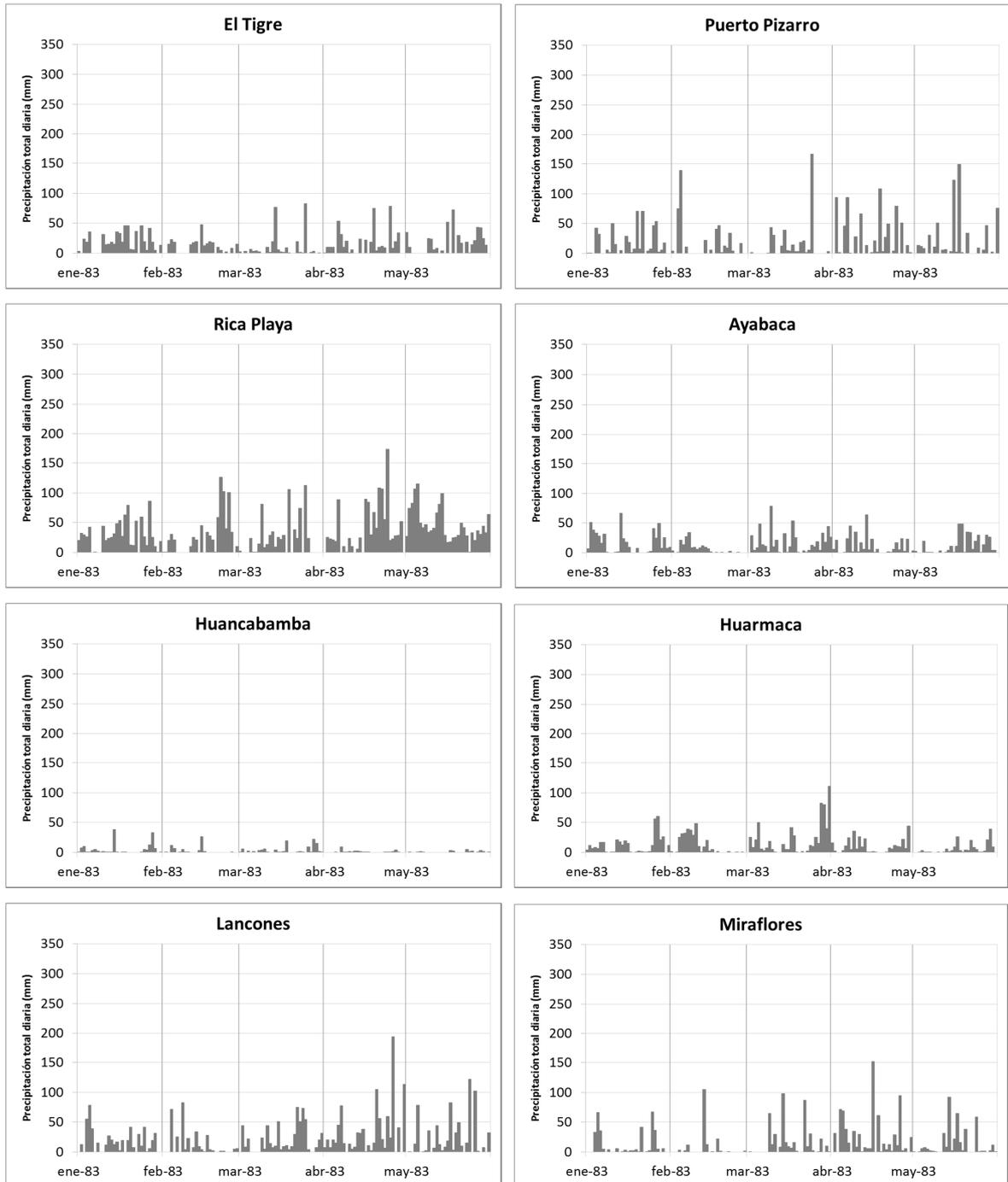
ÍNDICE	MEDIDA EST.	Ayabaca	Hacienda Shumaya	Huancabamba	Huarmaca	Porculla	Sapilica	Sausal de Culucan	Sondorillo	Santo Domingo	Tuluca
<b>CDD (días)</b>	<b>MIN.</b>	21	15	24	19	18	20	29	26	16	13
	<b>MAX.</b>	126	57	89	124	169	243	182	165	249	58
	<b>MEDIA</b>	53.8	28.3	46.6	56.1	74.4	99.2	87.1	70.8	92.4	25.0
	<b>DESV.</b>	24.2	8.9	16.3	25.8	36.6	53.4	32.7	36.1	56.3	11.1
<b>CWD (días)</b>	<b>MIN.</b>	7	1	4	7	3	3	3	2	3	5
	<b>MAX.</b>	23	11	16	30	120	43	9	14	38	27
	<b>MEDIA</b>	12.9	3.9	6.9	13.7	24.6	11.9	5.4	4.5	13.3	10.6
	<b>DESV.</b>	4.1	2.0	2.5	5.5	25.7	8.4	1.7	2.3	9.9	4.1

<b>PRCPTOT (mm)</b>	<b>MIN.</b>	544	590	192.5	452.9	198	61.5	90.4	161.3	245.3	619.3
	<b>MAX.</b>	2649.3	1859.3	795.5	2478.8	1927.4	2063	668.8	745.1	3782.4	1964.8
	<b>MEDIA</b>	1264.0	981.7	473.3	1008.8	893.8	659.9	311.0	356.1	1243.4	1209.0
	<b>DESV.</b>	483.1	277.7	147.4	452.9	463.0	431.1	123.1	131.3	774.5	314.2
<b>R10 (días)</b>	<b>MIN.</b>	16	27	2	10	4	1	0	2	4	4
	<b>MAX.</b>	83	77	24	70	98	60	29	33	135	72
	<b>MEDIA</b>	41.8	45.1	13.1	30.4	38.2	22.8	9.4	12.3	37.9	40.8
	<b>DESV.</b>	16.3	12.4	5.9	13.9	24.4	14.9	5.4	5.9	26.8	15.5
<b>R20 (días)</b>	<b>MIN.</b>	4	5	0	3	0	0	0	0	0	0
	<b>MAX.</b>	50	42	13	43	64	38	6	12	75	24
	<b>MEDIA</b>	20.0	19.9	3.3	11.8	10.4	6.4	1.8	3.1	19.8	9.7
	<b>DESV.</b>	10.6	7.9	2.6	8.7	12.5	8.1	1.5	2.5	16.6	7.0
<b>R95p (mm)</b>	<b>MIN.</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>MAX.</b>	992.1	453.9	412.6	1268.8	760.1	1183.3	184.4	253.9	1609.4	678.6
	<b>MEDIA</b>	277.2	141.4	100.5	276.1	134.5	151.9	57.4	63.5	305.6	234.9
	<b>DESV.</b>	233.3	114.5	78.5	303.3	184.7	257.3	41.9	58.2	363.5	181.9
<b>R99p (mm)</b>	<b>MIN.</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>MAX.</b>	587.2	270.5	265.9	682.4	477.7	533.9	69.3	92.8	828.9	354.9
	<b>MEDIA</b>	75.1	41.3	27.2	87.5	38.5	49.5	15.4	15.9	82.6	68.7
	<b>DESV.</b>	109.0	73.1	51.6	175.9	94.3	108.0	22.4	26.0	175.4	89.9
<b>RX1day (mm)</b>	<b>MIN.</b>	27.5	30.2	12.8	29	12	10.6	9.3	11.2	18.4	10
	<b>MAX.</b>	124.3	100.8	51.6	113.8	117.1	122	44.4	54.7	127.9	81.8
	<b>MEDIA</b>	61.0	46.6	31.1	59.7	35.3	41.2	26.7	29.6	65.9	38.2
	<b>DESV.</b>	16.1	14.9	9.1	22.8	21.1	26.3	8.2	9.8	24.8	17.3
<b>RX5day (mm)</b>	<b>MIN.</b>	63	40.5	18.5	60.4	29.7	13.1	13.9	24.5	30.5	38.1
	<b>MAX.</b>	271.4	212.7	120.4	341.9	366	264.6	81	100.6	362.4	155.8
	<b>MEDIA</b>	142.3	93.5	60.4	139.1	103.0	91.7	52.3	56.0	157.4	91.1
	<b>DESV.</b>	39.8	41.4	19.9	67.4	58.2	63.7	16.5	18.0	71.9	31.7
<b>SDII (mm/d)</b>	<b>MIN.</b>	6.9	7.7	3.8	5.6	4	2	3.6	4.3	4.6	5.7
	<b>MAX.</b>	17.6	20.6	8.7	15.7	15.9	14.5	8.1	14	26	12.7
	<b>MEDIA</b>	11.0	15.4	5.6	8.6	8.5	7.9	5.7	8.5	12.6	8.7
	<b>DESV.</b>	2.4	3.2	1.0	2.5	2.7	2.7	1.0	2.6	5.9	1.7

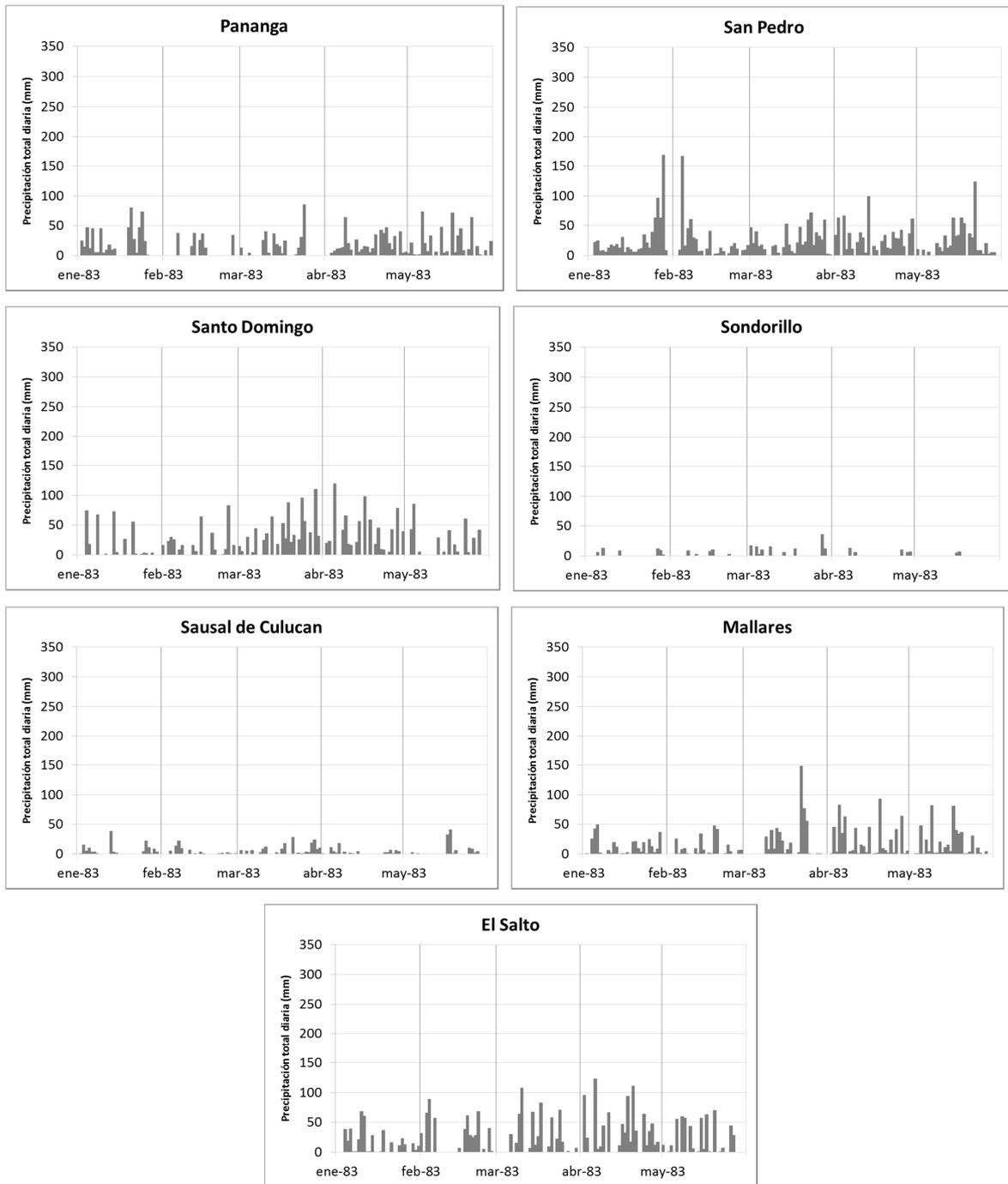
## Anexo 4: Análisis de la variabilidad diaria de la precipitación y su relación con la escorrentía durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98

### Anexo 4.1: Series de precipitación total diaria (ene83-may83 y dic97-may98)

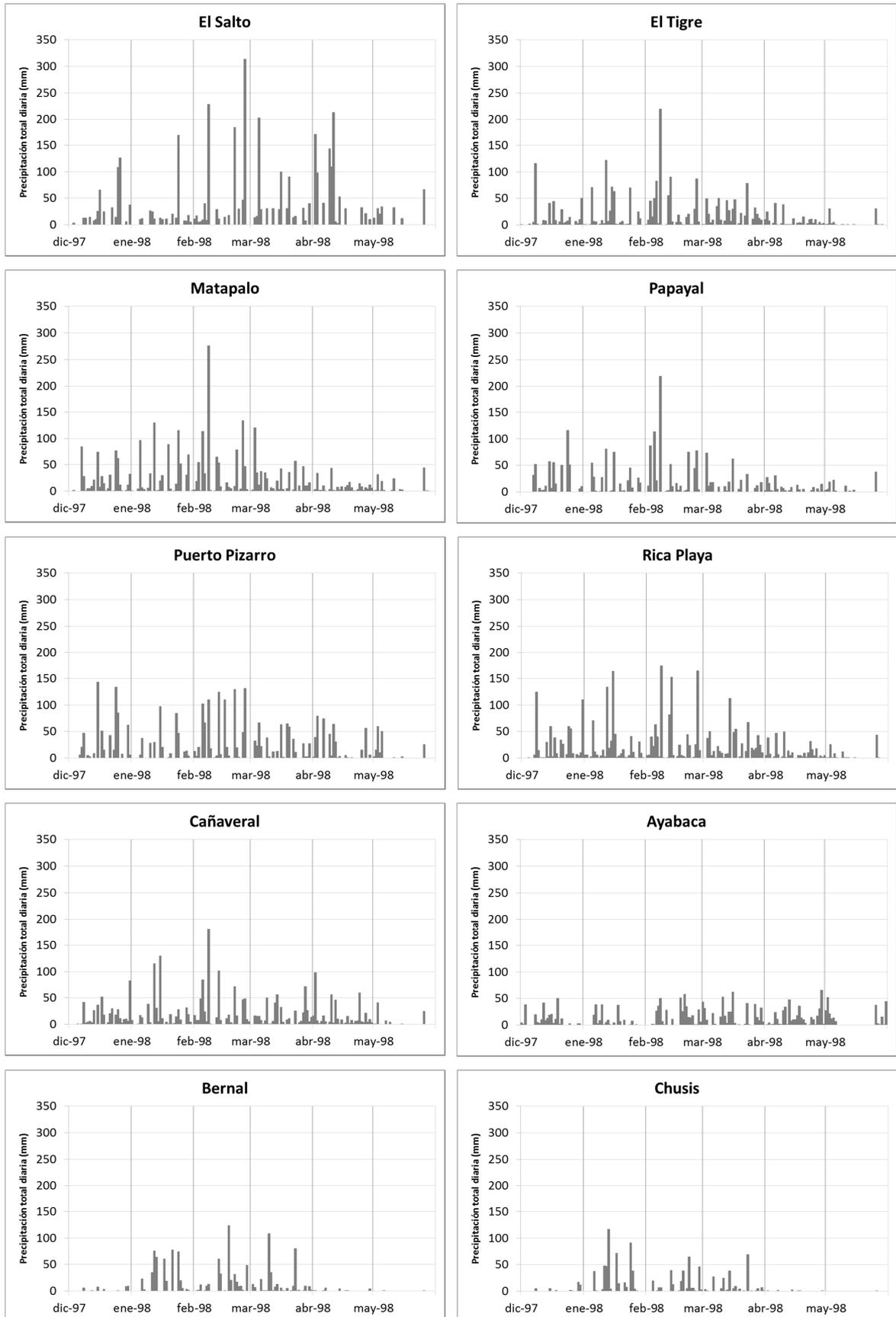
Figura 77: Series de precipitación total diaria (ene83-may83)



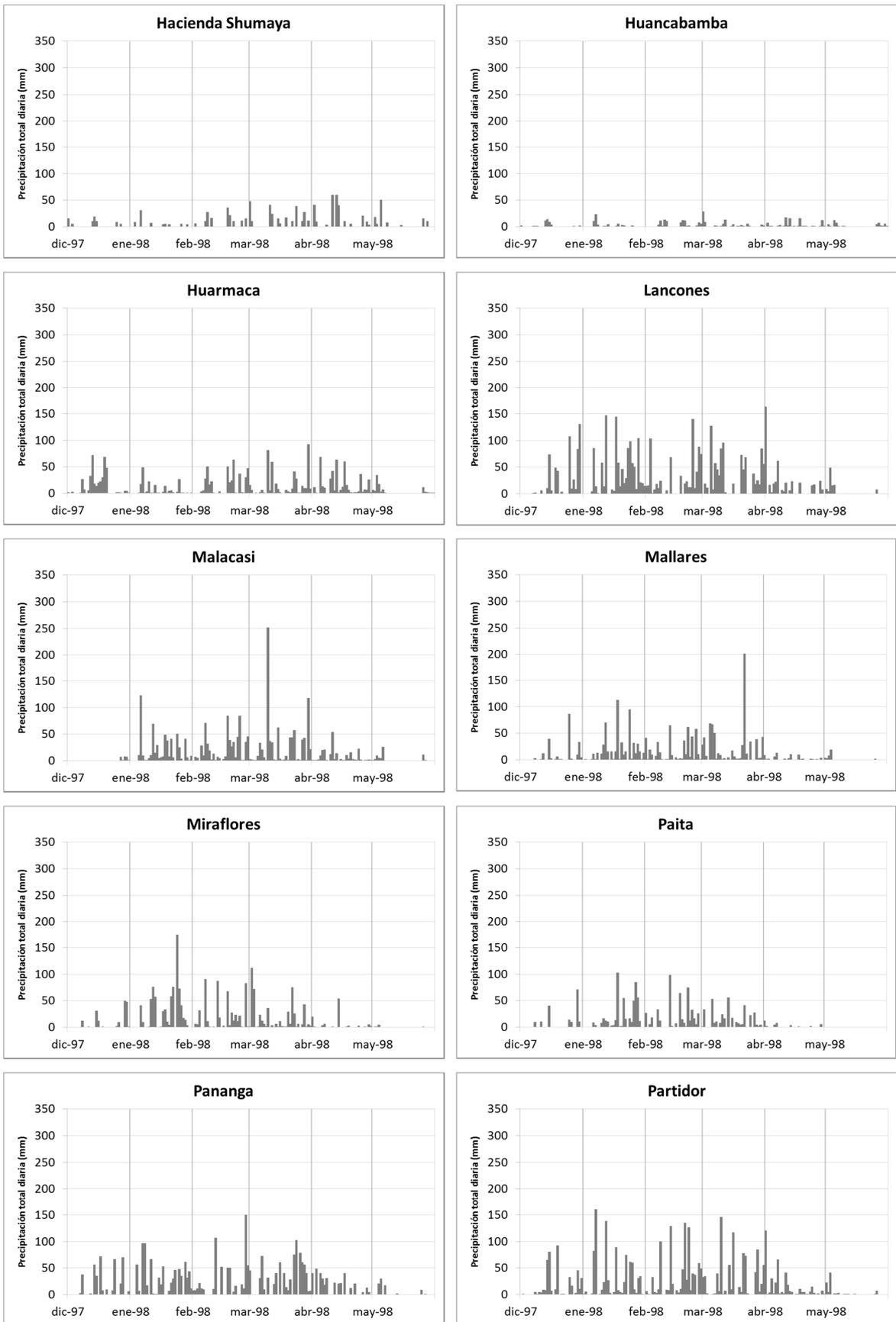
**Figura 77:** Series de precipitación total diaria (ene83-may83) (continuación)



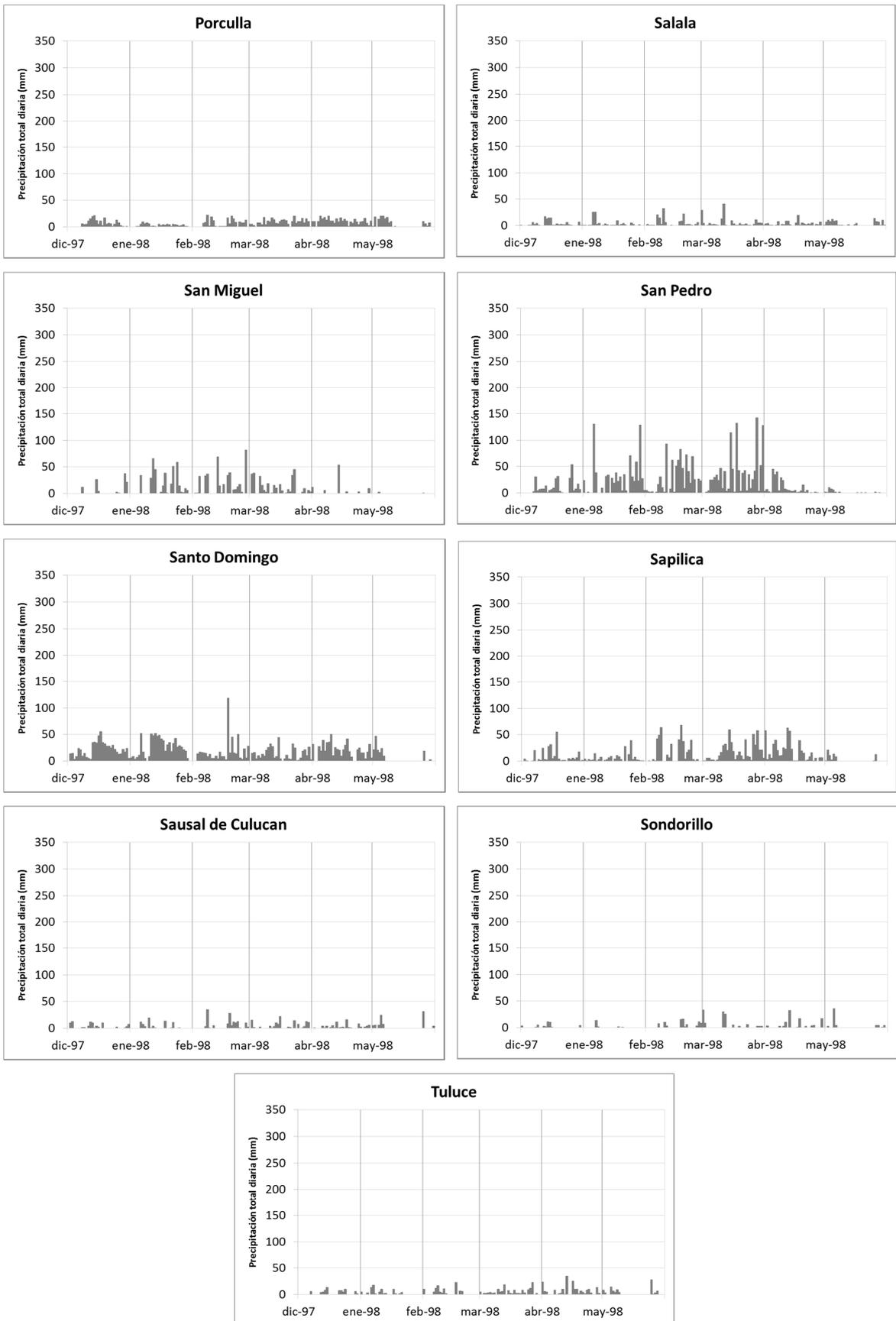
**Figura 78:** Series de precipitación total diaria (dic97-may98)



**Figura 78:** Series de precipitación total diaria (dic97-may98) (continuación)



**Figura 78:** Series de precipitación total diaria (dic97-may98) (continuación)



**Anexo 4.2: Análisis espacio-temporal de la precipitación (Valores de EOFs y precipitación promedio durante días lluviosos y secos)**

**Tabla 14:** Valores de los vectores propios o Funciones Ortogonales Empíricas (EOFs) de la precipitación diaria (Ene83-May83)

<b>Estación</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Vertiente</b>	<b>EOF1</b>	<b>EOF2</b>
Ayabaca	2830	Pacífico	0.39	-0.20
El Salto	6	Pacífico	0.20	0.32
El Tigre	61	Pacífico	0.08	0.06
Huancabamba	3177	Pacífico	0.22	-0.29
Lancones	123	Pacífico	0.30	0.24
Mallares	29	Pacífico	0.30	0.30
Miraflores	30	Pacífico	0.31	0.25
Pananga	500	Pacífico	0.14	0.27
Puerto Pizarro	7	Pacífico	0.28	0.33
Rica Playa	113	Pacífico	-0.07	0.22
San Pedro	309	Pacífico	0.27	-0.06
Santo Domingo	1475	Pacífico	0.13	0.12
Sausal de Culucan	1015	Pacífico	0.35	-0.23
Huarmaca	2142	Atlántico	0.26	-0.38
Sondorillo	1900	Atlántico	0.30	-0.33

**Tabla 15:** Valores de los vectores propios o Funciones Ortogonales Empíricas (EOFs) de la precipitación diaria (Dic97-May98)

<b>Estación</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Vertiente</b>	<b>EOF1</b>	<b>EOF2</b>
San Miguel	20	Pacífico	0.26	0.06
Partidor	250	Pacífico	0.25	-0.02
Bernal	7	Pacífico	0.24	-0.01
El Tigre	61	Pacífico	0.24	0.25
Miraflores	30	Pacífico	0.23	0.05
Cañaverall	159	Pacífico	0.22	0.22
Papayal	61	Pacífico	0.22	0.22
Matapalo	70	Pacífico	0.22	0.23
Rica Playa	113	Pacífico	0.22	0.26
Sapilica	1406	Pacífico	0.21	-0.11

Chusis	6	Pacífico	0.20	0.05
Malacasi	240	Pacífico	0.20	-0.10
Sausal de Culucan	1015	Pacífico	0.19	-0.14
Lancones	123	Pacífico	0.19	0.05
Ayabaca	2830	Pacífico	0.18	-0.26
Puerto Pizarro	7	Pacífico	0.18	0.19
Paita	40	Pacífico	0.18	0.04
Mallares	29	Pacífico	0.18	0.10
Santo Domingo	1475	Pacífico	0.17	-0.09
El Salto	6	Pacífico	0.16	0.10
San Pedro	309	Pacífico	0.14	-0.05
Pananga	500	Pacífico	0.08	-0.05
Huarmaca	2142	Atlántico	0.16	-0.23
Huancabamba	3177	Atlántico	0.14	-0.34
Hacienda Shumaya	2050	Atlántico	0.13	-0.27
Salala	2800	Atlántico	0.13	-0.29
Porculla	1971	Atlántico	0.12	-0.21
Sondorillo	1900	Atlántico	0.11	-0.35
Tuluce	1920	Atlántico	0.08	-0.18

**Tabla 16:** Lista de días lluviosos y secos durante los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98

<b>Evento</b>	<b>El Niño 1982-83</b>		<b>El Niño 1997-98</b>		
Días lluviosos	02-mar 09-mar 14-mar 18-mar 24-mar 28-mar	07-abr 16-abr 26-abr	06-ene 12-ene 18-ene 24-ene	08-feb 13-feb 18-feb 27-feb	10-mar 16-mar 23-mar 28-mar
Días secos	08-mar 12-mar 16-mar 20-mar 27-mar	08-abr 17-abr 27-abr	02-ene 09-ene 14-ene 20-ene 31-ene	09-feb 15-feb	04-mar 18-mar 25-mar

**Tabla 17:** Promedio de precipitaciones por estación durante el periodo analizado Mar83-Abr83 (mm/d), días muy lluviosos (mm/d), secos (mm/d) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo

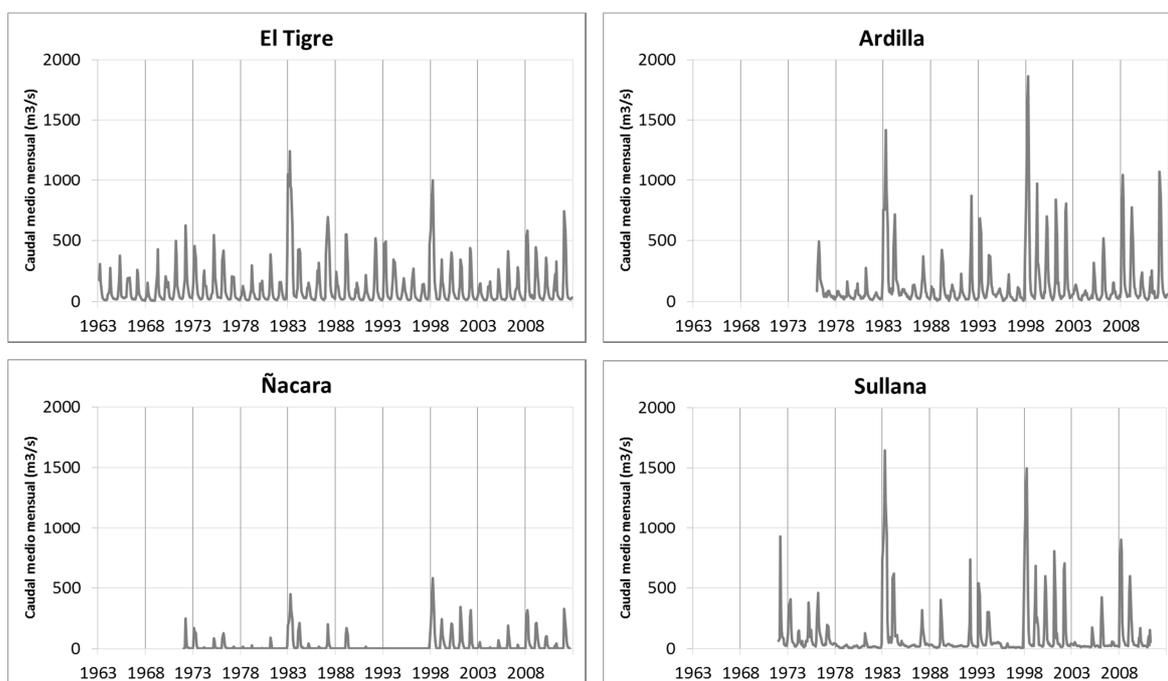
Estación	Periodo (mm/d)	Días lluviosos (mm/d)	Días secos (mm/d)	Amplitud (%)
Rica Playa	30.0	22.5	23.6	-3.7
El Salto	24.6	32.1	17.6	59.0
Santo Domingo	26.3	29.8	12.6	65.4
San Pedro	24.1	24.5	6.3	75.5
Pananga	13.5	21.2	9.0	90.8
El Tigre	11.9	16.9	4.6	103.0
Huarmaca	14.9	24.0	7.0	114.8
Lancones	26.3	48.3	6.8	158.2
Mallares	18.2	32.4	1.2	171.5
Puerto Pizarro	17.8	36.2	3.3	185.1
Sausal de Culucan	3.8	7.7	0.5	192.1
Ayabaca	14.2	31.2	3.5	195.6
Miraflores	19.0	54.8	1.7	279.8
Huancabamba	2.1	7.5	1.2	295.5
Sondorillo	2.7	12.1	0.0	441.3

**Tabla 18:** Promedio de precipitaciones por estación durante el periodo analizado Ene98-Mar98 (mm/d), días muy lluviosos (mm/d), secos (mm/d) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo

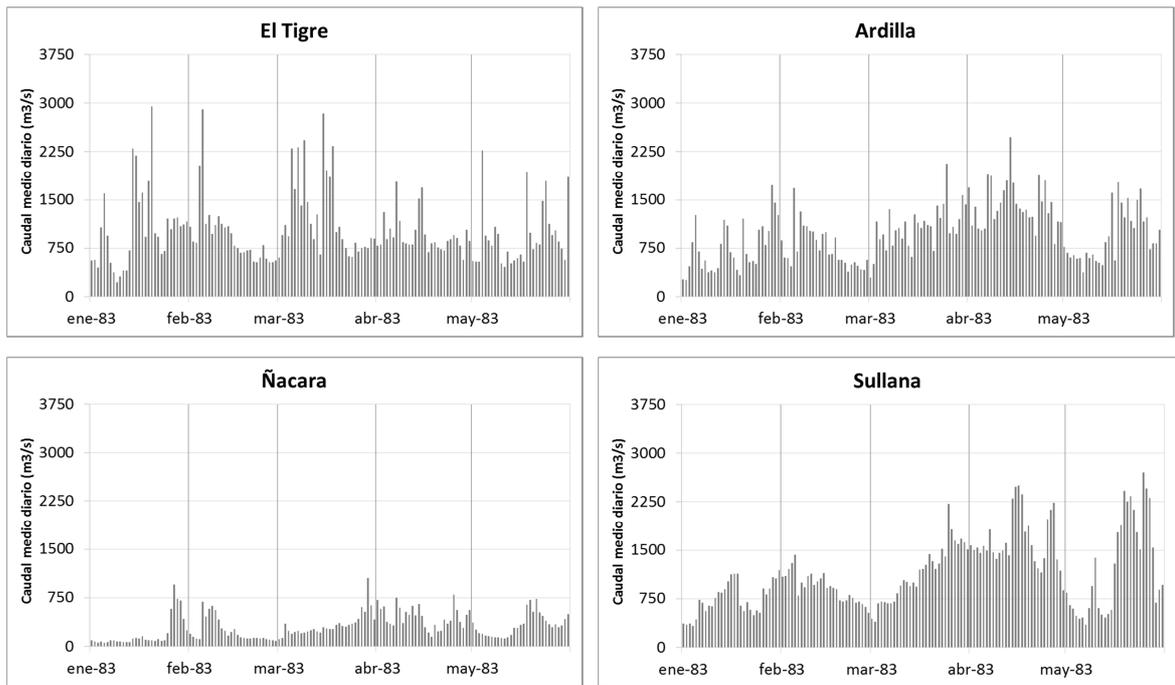
Estación	Periodo (mm/d)	Días lluviosos (mm/d)	Días secos (mm/d)	Amplitud (%)
Tuluze	3.6	4.1	2.7	39.0
Pananga	24.4	35.4	12.9	92.5
Santo Domingo	18.2	29.8	12.1	97.0
Porculla	6.0	9.5	3.7	98.3
San Pedro	29.9	53.2	16.6	122.5
Sondorillo	2.4	3.5	0.1	138.8
Salala	4.2	7.5	1.2	147.7
Puerto Pizarro	20.3	36.0	5.0	153.0
Mallares	18.5	37.9	8.2	160.8
Huancabamba	2.4	4.4	0.4	164.2
Lancones	30.5	60.7	6.1	179.1
Sapilica	13.0	27.8	3.6	186.0
Rica Playa	24.2	58.7	12.7	190.0

Paita	14.3	31.1	3.3	194.6
Huarmaca	11.0	24.8	2.6	200.4
El Salto	22.3	48.6	1.8	209.5
Matapalo	24.3	58.6	6.0	216.5
Ayabaca	11.7	27.1	1.6	217.5
Hacienda Shumaya	5.3	12.2	0.4	222.5
Cañaverall	18.7	50.0	8.1	224.6
El Tigre	20.3	54.7	5.5	242.8
Sausal de Culucan	3.7	10.3	0.9	255.5
Papayal	16.5	45.7	1.4	268.9
Malacasi	22.3	66.8	6.8	269.1
Partidor	28.2	77.7	1.0	271.9
Miraflores	19.5	57.2	1.2	287.3
Chusis	10.8	32.1	0.5	291.0
San Miguel	12.3	42.4	0.1	344.2
Bernal	13.1	53.4	0.2	404.5

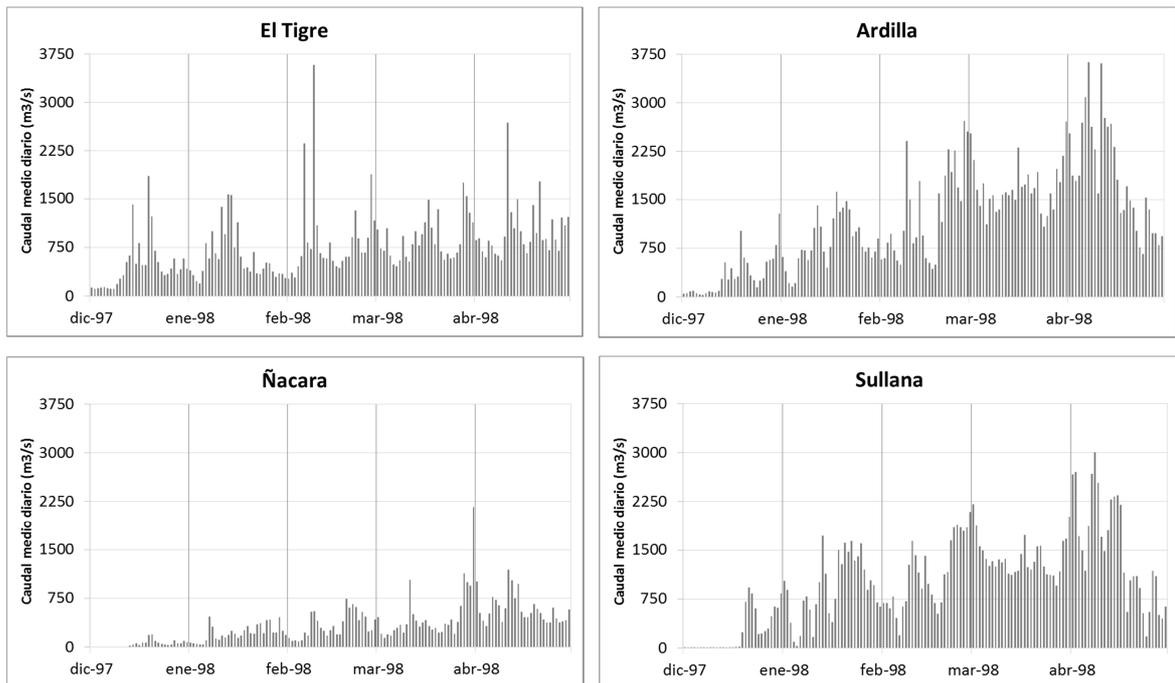
**Anexo 4.3: Series de caudal medio mensual (1963-2012) y de caudal medio diario (ene83-may83 y dic97-may98)**



**Figura 79: Series de caudal medio mensual (periodo 1963-2012)**



**Figura 80:** Series de caudal medio diario (ene83-may83)



**Figura 81:** Series de caudal medio diario (dic97-may98)

**Anexo 4.4: Relación precipitación-escorrentía (correlación entre precipitación y caudales diarios, promedio de caudales durante días lluviosos y secos)**

**Tabla 19:** Correlación lineal múltiple entre el índice de caudales de Tumbes, CP-1 (lag= 1día) y CP-2 (lag= 1día)

<b>Estadísticas de la regresión</b>	<b>El Niño 1982-83</b>	<b>El Niño 1997-98</b>
Coefficiente de correlación múltiple (r12)	0.28	0.53
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.08	0.28
Error típico	0.97	0.85
Observaciones	150	181
Intercepción	0.005	0.004
CP-1 (r1)	0.27	0.53
CP-2 (r2)	-0.07	0.02

**Tabla 20:** Correlación lineal múltiple entre el índice de caudales de Piura, CP-1 (lag= 1día) y CP-2 (lag= 1día)

<b>Estadísticas de la regresión</b>	<b>El Niño 1982-83</b>	<b>El Niño 1997-98</b>
Coefficiente de correlación múltiple (r12)	0.59	0.45
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.35	0.20
Error típico	0.81	0.19
Observaciones	150	181
Intercepción	0.01	0.01
CP-1 (r1)	0.59	0.40
CP-2 (r2)	-0.04	-0.20

**Tabla 21:** Valores de la correlación entre las series temporales de precipitación y caudales diarios durante el evento El Niño 1982-83

<b>Est. Pluviométricas</b>	<b>Est. Hidrométricas</b>			
	<b>El Tigre</b>	<b>Ardilla</b>	<b>Ñacara</b>	<b>Sullana</b>
El Salto	0.21	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
El Tigre	0.18	NS(0.05)	NS(0.05)	0.19
Puerto Pizarro	0.33	0.37	0.20	0.26
Rica Playa	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Ayabaca	0.34	0.46	0.42	0.20
Huancabamba	0.17	0.25	0.35	NS(0.05)
Huarmaca	NS(0.05)	0.29	0.54	NS(0.05)
Lancones	NS(0.05)	0.38	NS(0.05)	0.34
Miraflores	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)	0.21

Pananga	NS(0.05)	0.23	NS(0.05)	NS(0.05)
San Pedro	0.28	0.30	0.54	NS(0.05)
Santo Domingo	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Sondorillo	NS(0.05)	0.18	0.35	NS(0.05)
Sausal de Culucan	0.19	0.31	0.37	0.17
Mallares	NS(0.05)	0.27	NS(0.05)	0.20

**Tabla 22:** Valores de la correlación entre las series temporales de precipitación y caudales diarios durante el evento El Niño 1997-98

Est. Pluviométricas	Est. Hidrométricas			
	El Tigre	Ardilla	Ñacara	Sullana
El Salto	0.37	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
El Tigre	0.46	0.18	NS(0.05)	NS(0.05)
Matapalo	0.50	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Papayal	0.46	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Puerto Pizarro	0.29	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Rica Playa	0.40	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Cañaverl	0.52	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Ayabaca	0.30	0.31	0.44	NS(0.05)
Bernal	NS(0.05)	NS(0.05)	0.29	0.19
Chusis	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)	0.22
Hacienda Shumaya	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Huancabamba	NS(0.05)	0.18	0.26	NS(0.05)
Huarmaca	0.26	0.38	0.62	NS(0.05)
Lancones	NS(0.05)	0.20	0.21	0.35
Malacasi	NS(0.05)	0.23	0.67	0.17
Mallares	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)	0.18
Miraflores	NS(0.05)	NS(0.05)	0.15	0.21
Paita	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Pananga	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Partidor	0.22	0.17	0.25	0.38
Porculla	0.17	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)
Salala	NS(0.05)	0.16	0.21	NS(0.05)
San Miguel	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)	0.26
San Pedro	NS(0.05)	0.16	0.31	0.18
Santo Domingo	NS(0.05)	0.23	0.31	NS(0.05)
Sapilica	0.25	0.26	0.27	NS(0.05)
Sausal de Culucan	0.37	0.34	0.32	0.18
Sondorillo	NS(0.05)	0.17	0.23	NS(0.05)
Tuluca	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)	NS(0.05)

**Tabla 23:** Promedio de caudales medios diarios por estación durante el periodo analizado Ene83-May83 ( $m^3/s$ ), días muy lluviosos ( $m^3/s$ ), secos ( $m^3/s$ ) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo

Estación	Periodo ( $m^3/s$ )	Días lluviosos ( $m^3/s$ )	Días secos ( $m^3/s$ )	Amplitud (%)
El Tigre	1099.5	1179.5	1177.3	0.2
Ardilla	1238.1	1393.3	980.3	33.4
Ñacara	387.0	420.8	290.3	33.7
Sullana	1392.0	1548.7	1281.6	19.2

**Tabla 24:** Promedio de caudales medios diarios por estación durante el periodo analizado Dic97-Mar98 ( $m^3/s$ ), días muy lluviosos ( $m^3/s$ ), secos ( $m^3/s$ ) y la amplitud (%) entre días lluviosos y secos respecto al promedio del periodo

Estación	Periodo ( $m^3/s$ )	Días lluviosos ( $m^3/s$ )	Días secos ( $m^3/s$ )	Amplitud (%)
El Tigre	783.1	1113.0	609.4	64.3
Ardilla	1263.3	1478.7	1065.8	32.7
Ñacara	339.5	507.3	213.6	86.5
Sullana	1139.9	1383.6	932.8	39.6

## Anexo 5: Protocolo de uso de programas

### Anexo 5.1: Protocolo de uso de Hydraccess

#### Instalación del software

Hydraccess requiere del paquete Microsoft Access y puede ser descargado de la web: <http://www.ore-hybam.org/index.php/Software/Hydraccess>. Al iniciar el programa, existen tres pestañas: Hidro, Pluvio-meteo y Utilitarios. En la última se encuentra la opción del Vector Regional.

#### Presentación del formulario

El formulario presenta, en su parte izquierda, tres marcos de parámetros, en su parte derecha dos listas que contendrán las estaciones y los años del juego de datos estudiado, y abajo del formulario, una fila de botones de comando.

Vector Regional de índices anuales

Parámetros del archivo multi-estaciones

Nombre  filas =

Año Inicio  Número de Estaciones

Año Final  Número de Años

Tipo de Datos  Mes de trabajo  01 - enero

Parámetros del procesamiento

Año Inicio trabajo  Número mínimo de estaciones por año  3

Año Final trabajo  Número mínimo de años por estación  5

Brunet Moret --> Desvío límite inferior  0,80 Producir estas tablas:

Hiez --> Desvío límite superior  1,25  Desvíos Índices / Vector

Coeficientes Índices / Vector

Rieles de dobles masas

Valor límite inferior  5

Parámetros de la estimación

calcular los valores con un desvío aleatorio entre -2 DED y +2 DED DED

guardar los valores observados con desvíos entre -2 DED y +2 DED

Estación

Captor  valores

Captor de salida  M-Vec  valores

Leer un Archivo multi-estaciones | Calcular el Vector | Detalles de la Estación | Mapa del Año |  Desvios Medias | Completar el captor de salida

STOP

#### El marco *Parámetros del archivo Multi-Estaciones*

Este marco contiene los parámetros del archivo Excel conteniendo el juego de datos. Este archivo debe contener normalmente, en su zona de encabezado, informaciones sobre los códigos *Id Estación*, *Captor*, *Tabla*, y también las *Latitudes* y *Longitudes* de las estaciones. El archivo puede contener sea valores anuales, sea valores mensuales, pero en este último caso habrá que elegir el mes que se quiere tratar, ya que el método sólo puede tomar en cuenta un valor por año. Después de cargar un archivo de este tipo se presiona el botón *Leer un archivo Multi-Estaciones*.

### **El marco *Parámetros de procesamiento***

Se podrá elegir en este marco:

- el *Año de inicio de trabajo*, así como el *Año de fin de trabajo*, definiendo así el período del estudio.
- el *Número mínimo de estaciones por año*, así como el *Número mínimo de años por estación*, para evitar tomar en cuenta estaciones que tienen muy pocos valores observados, o años en los cuales muy pocas estaciones han sido observadas.
- el método de cálculo, de *Brunet Moret* o de *Hiez*.
  - en cuanto al método de *Brunet Moret*, se proporcionará las *Desviaciones límite inferior y superior*, en forma de coeficientes. Estos coeficientes serán utilizados durante el tratamiento para no incluir, en la construcción del Vector Regional, estaciones que presentan desviaciones al vector superiores a estos límites. Cuando después de una iteración, semejantes estaciones son detectadas, sus valores son reemplazados por su estimación por medio del Vector calculado para esta iteración, y el Vector es recalculado de nuevo, hasta ya no encontrar estaciones desviándose más allá de los límites.
  - en cuanto al método de *Hiez*, se encuentra como único parámetro el *Valor límite inferior*. Como este método no puede computar series con valores iguales a cero o negativos, los valores de las series inferiores a este valor serán filtrados.

### **El marco *Parámetros de la estimación***

Este marco sirve para definir ciertos parámetros utilizados para las estimaciones de valores faltantes o no por medio del vector. Si se trabaja sobre datos de tipo *Mensuales*, se podrá definir en este marco una estación y un captor de la base Hydraccess en el cual se quiere escribir los valores estimados.

### **Informaciones año por año**

Después de seleccionar los parámetros se presiona el botón *Calcular el Vector*. En el formulario *Vector Regional* de Hydraccess, elija un año en la lista *Años* situada a la derecha. Marque las casillas *Desvíos* y *Medias* situada al lado del botón *Mapa del año*, y haga clic sobre este botón. Eso produce un libro Excel que muestra en un gráfico la repartición geográfica de las estaciones, y para cada estación, su media extendida y su desvío al Vector para el año en curso. Este gráfico permite controlar si los desvíos al Vector son organizados en el espacio, o son más bien aleatorios.

## Anexo 5.2: Protocolo de uso de RClindex 1.0

### 1. Instalación y ejecución de R

R es un lenguaje y ambiente para cálculos y gráficos estadísticos. Es una implementación GNU del lenguaje S desarrollado por John Chambers y colegas de los Laboratorios Bell (antes AT&T, ahora Tecnologías Lucent). S-plus proporciona una implementación comercial del lenguaje S.

#### 1.1 Como instalar R

RClindex requiere el paquete base de R y la interfase gráfica de usuario Tcl/Tk. La instalación de R requiere un procedimiento muy simple. 1) Conectarse al sitio Web del proyecto R que es <http://www.r-project.org>; y 2) Seguir los enlaces para descargar la versión más reciente de R para el sistema operativo de su computador desde cualquier sitio espejo de CRAN.

#### 1.2 Como ejecutar R

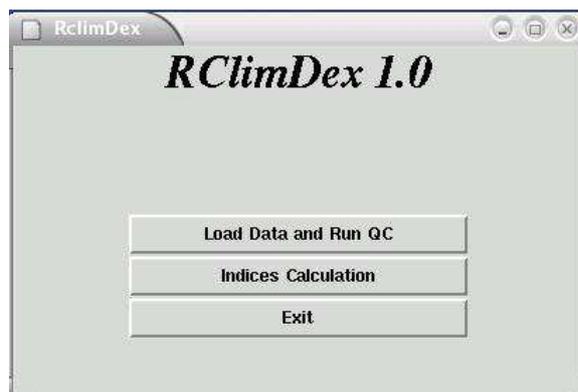
Bajo el ambiente Windows, haga un doble clic en el icono de R en su desktop, o ejecútelo a través del menú “Start” de Windows. Esto usualmente lo lleva a la interfase de usuario de R. Para algunos computadores, puede que usted necesite primero establecer una variable ambiente llamada “HOME”.

### 2. Como usar RClindex

#### 2.1 Cargando RClindex

En el prompt de la consola de R “>”, digite `source("rclindex.r")`. Esto cargará RClindex en el ambiente R. Puede que tenga que incluir el path completo antes del nombre de archivo `rclindex.r`.

O, en el caso que su computador esté conectado a Internet, puede descargar la versión más reciente del sitio Web ETCCDMI digitando `source` (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RClindex/rclindex.r>). Una vez que el código fuente es cargado exitosamente, aparecerá el menú principal de RClindex.



## 2.2. Cargar Datos y ejecutar Control de Calidad

El control de calidad (CC) de los datos es un prerrequisito para el cálculo de los índices. El CC de RclimDex desarrolla el siguiente procedimiento: 1) Reemplaza todos los datos faltantes (actualmente codificados como -99.9) en un formato interno que reconoce R (i.e. NA, no disponible), y 2) Reemplaza todos los valores no razonables por NA. Estos valores corresponden a cantidades de precipitación diarias menores que cero.

Seleccione “Load Data and Run QC” del Menú RclimDex para abrir una ventana. Esto permite al usuario seleccionar (cargar) el archivo de datos a partir del cual los índices serán calculados.

Una ventana aparece una vez que el CC es completado. Al mismo tiempo, dos archivos Excel, son creados en un subdirectorío llamado *log*. El primero contiene información sobre valores no razonables para precipitación. El segundo archivo contiene los datos una vez hecho el control de calidad y que serán usados para el cálculo de los índices. Para una fácil visualización, se crean archivos PDF que contienen gráficos de las series de tiempo (valores faltantes graficados como puntos rojos) de precipitación diaria.

## 2.3. Cálculo de Índices

RclimDex es capaz de calcular todos los 27 índices básicos para precipitación y/o temperatura ([http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)). Sin embargo, los usuarios pueden calcular solamente aquellos índices que quieran. Después de seleccionar “Índices Calculation” del menú principal, se pide al usuario que establezca algunos parámetros para el cálculo de los índices. La ventana “Set Parameter Values” permite al usuario introducir el primer y último año del periodo base para el cálculo de los umbrales, la latitud de la estación (Hemisferio Sur es negativa) para determinar en qué hemisferio está localizada la estación, un umbral de precipitación diaria definido por el usuario, P (en mm), para calcular el número de días en la precipitación diaria excede este umbral (el indicador Rnn), y 4 umbrales definidos por el usuario. El “User defined Upper Limit of Day High” permite el cálculo del número de días cuando la

temperatura máxima diaria ha excedido este umbral. El “User defined Lower Limit of Day High” permite el cálculo del número de días cuando la temperatura máxima diaria está debajo de este valor. El “User defined Upper Limit of Day Low” permite el cálculo del número de días cuando la temperatura mínima diaria ha excedido este umbral. El “User defined Lower Limit of Day Low” permite el cálculo del número de días cuando la temperatura mínima diaria esta debajo de este límite.

The image shows a software dialog box titled "Set Parameter Values" with the subtitle "User defined parameters for Indices Calculation". It contains several input fields for user-defined parameters. The parameters and their values are as follows:

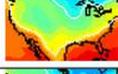
Parameter	Value
First year of base period	1961
Last year of base period	1990
Latitude of this station location	0
Longitude of this station location	0
User defined upper threshold of daily maximum temperature	25
User defined lower threshold of daily maximum temperature	0
User defined upper threshold of daily minimum temperature	20
User defined lower threshold of daily minimum temperature	0
User defined daily precipitation threshold	25

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "OK" and "CANCEL".

Una vez que este paso ha sido completado, una ventana aparecerá para permitir al usuario seleccionar los índices que desea calcular. Todos los índices son seleccionados por default. Quite la marca de los índices que no se necesiten, luego haga clic en “OK” para realizar el cálculo. Dependiendo de los índices seleccionados, este procedimiento puede tomar un momento. Una ventana aparecerá una vez que los índices seleccionados han sido calculados.

### Anexo 5.3: Protocolo de uso de información climática global de la NOAA

La información climática de Reanalysis de la NOAA puede ser descargada de la web: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html>. En esta página se presenta una breve descripción de la información, la cobertura temporal (1948/01/01 al presente) y espacial y los niveles de presión de la información. Tal como se observa en la siguiente imagen, la información de vientos (componentes *u* y *v*) se encuentra a nivel horario (4 veces por día), diario y mensual. Asimismo, si se hace clic en “*see list*” se puede descargar la información por año.

Variable	Statistic	Level	Download File	Create Plot/Subset
U-Wind	4-times Daily	Pressure	<a href="#">see list</a>	
U-Wind	Daily	Pressure	<a href="#">see list</a>	
U-Wind	Monthly Mean	Pressure	<a href="#">uwnd.mon.mean.nc</a>	
V-Wind	4-times Daily	Pressure	<a href="#">see list</a>	
V-Wind	Daily	Pressure	<a href="#">see list</a>	
V-Wind	Monthly Mean	Pressure	<a href="#">vwnd.mon.mean.nc</a>	

Respecto a la información de Radiación de onda larga saliente (OLR), ésta se puede descargar de la web: [http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.interp\\_OLR.html](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.interp_OLR.html). También se puede encontrar a escala diaria, mensual, media diaria histórica y media diaria mensual histórica (periodo base de 1981-2010). La información diaria y mensual se encuentra disponible a partir de junio de 1974 al presente.

Variable	Statistic	Level	Units	Download File	Create Plot/Subset
OLR	Daily Mean	Top of Atmosphere	W/m <sup>2</sup>	<a href="#">olr.day.mean.nc</a>	
"	Monthly Mean	Top of Atmosphere	W/m <sup>2</sup>	<a href="#">olr.mon.mean.nc</a>	
"	Daily Long Term Mean	Top of Atmosphere	W/m <sup>2</sup>	<a href="#">olr.day.ltm.nc</a>	
"	Monthly Long Term Mean	Top of Atmosphere	W/m <sup>2</sup>	<a href="#">olr.mon.ltm.nc</a>	

Estos archivos se encuentran en formato netCDF (Network Common Data Form) bajo la extensión \*.nc. Este es una interfaz para el acceso de datos de matrices orientadas y una biblioteca que proporciona una implementación de la interfaz. La biblioteca netCDF también define un formato independiente de la máquina para la representación de los datos científicos. En conjunto, la interfaz, la biblioteca, y el formato permiten la creación, el acceso y el intercambio de datos científicos. El software fue desarrollado en el Programa del Centro Unidata en Boulder, Colorado.

La gran mayoría de los datos que la NOAA distribuye se encuentran bajo archivos netCDF. Éstos se han embalado en datos enteros cortos (*short integers*) para ahorrar espacio, y para manipularlos es necesario descomprimirlos para obtener una representación correcta. Cada variable netCDF que ha sido embalado tiene un atributo *add\_offset* y *scale\_factor* asociado con él. Estos pueden variar con cada archivo netCDF incluso para la misma variable a partir del mismo conjunto de datos; sin embargo, esto no sucede a menudo.

La fórmula para descomprimir los datos es:

$$\text{Valor descomprimido} = \text{add\_offset} + ((\text{valor netcdf}) * \text{scale\_factor})$$

Estos archivos contendrán la información en 4 dimensiones (longitud, latitud, tiempo y nivel de presión). Es por ello que usualmente se encuentran en archivos comprimidos o embalados, y mediante el uso de softwares de programación (e.g. Octave, GrADS, Matlab, etc.) se puede acceder a ellos, manipularlos y visualizarlos. Para mayor información sobre cómo leer archivos netCDF, consultar las preguntas frecuentes de la NOAA en este tema (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/faq.html#2>).