

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

A: DIOS TODOPODEROSO, Por permitirme la vida, guiar mis pasos y proporcionarme sabiduría para la culminación exitosa de esta meta.

A: MIS PADRES: Luis García y Marta Isabel

A: MI ESPOSA, Ana Guadalupe Rivas

A: MIS HIJAS, Lilian Adriana e Ingrid Valeria

A: MIS HERMANOS, René e Iris

A: MI PATRIA, El Salvador

A: MIS UNIVERSIDADES; Universidad de Costa Rica
y Universidad de Oslo

A: MIS COMPAÑEROS Y COMPAÑERAS DE MAESTRÍA,
Blanca, Carlos, José, Sharon

AGRADECIMIENTO

Agradezco esta investigación:

- A: La Organización Meteorológica Mundial (OMM) por proporcionarme la oportunidad para estudiar, mediante la aprobación y por otorgamiento de la beca y realizar los estudios de maestría en Costa Rica. Agradezco el apoyo en todo momento tanto económico, logístico y de coordinación del programa, y especialmente a Sra. Patricia Mckay por sus atenciones.
- A: El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador a través del Servicio Nacional de Estudios Territoriales, institución en la que laboro y la cual, facilitó el permiso oficial gubernamental para gestionar y aprovechar la beca de la OMM.
- A: Mis compañeros del SNET, especialmente Alicia Navas, Janeth Zacarías, Tomás Rivas Pacheco, Alirio Rosa, Carlos Pérez, Adriana Erazo, Aldrin Estrada, Claudia González, que participaron ayudando con trabajo, apoyo técnico y logístico, datos, información y consejos “Gracias compañeras/os”.
- A: Mi Asesores de tesis, Dra. Irina Gottschalk, Dr. Lars Gottschalk, Dra. Vilma Castro, por su aporte a esta investigación y sus valiosos consejos académicos y personales.
- A: Mi asesora y directora del Posgrado en Hidrología de la Escuela de Física, Dra. Vilma Castro, quien fue el enlace efectivo y entusiasta entre el Centro Regional de Formación en Meteorología y la OMM.
- A: Al director y personal de la Maestría en la Escuela de Física y a los profesores que dieron su aporte a mi formación profesional y personal, en especial Dr. Julio Masis y Dr. Kolbjorn Engeland.

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado de Magister Scientiae en Hidrología”.



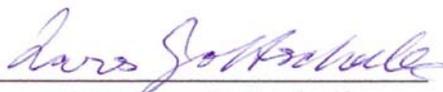
Dr. Erick Alfaro Martínez
Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado



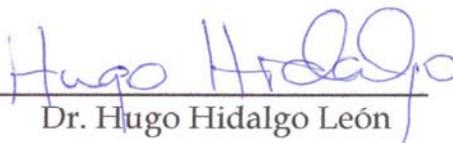
Dra. Irina Gottschalk
Directora de Tesis



Dra. Vilma Castro León
Asesora de Tesis



Dr. Lars Gottschalk
Asesor de Tesis



Dr. Hugo Hidalgo León

Representante del Director de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera



Luis García Guirola

Candidato

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
HOJA DE APROBACIÓN	iv
ÍNDICE.....	v
RESUMEN	viii
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE ILUSTRACIONES Y FIGURAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xvii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.Ubicación de la zona de estudio.....	1
1.2. Antecedentes.	3
1.3. Justificación.	5
1.4. Hipótesis.	6
1.5. Objetivos.	6
1.5.1. Objetivo general.	6
1.5.2. Objetivo específico.	7
CAPITULO II: METODOLOGIA.....	8
2.1. Etapa preliminar.	8
2.2. Procesamiento, interpretación y análisis de datos.....	8
2.3. Materiales y equipo.	10
CAPITULO III: CLIMA DE EL SALVADOR.....	11
3.1. Aspectos generales, reseña breve.	11
3.2. Fenómenos forzantes de escala planetaria : ENOS, ATN y otros.....	14
3.3. La señal de los forzantes en El Salvador.	24
CAPITULO IV: AREA Y DATOS DE ESTUDIO	27

CAPITULO V: REGIMEN DE LLUVIA EN EL SALVADOR, DISTRIBUCION MENSUAL ESTACIONAL Y ESPACIAL DE LA LLUVIA.....	32
5.1. Análisis de componentes principales para regionalización pluvial.....	32
5.2. Distribución Estacional.....	36
5.3. Distribución Espacial, mapas mensuales.....	41
CAPITULO VI: DISTRIBUCION ANUAL DE LA LLUVIA.....	45
6.1. Gráficos de barra y de tendencia de los valores anuales de lluvia para explicar el comportamiento histórico.....	45
CAPITULO VII: REGIMEN DE CAUDALES.....	52
7.1. Regionalización hidrográfica.....	52
7.2. Recursos superficiales.....	58
7.3. Régimen de los caudales.....	59
7.4 Análisis de componentes principales para explicar los patrones o régimen...66	
CAPITULO VIII: ANALISIS HISTORICO DE EVENTOS EXTREMOS CON LOS DATOS DIARIOS.....	71
8.1. Historial de eventos extremos lluviosos o secos.....	71
8.2. Relación cualitativa entre eventos extremos y los forzantes (ENOS, ATN)...73	
8.3. Análisis y comparación de trayectorias de huracanes.....	84
CAPITULO IX: ANALISIS ESTADISTICO ENTRE EVENTOS EXTREMOS, LLUVIA Y CAUDAL VRS. FORZANTES.....	86
9.1. Correlación de lluvia y Q con forzantes.....	86
9.2. Cuadro resumen de correlaciones significativas con los índices: SST Niño 3.4, 3, 4 y 1.2, SST ATN, SOI, PDO, NAO.....	127
9.3. Cuadro de relación de forzantes significativos.....	128
CAPITULO X: MAPAS DE ANOMALIAS DE LLUVIA EN ISOYETAS DE LOS ESCENARIOS SECOS Y LLUVIOSOS.....	130
10.1. Mapas de anomalias de lluvia absoluta en mm y porcentual de los escenarios deficitarios y de exceso de lluvia.....	130
10.2. Anomalias absolutas y porcentuales de los caudales mensuales.....	137

CAPITULO XI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	140
CAPITULO XII: REFERENCIAS Y LITERATURA USADA.....	144
APENDICE A: MAPAS CAP. V	148
Mapa 5.1 Isoyetas mensuales de noviembre.....	149
Mapa 5.2 Isoyetas mensuales de diciembre.....	150
Mapa 5.3 Isoyetas mensuales de enero.....	151
Mapa 5.4 Isoyetas mensuales de febrero.....	152
Mapa 5.5 Isoyetas mensuales de marzo.....	153
Mapa 5.6 Isoyetas mensuales de abril.....	154
Mapa 5.8 Isoyetas mensuales de junio.....	155
Mapa 5.10 Isoyetas mensuales de agosto.....	156
Mapa 5.12 Isoyetas mensuales de octubre.....	157
APENDICE B: MAPAS CAP. VII	158
Mapa 7.3 Región hidrográfica B, Río Paz.....	159
Mapa 7.4 Región hidrográfica B, Cara Sucia-San Pedro.....	160
Mapa 7.5. Región hidrográfica D, Río Banderas-Grande de Sonsonate.....	161
Mapa 7.6 Región hidrográfica E, Río Mandinga Comalapa.....	162
Mapa 7.7. Región hidrográfica F, Río Jiboa-Jaltepeque.....	163
Mapa 7.8. Región hidrográfica G, Bahía de Jiquilisco.....	164
Mapa 7.10. Región hidrográfica I, Río Sirama.....	165
Mapa 7.11. Región hidrográfica J, Río Goascorán.....	166
APENDICE C: CUADROS CAP. VIII.....	167
Cuadro 8.1. Eventos, pérdidas y daños reportados en periódicos.....	168
Cuadro 8.3. Registros de precipitación diaria durante eventos tipo temporal en El Salvador.....	203

RESUMEN

El área de estudio es todo El Salvador. La investigación enmarca diferentes componentes como la climatología, amenazas y eventos meteorológicos, hidroclimatología y la relación con forzantes oceánicos-atmosféricos para la elaboración de mapas de anomalías de lluvia.

El objetivo principal de la investigación es estudiar las características de los patrones hidroclimáticos de varias estaciones meteorológicas e hidrológicas ubicadas en El Salvador y determinar la relación con los índices de los océanos vecinos. Antes de hacer el análisis cuantitativo de dicha relación se hace un análisis cualitativo.

Se estudió el régimen de lluvia y caudales, su distribución estacional y espacial por medio de gráficos de barras y/o mapas de isoyetas así como análisis de componentes principales para reconocer patrones y su distribución interanual.

Se colectó y utilizó información histórica de eventos hidrometeorológicos de noticias de prensa escrita desde los años '30 recopilados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de El Salvador durante varios años y se resumió en un cuadro síntesis, relacionando los eventos extremos tipo temporales y sequías con los fenómenos de escala regional y planetaria, según las clasificaciones de fases frías o cálidas de eventos El Niño-La Niña y el Atlántico Tropical Norte (ATN).

Se analizó la distribución en el espacio de la lluvia de algunas trayectorias de ciclones en el Mar Caribe que afectaron al país, provocando un temporal como el Huracán Mitch (1998) y el Huracán Stan (2005).

Para el análisis cuantitativo, se hicieron correlaciones simples de Pearson y canónicas, usando varias estaciones meteorológicas representativas del país y dos estaciones hidrológicas, tomando aquellas que tenían un período menor de datos faltantes.

De la Internet se obtuvo una serie de datos mensuales del Océano Pacífico y Atlántico Tropical relacionados con diferentes índices como Niño región 3.4, SOI, NAO, ATN, CAR y PDO. Con ello se construyó un cuadro resumen con los que explica cuales tuvieron las correlaciones mejores y significativas.

Definida la combinación de forzantes o pesos que ejercen dichos indicadores sobre la lluvia, se procedió a elaborar mapas de anomalías de lluvia absolutas o porcentuales en forma de isoyetas, para los escenarios secos (deficitarios) así como para los lluviosos.

LISTA DE CUADROS

	Fig.
Cuadro 3.1. Zonas para los reportes referentes a El Niño	20
Cuadro 3.2. Clasificación de la fase cálida del ENOS “El Niño”	21
Cuadro 4.1. Serie de datos de caudales.....	28
Cuadro 4.2. Serie de datos de lluvia.....	30
Cuadro 4.3. Ubicación geográfica de la red de estaciones hidrológicas.....	30
Cuadro 4.4. Ubicación geográfica de la red de estaciones meteorológicas.....	31
Cuadro 7.1. Red de estaciones hidrológicas.....	59
Cuadro 7.2. Los primeros 5 años con acumulados altos y bajos de las 7 estaciones.....	64
Cuadro 8.2. Historia de sequías, temporales y sistemas ciclónicos que impactaron El Salvador, según información de periódicos y trayectorias de los mismos.....	75
Cuadro 8.4. Matriz Criterios para determinar una Situación Atemporalada o Temporal.....	78
Cuadro 9.1. Resumen de la relación entre forzantes y la lluvia y caudal.....	128
Cuadro 9.2. Resumen de escenarios de anomalías de la lluvia y caudal según las fases de los forzantes.....	128
Cuadro 10.1. Anomalías absolutas y porcentuales de caudales mensuales de 2 estaciones hidrométricas, para años Niño y para años combinados Niño+ATN frío.....	137
Cuadro 10.2. Anomalías absolutas y porcentuales de caudales mensuales de 2 estaciones hidrométricas, para años Niña y para años combinados Niña+ATN cálido.....	138

LISTA DE ILUSTRACIONES Y FIGURAS

Figura 1.1: Mapa político de El Salvador y las zonas occidental, central y oriental...	2
Figura 1.2: Mapa de zonas climáticas de Köppen en El Salvador.....	3
Figura 3.1. Ubicación de El Salvador en Centro América.....	11
Figura 3.2. Condiciones La Niña del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur.....	16
Figura 3.3. Condiciones El Niño del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur.....	19
Figura 3.4. Áreas en el Océano Pacífico donde se miden las variables de El Niño..	20
Figura 3.5. Ubicación geográfica de registros del índice CAR.....	23
Figura 4.1. Estaciones hidrométricas seleccionadas.....	27
Figura 4.2. Estaciones meteorológicas seleccionadas.....	29
Figura 5.1. Red de estaciones meteorológicas para el análisis PCA en El Salvador.	32
Figura 5.2. Análisis de Componente Principales con 3 factores o pesos para la lluvia en El Salvador	33
Figura 5.3. Análisis de Componentes Principales con 4 factores o pesos para la lluvia en El Salvador.....	34
Figura 5.4. Regionalización pluvial en El Salvador utilizando el Análisis de Componente Principales del software SYSTAT.....	36
Figura 5.5. Lluvia mensual de San Miguel M24, región oriental y costera.....	37
Figura 5.6. Función de autocorrelación de la lluvia mensual continua de San Miguel M24, región oriental y costera.....	38
Figura 5.7. Lluvia mensual de Ilopango S10, región central.....	39
Figura 5.8. Lluvia mensual de Santa Ana A37, región interior occidental y norte...	40
Figura 5.9. Lluvia mensual de Ilopango S10, región central.....	41
Mapa 5.7. Lluvia media del mes de mayo.....	42
Mapa 5.9. Lluvia media del mes de julio.....	43
Mapa 5.11. Lluvia media del mes de septiembre.....	44
Figura 6.1. Gráfico de barras de la lluvia anual y tendencia lineal, San Miguel....	46
Figura 6.2. Histograma de frecuencias de la lluvia anual, San Miguel.....	47

Figura 6.3. Gráfico de barras de la lluvia anual y tendencia lineal, Ilopango.....	47
Figura 6.4. Histograma de frecuencias de la lluvia anual, Ilopango.....	48
Figura 6.5. Gráfico de barras de la lluvia anual y tendencia lineal, Santa Ana.....	49
Figura 6.6. Histograma de frecuencias de la lluvia anual, Santa Ana.....	49
Figura 6.7. Gráfico de barras de la lluvia anual y tendencia lineal, Guija.....	50
Figura 6.8. Histograma de frecuencias de la lluvia anual, estación Güija.....	51
Mapa 7.1 a: Regiones hidrográficas.....	53
Mapa 7.1b: Regiones hidrográficas.....	54
Mapa 7.2: Región A: Río Lempa.....	55
Mapa 7.9: Región H: Río Grande de San Miguel.....	56
Mapa 7.12: Ubicación de la estaciones hidrométricas seleccionadas.....	60
Figura 7.1: Diagramas fase-espacio y caudal acumulado, San Andrés.....	61
Figura 7.2: Diagramas fase-espacio y caudal acumulado, Paso del Oso.....	61
Figura 7.3: Diagramas fase-espacio y caudal acumulado, Las Pavas.....	62
Figura 7.4: Diagramas fase-espacio y caudal acumulado, La Sierpe.....	62
Figura 7.5: Diagramas fase-espacio y caudal acumulado, La Hachadura.....	62
Figura 7.6: Diagramas fase-espacio y caudal acumulado, Conacaste.....	63
Figura 7.7: Diagramas fase-espacio y caudal acumulado, Atalaya	63
Figura 7.8: Caudales estación Atalaya.....	65
Figura 7.9: Caudales estación Conacaste.....	65
Figura 7.10: Caudales estación Hachadura.....	65
Figura 7.11: Caudales estación La Sierpe	65
Figura 7.12: Caudales estación Las Pavas	66
Figura 7.13: Caudales estación Paso del Oso	66
Figura 7.14: Caudales estación San Andres	66
Figura 7.15. Componentes principales de Conacaste.....	67
Figura 7.16. Funciones de amplitud de las primeras cuatro componentes, estación Conacaste.....	68
Figura 7.17. Reconstrucción de patrón en Atalaya.....	68

Figura 7.18. Reconstrucción de patrón en Conacaste	68
Figura 7.19. Reconstrucción de patrón en Hachadura.....	69
Figura 7.20. Reconstrucción de patrón en La Sierpe.....	69
Figura 7.21. Reconstrucción de patrón Las Pavas.....	69
Figura 7.22. Reconstrucción de patrón Paso del Oso.....	69
Figura 7.23. Reconstrucción de patrón en San Andrés.....	69
Figura 8.1 Anomalías estandarizada de la lluvia, estación Acajutla FES+Puerto Nuevo.....	73
Figura 8.2. Conteo de años lluviosos y secos en El Salvador vrs. Fases de ENOS y ATN.....	79
Figura 8.3. Comparación lluvia de diferentes eventos de gran magnitud en El Salvador.....	80
Figura 8.4 a: Mapa de isoyetas del temporal por Mitch.....	81
Figura 8.4 b: Mapa de isoyetas del temporal por Adrian.....	82
Figura 8.4 c: Mapa de isoyetas del temporal por Stan.....	83
Figura 8.5: Trayectoria de Huracanes.....	85
Figura 9.1. Correlación simples entre lluvia mensual de la estación San Miguel vrs. ATN.....	87
Figura 9.2. Correlación simples entre lluvia mensual de la estación San Miguel vrs. CAR.....	87
Figura 9.3. Correlación simples entre lluvia mensual de la estación San Miguel vrs. NAO.....	88
Figura 9.4. Correlación simples entre lluvia mensual de la estación San Miguel vrs. Niño 4	89
Figura 9.5. Correlación simples entre lluvia mensual de la estación San Miguel vrs. Niño 1+2.....	89
Figura 9.6. Correlación simples entre lluvia mensual de la estación San Miguel vrs. Niño 3.4.....	90

Figura 9.7. Correlación simples entre lluvia mensual de la estación San Miguel vrs. ONI.....	90
Figura 9.8. Correlación simples entre lluvia mensual de la estación San Miguel vrs. PDO.....	91
Figura 9.9. Correlación simples entre lluvia mensual de la estación San Miguel vrs. QBO.....	91
Figura 9.10. Correlación simples entre el caudal mensual de la estación Conacaste Herrado vrs. ATN.....	94
Figura 9.11. Correlación simples entre el caudal mensual de la estación Conacaste Herrado vrs. CAR.....	94
Figura 9.12. Correlación simples entre el caudal mensual de la estación Conacaste Herrado vrs. NAO.....	95
Figura 9.13. Correlación simples entre el caudal mensual de la estación Conacaste Herrado vrs. Niño.....	95
Figura 9.14. Correlación simples entre el caudal mensual de la estación Conacaste Herrado vrs. Niño 3.4.....	96
Figura 9.15. Correlación simples entre el caudal mensual de la estación Conacaste Herrado vrs. SOL.....	97
Figura 9.16. Correlación simples entre el caudal mensual de la estación Conacaste Herrado vrs. PDO.....	97
Figura 9.17. Correlación simples entre el caudal mensual de la estación Conacaste Herrado vrs. QBO.....	98
Figura 9.18. Patrón espacial del modo 1, anomalías de temperaturas del océano escenario A1.....	102
Figura 9.19. Patrón espacial del modo 1, anomalía de lluvia para escenario A1...102	
Figura 9.20. Patrón espacial del modo 3, anomalías de temperaturas del océano escenario A3.....	103
Figura 9.21. Patrón espacial del modo 3, anomalías de lluvia escenario A3.....	104

Figura 9.22. Patrón espacial del modo 1, anomalías de temperaturas del océano escenario B1.....	105
Figura 9.23. Patrón espacial del modo 1, anomalías de lluvia escenario B1.....	105
Figura 9.24. Patrón espacial del modo 2, anomalías de temperaturas del océano escenario B2.....	106
Figura 9.25. Patrón espacial del modo 2, anomalías de lluvia escenario B2.....	107
Figura 9.26. Patrón espacial del modo 1, anomalías de temperaturas del océano escenario B3-1.....	108
Figura 9.27. Patrón espacial del modo 1, anomalías de lluvia escenario B3-1.....	109
Figura 9.28. Patrón del modo 2, anomalías de temperaturas del océano escenario B3-2.....	109
Figura 9.29. Patrón espacial del modo 2, anomalía de lluvia escenario B3-2.....	110
Figura 9.30. Patrón espacial del modo 1, anomalías de temperaturas del océano escenario C1-1.....	111
Figura 9.31. Patrón espacial del modo 1, anomalías de lluvia escenario C1-1.....	111
Figura 9.32. Patrón espacial del modo 2, anomalías de temperaturas del océano escenario C1-2.....	112
Figura 9.33. Patrón espacial del modo 2, anomalías de lluvia escenario C 1-2.....	112
Figura 9.34. Patrón espacial del modo 3, anomalías de temperaturas del océano escenario C 1-3.....	113
Figura 9.35. Patrón espacial modo 3, anomalía de lluvia escenario C 1-3.....	113
Figura 9.36. Patrón espacial del modo 1, anomalías de temperaturas del océano escenario C 2-1.....	114
Figura 9.37. Patrón espacial del modo 1, anomalías de lluvia escenario C 2-1.....	114
Figura 9.38. Patrón espacial del modo 2, anomalías de temperaturas del océano escenario C 2-2.....	115
Figura 9.39. Patrón espacial del modo 2, anomalías de lluvia escenario C 2-2.....	115
Figura 9.40. Patrón espacial del modo 3, anomalías de temperaturas del océano escenario C 2-3.....	116

Figura 9.41. Patrón espacial del modo 3, anomalía de lluvia escenario C 2-3.....	116
Figura 9.42. Patrón espacial del modo 3, anomalías de temperaturas del océano escenario C3.....	117
Figura 9.43. Patrón espacial del modo 3, anomalía de lluvia escenarios C3.....	117
Figura 9.44. Patrón espacial del modo 1, anomalías de temperaturas del océano escenario D1.....	118
Figura 9.45. Patrón espacial del modo 1, anomalía de lluvia escenario D1.....	119
Figura 9.46. Patrón espacial del modo 2, anomalías de temperaturas del océano escenario D2.....	120
Figura 9.47. Patrón espacial del modo 2, anomalías de lluvia escenario D2.....	120
Figura 9.48. Patrón espacial del modo 1, anomalías de temperaturas del océano escenario D 3-1.....	121
Figura 9.49. Patrón espacial del modo 1, anomalías de lluvia escenario D 3-1.....	121
Figura 9.50. Patrón espacial del modo 2, anomalías de temperaturas del océano escenario D 3-2.....	122
Figura 9.51. Patrón espacial del modo 2, anomalía de lluvia escenario D 3-2.....	122
Figura 9.52. Patrón de temperaturas del océano correlación canónica SST Feb-Abril vrs. caudal.....	126
Figura 9.53. Patrón de anomalía de caudal Mayo-Jul vrs. SST Feb-abril.....	126
Figura 9.54. Patrón de temperaturas del océano correlación canónica SST Feb- Abril.....	127
Figura 9.55. Patrón de anomalía de caudal Agosto-Octubre vrs. SST Feb-Abril...	127
Figura 10.1. Mapa de lluvia media trimestre Mayo-Julio.....	130
Figura 10.2. Mapa de anomalía porcentual de la lluvia para años Niños, trimestre Mayo-Julio.....	131
Figura 10.3. Mapa de anomalía porcentual de la lluvia para años coincidentes Niños y ATN frío, para el trimestre Mayo-Julio	132
Figura 10.4. Mapa de lluvia media trimestre Agosto-Octubre.....	133

Figura 10.5. Mapa de anomalía porcentual de la lluvia para años Niños, trimestre Agosto-Octubre.....	134
Figura 10.6. Mapa de anomalía porcentual de la lluvia para años coincidentes Niños y ATN frío, para el trimestre Agosto-Octubre.....	135
Figura 10.7. Mapa de anomalía porcentual de la lluvia para años Niña, para el trimestre Mayo-Julio	136

LISTA DE ABREVIATURAS.

ATN	:	Atlántico Tropical Norte
CAR	:	Caribe
CEPAL	:	Comisión Económica Para América Latina
CEPRODE	:	Centro de Prevención de Desastres
CIGEFI	:	Centro de Investigaciones Geofísicas
CPC	:	Centro de Predicción Climática
CPT	:	Herramientas de Predicción Climática (software, siglas en inglés)
CRFMET	:	Centro Regional de formación en Meteorología
CRRH	:	Comité Regional de Recursos Hidráulicos
DGRNR	:	Dirección General de Recursos Naturales y Renovables
ENOS	:	El Niño-Oscilación del Sur
EXCEL	:	Software comercial de cálculos y estadísticas
IRI	:	Instituto Internacional de Investigación (siglas en inglés)
Km	:	Kilómetros
MARN	:	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (El Salvador)
MAG	:	Ministerio de Agricultura y Ganadería (El Salvador)
msnm	:	Metros sobre el nivel del mar
mm	:	Milímetros
NAO	:	Siglas en inglés, Oscilación del Atlántico Norte
NCEP	:	Siglas en inglés, Centro de Predicción del Ambiente
NIÑO	:	Regiones de monitoreo o fenómeno El Niño.
NOAA	:	Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de los EUA (siglas en inglés)
OAPA	:	Oficina de Análisis y Políticas Agropecuarias
OMM	:	Organización Meteorológica Mundial
OSC	:	Software estadístico para cálculo de Análisis de Componentes Principales.

PDO	:	Oscilación Decadal del Pacífico (Siglas en inglés)
PNUD	:	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SHN	:	Servicio Hidrológico Nacional
SMN	:	Servicio Meteorológico Nacional
SNET	:	Servicio Nacional de Estudios Territoriales
SOI	:	Índice de Oscilación del Sur (Siglas en inglés)
UCR	:	Universidad de Costa Rica
ZCIT	:	Zona de Convergencia Intertropical

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Ubicación de la zona de estudio.

La investigación se realizó con la información disponible de lluvia y caudales de todo El Salvador y los índices oceánicos-atmosféricos del océano Pacífico Ecuatorial y océano Atlántico Tropical.

El Salvador se ubica al norte de Centro América fronterizo al norte con Honduras, al este con Nicaragua, al oeste con Guatemala y al sur con el océano Pacífico. De todos los países de América Central, El Salvador es el único que no posee costas en el Mar Caribe.

Existen dos cadenas montañosas que cruzan el país de este a oeste. A la cadena al norte se le conoce como Sierra Madre Centroamericana, y en ella se encuentran las zonas más altas como el Cerro El Pital a una altitud de 2,730 metros y el Cerro Montecristo a una altitud de 2,418 metros. La otra cadena montañosa al sur se le llama Cadena Costera, y en ella se encuentran los ocho principales volcanes del país, y también se observan zonas bajas en la costa pacífica y gran parte de la zona oriental.

En este estudio se utilizó la división política del país dividida en 14 departamentos (Figura 1.1).

Estos 14 departamentos, que componen la división política, se dividen en tres zonas: Occidental, Central y Oriental (Chinchilla, 1993). La zona Occidental en color morado, agrupa a los departamentos de Ahuachapán, Santa Ana y Sonsonate. En la zona Central, en color verde y amarillo, se agrupan: La Libertad, San

Salvador, Chalatenango, Cuscatlán, Cabañas, La Paz y San Vicente. La zona oriental, en color café, se compone de Usulután, San Miguel, Morazán y La Unión.



Figura 1.1: Mapa político de El Salvador y las zonas occidental, central y oriental, fuente SNET.

La clasificación climática de El Salvador elaborada y modificada por Köppen en 1936 (Guevara 1985), indican características diferentes en la costa, valles y faldas, picos y cumbres. La mayor parte país cae dentro de la clasificación de sabana tropical caliente. La mayoría del país está constituido por zonas que cuyas elevaciones varían entre los 200 a los 800 m.s.n.m, son las planicies costeras e internas, indicadas en tonos de gris en la Figura 1.2. Las zonas de color verde claro, clasificadas como las planicies altas y faldas de montaña hasta los 1200 m.s.n.m, ocupan una proporción menor de territorio.

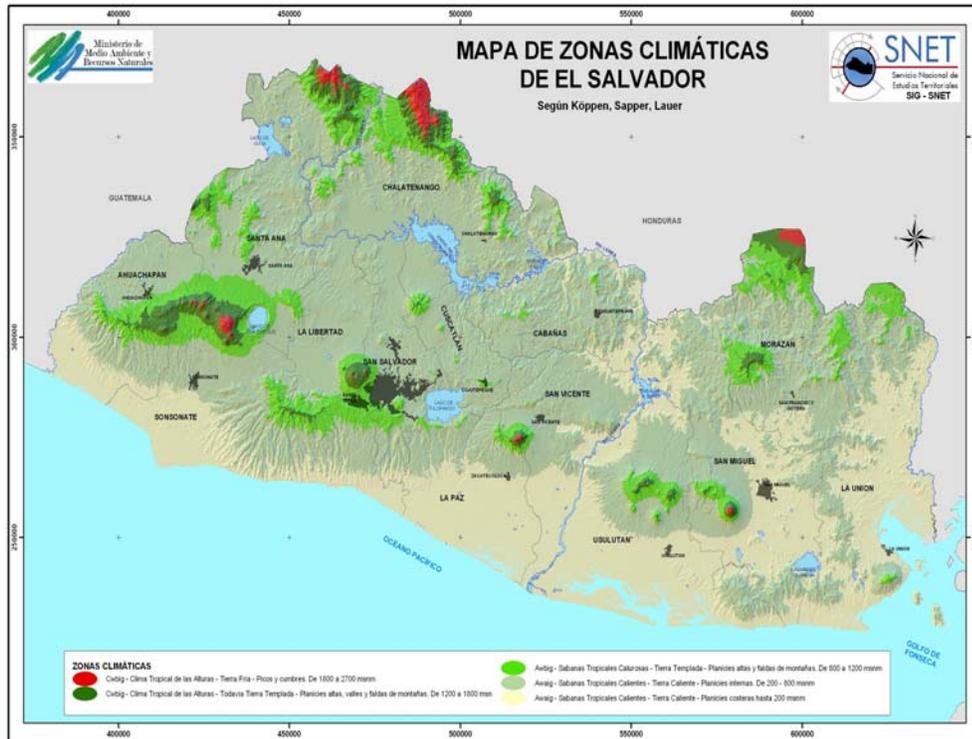


Figura 1.2: Mapa de zonas climáticas de Köppen en El Salvador, tomado de la base de datos del MARN.

1.2. Antecedentes.

El estudio del comportamiento de la precipitación en América Central ha sido objeto de análisis desde hace mucho tiempo, más que los caudales, pero no todos los países han tenido los recursos suficientes para hacerlo. El Salvador ha sido un ejemplo de ello, aunque varios estudios de la precipitación y caudal se han concentrado en áreas de alguna importancia hídrica, en especial para la generación de energía eléctrica, como son las cuencas de los ríos Lempa y Grande de San Miguel.

Un aporte importante a la investigación meteorológica en El Salvador lo ha hecho Guzmán (1971), al estudiar los diferentes tipos de situaciones climáticas en el país y mencionar varios ejemplos de situaciones sinópticas que afectan el

comportamiento y distribución de la lluvia en El Salvador.

También, Guzmán (1990) ha estudiado la Canícula (esto es, la disminución de la lluvia en los meses de julio y agosto) en diferentes regiones del país, así como la relación de esos períodos de disminución de la lluvia con la producción agrícola, en especial con la producción de maíz, frijol, arroz y algodón.

En cuanto al estudio de recursos hídricos han existido varios proyectos en el ámbito regional, nacional o por cuencas, los cuales se enfocaron en estudios diversos, algunos complejos y otros más específicos; los más abundantes son los realizados durante los años 60s y 70s por el Proyecto Hidrológico Centro Americano (PHCA), coordinado por lo que hoy se conoce como El Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH).

Dichos documentos o publicaciones están ubicados en la biblioteca de la Dirección General de Recursos Naturales Renovables (DGRNR), del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), institución donde funcionó por muchos años el Servicio Hidrológico Nacional. En la misma biblioteca se encuentran investigaciones realizadas por el Servicio en los años subsiguientes, años 80s y 90s, incluyendo otros financiados por la cooperación internacional o el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) como el Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos en El Salvador (PLANDARH).

Más recientemente los estudios hídricos han tenido un gran avance con la creación del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y la reingeniería que sufrió el Servicio Hidrológico Nacional. Desde el año 2002 muchas de sus investigaciones están disponibles en la página web y algunas han sido realizadas para apoyar otros proyectos u organizaciones no gubernamentales como por

ejemplo, el proyecto de Descontaminación de Áreas Críticas (DAC) financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Proyecto de Fortalecimiento a la Gestión Ambiental en El Salvador (FORGAES) financiado por la Unión Europea. Las investigaciones de estos dos últimos proyectos se encuentran en la página web del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

1.3. Justificación.

La investigación sobre el régimen de lluvia y caudales en El Salvador, su relación con la Variabilidad Climática (forzantes oceánicos-atmosféricos) para la construcción de mapas de amenazas por déficit o exceso de lluvias, pretende reconocer la relación entre los principales factores o forzantes de cambio¹ y los patrones lluviosos e hídricos, por medio del análisis de correlaciones simples y canónicas.

Hasta la fecha es muy difícil anticipar eventos extremos ya sean lluviosos o secos. De alguna forma se ha logrado mejorar los pronósticos de muy corto de tiempo (3 a 5 días de antelación), pero hace falta mejorar la predicción estacional (semanas o meses de antelación) de manera que se puedan programar actividades o tomar medidas de prevención o mitigación adecuadas.

Al identificar los principales factores que provocan cambios en los patrones hidroclimáticos, se puede orientar investigaciones posteriores para desarrollar modelos matemáticos, estadísticos o empíricos, de predicción con meses de antelación o elaborar mapas de escenarios posibles de amenaza, como se pretende en esta investigación.

¹ Patrones oceánicos que modifican el clima

En vista de que la modelación numérica y estadística ha mejorado considerablemente en los últimos tiempos, es posible reconocer con antelación el desarrollo de fenómenos oceánico-atmosféricos capaces de modificar patrones de lluvia-caudal en El Salvador, por ejemplo, la aparición de los fenómenos de El Niño y La Niña que pueden ser pronosticados con 3 a 6 meses de antelación. Como ambos fenómenos pueden impactar fuertemente el país, al conocer la relación entre lluvia y dichos forzantes y apoyándose con mapas de afectación, es posible tomar medidas de prevención y mitigación.

La demanda actual de información, en especial de productos con valor agregado, requiere que el SNET oriente sus estrategias hacia una cultura de Gestión del Riesgo donde la población conozca con antelación los escenarios de amenazas climáticas-hídricas futuros para organizar las actividades de prevención, mitigación o adaptación, ya sea desde la organización comunitaria local hasta la organización institucional pública o privada nacional.

1.4. Hipótesis.

Cualitativamente y cuantitativamente, ¿se relacionan los índices o forzantes oceánicos-atmosféricos con la lluvia y el caudal en El Salvador? y ¿Cómo?

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo general.

El objetivo general de la investigación de esta tesis es estudiar la relación entre el régimen de lluvias y caudales con los forzantes atmosféricos y oceánicos para generar mapas de amenazas trimestrales Mayo-Junio-Julio (MJJ) y Agosto-Septiembre-Octubre (ASO) de exceso o déficit de lluvia, los cuales servirán como base para una posterior investigación sobre la amenaza hídrica.

1.5.2. Objetivo específico.

Documentar y digitar información histórica recopilada por el SMN y de reportes de periódicos que describa la relación entre los eventos hidrometeorológicos que provocan excesos o déficit de lluvias-caudal y los forzantes oceánico-atmosféricos.

Documentar y resumir de forma cualitativa la relación existente entre eventos extremos y algunos eventos oceánicos-atmosféricos conocidos en el Océano Pacífico Tropical (como El Niño y La Niña) y el Océano Atlántico Tropical.

Estudiar la relación cuantitativa por medio de correlaciones entre las variables lluvia y caudal con los índices o forzantes oceánicos-atmosféricos para conocer la variabilidad de la precipitación y el caudal entre los seis meses de la época lluviosa, respecto al comportamiento de la temperatura superficial del mar, reconociendo el peso que cada forzante tiene sobre los excesos o déficit de las lluvias-caudales.

Presentar de forma espacial, en mapas trimestrales, los efectos de los forzantes oceánicos-atmosféricos sobre las anomalías positivas o excesos y las negativas o déficit de lluvia.

CAPITULO II: METODOLOGÍA

2.1. Etapa preliminar.

Se desarrolló una investigación bibliográfica de las condiciones hidroclimáticas, en general, de todo el país, y de los fenómenos oceánicos y atmosféricos de los cuales se tiene conocimiento afectaron Centro América incluyendo El Salvador. En este último caso, la mayor parte de literatura conocida ha sido generada en la Universidad de Costa Rica, el Centro Regional de Formación de la OMM o en centros de investigación como el CIGEFI.

En el SNET se recopiló información histórica de periódicos y bases de información de eventos naturales existentes, datos de lluvia y caudal mensuales así como datos de índices oceánicos-atmosféricos disponibles en distintas páginas web públicas de NOAA.

Los datos de periódicos utilizados corresponden a años entre 1920 y 1980 . La recopilación de datos hidroclimáticos como sequías, temporales y huracanes a lo largo de varios años fue realizada durante diferentes administraciones y en varios departamentos del Servicio Meteorológico Nacional. Toda la información está manuscrita y taquigrafiada en papel y se digitó en una hoja de cálculo electrónica para ponerla a disposición del público.

2.2. Procesamiento, interpretación y análisis de datos.

Se buscaron registros de estaciones meteorológicas e hidrológicas con series de tiempo largas y homogéneas, la mayoría desde los años 70s, procurando que la selección fuera representativa de las diferentes zonas climáticas e hidrográficas del país.

Se encontró que las series de datos de promedios mensuales de lluvia y caudal no estaban completas o tenían discontinuidades por el conflicto de guerra que vivió el país en los años 80, debiéndose completar las series en algunos casos con valores promedio. En cuanto a los registros, no todos tienen la misma longitud ni se inician el mismo año. En la década de los años ochenta y parte de los noventa es cuando más faltan datos.

Se utilizaron datos citados en otras investigaciones o proyectos en los que las series de datos ya fueron sometidas a un control de calidad, incluyendo la verificación de su homogeneidad y consistencia, es decir, se identificaron errores sistemáticos en los datos brutos o primarios.

Los datos globales de los índices de las regiones Niño, IOS, NAO, ATN, CAR, PDO, etc., se obtuvieron de la página web del NCEP/NOAA.

Los eventos de temporal se verificaron con datos registrados de lluvia diaria y lluvia acumulada entre 48 horas y 96 horas; se tabularon y luego se compararon con algunas trayectorias de huracanes de la base de datos del Centro Nacional de Huracanes de la NOAA, con la cual se procuró explicar la causa de las lluvias excesivas. El análisis cualitativo entre la relación de los forzantes y los períodos secos o lluviosos sobre El Salvador se ubicó en un cuadro resumen.

Con el software OSC o PCA se evaluó el régimen estacional o patrones del caudal de algunas estaciones hidrológicas.

Con las anomalías estandarizadas de la lluvia y caudal mensual promedio de los seis meses de la época lluviosa se elaboraron correlaciones simples entre las anomalías de lluvia y caudal, y los índices oceánicos-atmosféricos disponibles en

Internet.

Para hacer las correlaciones canónicas y encontrar los mejores patrones entre los modos o componente principal del predictor (TSM) y el predictando (lluvia y caudal), se usó el software Climate Prediction Tool (CPT) del IRI. En este caso se usaron datos de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) de la misma página del IRI para los océanos Atlántico y Pacífico Tropical, posteriormente se harán cuadros de resumen con los períodos e índices con mayor peso que modifican los regímenes climático e hídrico de El Salvador.

Cabe mencionar que el software CPT tiene como finalidad, a parte de encontrar las correlación canónicas, generar un modelo de predicción haciendo validación cruzada. Sin embargo, la herramienta no será usada ni probada para encontrar un modelo de predicción en esta investigación, lo cual podría ser finalidad de otra investigación posterior.

Finalmente, para el desarrollo de la investigación se procedió a elaborar los mapas de anomalías de lluvia para los diferentes escenarios de amenazas por exceso o déficit (de lluvia) de acuerdo al resultado de la combinación de años afectados por la combinación de los diferentes forzantes.

2.3. Materiales y equipo.

Se utilizó información manuscrita recopilada por el SMN, los registros históricos de lluvia y caudal recopilados por el SNET y datos obtenidos en Internet de los forzantes, luego se calculó los escenarios de anomalías negativas o positivas de la lluvia con los cuales se elaboraron los mapas en la Unidad del Sistema de Referencia Territorial del SNET

CAPITULO III: CLIMA DE EL SALVADOR

3.1. Aspectos generales, reseña breve.

El Salvador se encuentra geográficamente en el istmo centroamericano entre las latitudes $13^{\circ} 10' N.$ y $14^{\circ} 30' N.$ y las longitudes $87^{\circ} 40' O.$ y $90^{\circ} 10' O.$, Figura 3.1.

Los sistemas meteorológicos se desplazan con el movimiento aparente del Sol. En el verano del Hemisferio Norte, por ejemplo, algunos sistemas meteorológicos como la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se mueven hacia el norte del Ecuador hacia las latitudes cercanas a Centro América. Al eje latitudinal de esos sistemas de escala sinóptica en la baja troposfera usualmente se le conoce como ecuador meteorológico.

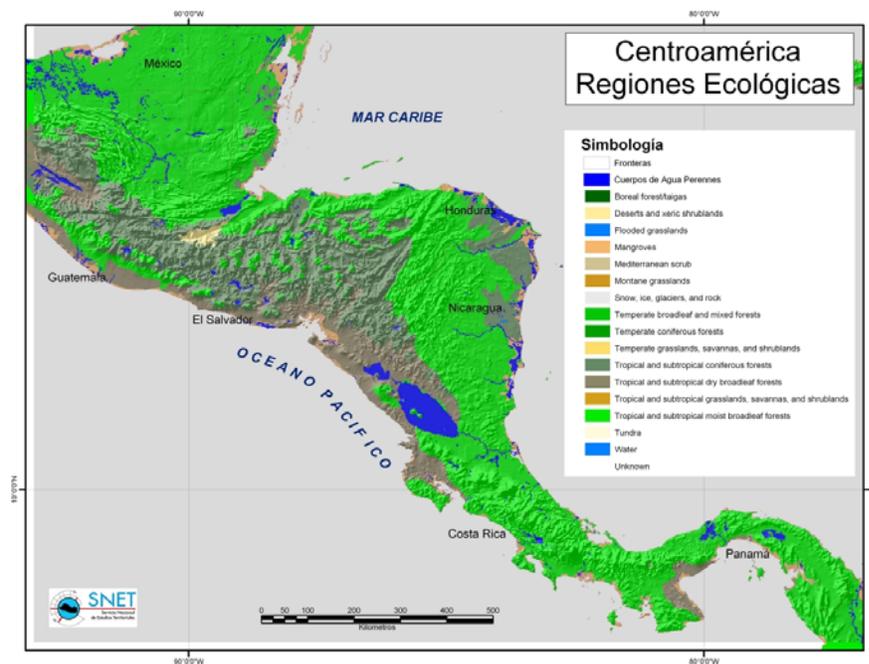


Fig. 3.1: Ubicación de El Salvador en Centro América. Tomada de la base de datos del MARN.

En la zona ecuatorial los rayos solares inciden en forma casi perpendicular en

el transcurso del año, haciendo que las variaciones estacionales de la temperatura sean muy pequeñas. Además esta zona se encuentra bajo la influencia de la ZCIT, en la que por ascenso dinámico o térmico se producen precipitaciones elevadas, ocasionando un aumento en la escorrentía.

Los cambios atmosféricos en las regiones tropicales de un día a otro son provocados por los cambios en la intensidad y la posición de tres tipos de sistemas : 1) disturbios migratorios de escala sinóptica de las regiones extratropicales en los bordes de las regiones tropicales, 2) disturbios migratorios de la escala sinóptica de las regiones tropicales, y 3) bajas y altas presiones, vaguadas y dorsales estacionales cuasiestacionarios en la escala hemisférica, además de los efectos convectivos por movimientos de mesoescala.

Gran parte de América Central está fuertemente influenciada por factores marítimos y orográficos; sólo la parte central de Nicaragua y Honduras parecen tener condiciones atmosféricas similares a las de algunas áreas continentales. La orientación noroeste-sureste de América Central tiene un profundo efecto sobre la circulación de bajo nivel, especialmente hacia el sur y el oeste. Además la rugosa cadena montañosa, no es una barrera sino un modificador del flujo del viento alisio de bajo nivel (Guard, 1986).

En El Salvador la influencia del mar al sur desde el Océano Pacífico es importante, pues produce amortiguamiento en las fluctuaciones térmicas, existiendo durante todo el año condiciones térmicas de poca variabilidad, además aporta humedad originando un clima en el país de carácter marítimo.

La cadena montañosa, origina que la mayor parte del país se localice a sotavento del flujo alisio, así en la estación seca las lluvias en todo el territorio

disminuyen mucho más comparadas con los países que tienen costas en la vertiente del Caribe (Guevara, 1985).

El régimen de lluvia presenta variaciones durante el año, existiendo una época seca (noviembre a abril) y otra lluviosa (mayo a octubre) bien definidas, presentándose en el mes de julio y agosto una “canícula” o “veranillo” en el cual la lluvia disminuye significativamente. En esos dos meses, la lluvia se concentra más en las horas de la noche, aunque el número de días con lluvia no experimenta ninguna disminución. En mayo se presenta la transición de la época seca a la lluviosa y en octubre la transición inversa; la actividad lluviosa en el país comienza en el Oeste y termina en el Este (Guzmán, 1971).

El régimen de las lluvias se ve muy influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical que actúa intermitentemente de mayo a octubre y en forma acentuada en los meses de junio y septiembre; produciéndose en estos últimos los máximos de precipitación.

Guzmán (1990) al estudiar la canícula en El Salvador encuentra que hay dos períodos probables de ocurrencia, puede aparecer en los primeros diez días del mes de julio y/o en la primera década de agosto, afectando en especial la zona oriental del país y algunas zonas costeras. Esos períodos secos pueden durar cada uno 10 días consecutivos cada año y pueden durar más de 15 días secos consecutivos cada 3 a 4 años.

Importante es conocer que los disturbios que acumulan lluvias abundantes durante 2 ó más días, denominados “temporales”, son originados en el Océano Pacífico adyacente y traen excesiva precipitación a la zona costera (Reyes, 1970). Los máximos de lluvia de junio y de septiembre se asocian a la mayor frecuencia de

“temporales” que se presentan en esos dos meses, en ocasiones también se presentan en octubre y esas lluvias persistentes pueden durar de 3 a 6 días, en especial sobre una franja de 50km de ancho sobre la región costera del país (Gierloff-Emden, 1976).

La estación seca se inicia en el mes de noviembre y finaliza en abril, observándose las mayores temperaturas al final de dicho período. Los vientos predominantes son de dirección NE, teniéndose además un buen desarrollo de brisa de mar y tierra en las zonas costeras y zonas aledañas (hasta la capital) e incluso, un poco más hacia al norte.

Algo importante que menciona Reyes (1970), es el hecho que no hay un criterio definido para establecer la terminación de la época lluviosa, y este solo define que hay una transición lluviosa-seca que dura 3 semanas, dicha transición inicia cuando ocurre la primera incursión de aire frío transportado por los “Nortes”.

Existen trabajos de investigación referentes al componente pluvial que se enfocan sobre algunas áreas específicas, como los realizados por Landaverde (1989) en la cuenca del Río Grande de San Miguel, o los de Martínez (1992) y Rivas (1995). Otros estudios sobre la lluvia son de carácter más general (PHCA, 1976).

3.2. Fenómenos forzantes de escala planetaria : ENOS, ATN y otros.

ENOS: El Niño-Oscilación Del Sur

Centro América y sin exceptuar El Salvador, es afectada cíclicamente por eventos hidrometeorológicos extremos producto de la variabilidad climática (sequías e inundaciones) que ocasionan pérdidas económicas y sociales. La

intensidad, duración y frecuencia de sistemas como huracanes, frentes fríos, tormentas tropicales, lluvias abundantes, Canícula y otros, pueden ser magnificadas por el fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación Sur).

El fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) caracteriza el acople entre el océano y la atmósfera, de escala planetaria y afecta directamente la cuenca del Océano Pacífico tropical. El Niño, que es la componente oceánica del fenómeno, consiste en un comportamiento particular de la temperatura de la superficie del mar; la Oscilación del Sur, que es la componente atmosférica, se relaciona con los cambios interanuales de la presión atmosférica sobre el Océano Pacífico y el Océano Indico ecuatorial.

La Oscilación del Sur

A la relación inversamente proporcional entre la presión al nivel del mar entre el este y el oeste del océano Pacífico Tropical se le llama Oscilación del Sur, midiéndose la presión al oeste sobre Darwin en Australia y al este sobre Tahití (una isla al centro del Océano Pacífico). Generalmente, cuando la presión sube en un extremo del océano disminuye en el otro, existiendo un vaivén de esos valores año con año. La oscilación mencionada se cuantifica como la resta del valor de presión en Tahití a la presión de Darwin de cada mes, dividida entre la desviación estándar de la misma serie, a este proceso se denomina normalización de la anomalía. El dato obtenido es adimensional y se conoce como Índice de la Oscilación del Sur (IOS) y forma parte de los datos con los que se caracteriza al fenómeno, los valores del IOS varían entre negativos (Niño) o positivos (Niña).

La Niña

Durante la Niña, la acumulación de agua caliente en la parte occidental del Océano Pacífico alrededor de Australia, provoca un incremento de la evaporación, igual que

están asociadas a la corriente de Humboldt, paralela al continente suramericano, a este enfriamiento del agua se le conoce como la fase fría del ENOS o La Niña.

Condiciones El Niño

El fenómeno ENOS en fase cálida, como resultado de una compleja interacción entre el océano y la atmósfera, se desarrolla por el calentamiento atípico de las aguas en el Pacífico Central y las costas peruanas. Además, la circulación en la atmósfera cambia al desplazarse la celda de circulación de Walker (Philander, 1990).

Las condiciones que trae el fenómeno El Niño, son altas temperaturas de la superficie del mar, vientos alisios débiles en el Pacífico y diferencias pequeñas en la presión superficial a lo largo del Pacífico tropical. Los estudios de Aceituno (1988) y Roger (1988) indican que durante los eventos Niños, en el período de julio a diciembre, la precipitación decrece significativamente sobre América Central y la parte norte de Sudamérica.

En América Central El Niño se caracteriza por presiones al nivel del mar anormalmente bajas en la parte este del Pacífico Austral y anomalías positivas de la presión al nivel del mar sobre el Atlántico, Vientos Alisios en el Pacífico débiles y fuertes sobre el Atlántico, vientos del oeste en la atmósfera superior que se intensifican, las condiciones de temperaturas son más cálidas, en el período de julio a diciembre, la precipitación decrece significativamente, de enero a marzo la precipitación es baja, y en el período de abril a junio, no existe una tendencia consistente de un decrecimiento de la lluvia (Fernández y Ramírez, 1991).

Guzmán (1990) encontró que en los años con eventos El Niño sobre El Salvador hay un déficit de precipitación que se agudiza en julio, agosto o ambos; además, que los efectos se manifiestan más en la Zona Oriental y son amortiguados en el Occidente y Centro de El Salvador. También, encontró que no hay una coincidencia entre el año seco y el año mencionado como Niño, haciendo uso de la clasificación de Rasmussen & Wallace (1983) y la de Zuta & Guillen (1970).

Como consecuencia de este déficit, hay daños en los cultivos y en la producción por atrasos del inicio de las lluvias, repentinas finalizaciones de ésta y períodos secos prolongados. Así los algunos rendimientos agrícolas pueden bajar hasta un tercio de lo que se alcanza bajo condiciones normales.

Cuando las presiones cambian y en Tahití es menor que en Darwin, el Índice de la Oscilación del Sur o IOS es negativo, el flujo del viento superficial se debilita o cambia de dirección desplazándose hacia el Este (flecha blanca, figura 3.3), permitiendo que el agua cálida se desplace hacia el centro del Océano Pacífico y las costas de Sur América (color rojo). Esta circulación de aire y las corrientes de agua representan las condiciones de El Niño. El nombre proviene del aparecimiento de corrientes cálidas en el mes de diciembre en las costas de Perú y Ecuador, por lo que los pescadores lo asociaron al nacimiento de El Niño Jesús.

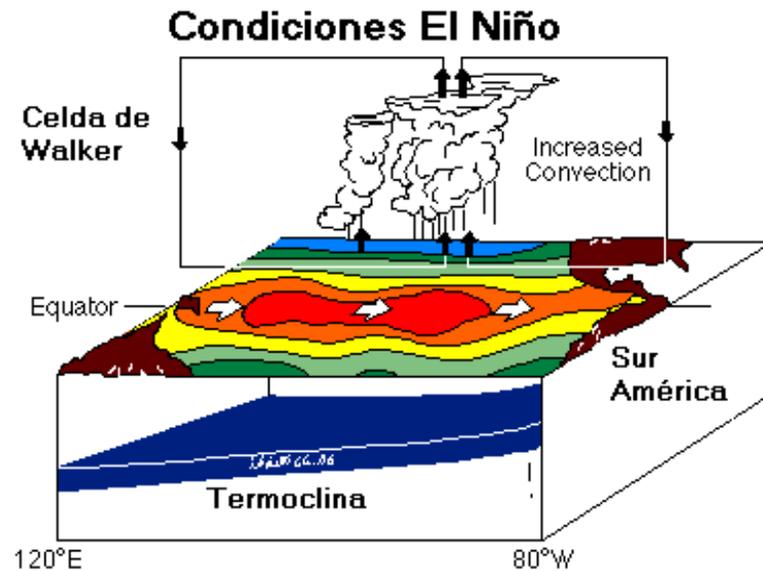


Figura 3.3. Condiciones El Niño del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. Fuente NOAA.

Bajo condiciones El Niño, los vientos Alisios que soplan hacia Australia en el Pacífico se debilitan, el arrastre de agua desaparece y la que ya estaba acumulada en Australia y Asia se desplaza hasta el centro y el oriente del Pacífico. La lluvia monzónica se traslada hacia la mitad del Océano Pacífico, pero también el calor alcanza las aguas superficiales en el pacífico oriental en las costas de Sur América, es allí donde llueve más de lo normal.

Durante El Niño la termoclina está menos profunda del lado Oeste y en el Este se ha profundizado sustancialmente con respecto a la condición normal, por lo que el agua fría en América del Sur disminuye y al no subir los nutrientes decae la población marina, disminuyendo la pesca en esa zona.

La clasificación de los eventos cálidos o fríos del ENOS muy recientemente han sido acordados y unificado por muchos países de América usando el indicador llamado ONI (Oceanic Niño Index) o Índice Oceánico del Niño en español,

caracterizado por anomalías en la media móvil de 3 meses de la temperatura de la superficie del mar de la región Niño 3.4 (Figura 3.3, Cuadro 3.1) menor o mayor a 0.5°C sobre el promedio mensual al menos 3 meses consecutivos. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

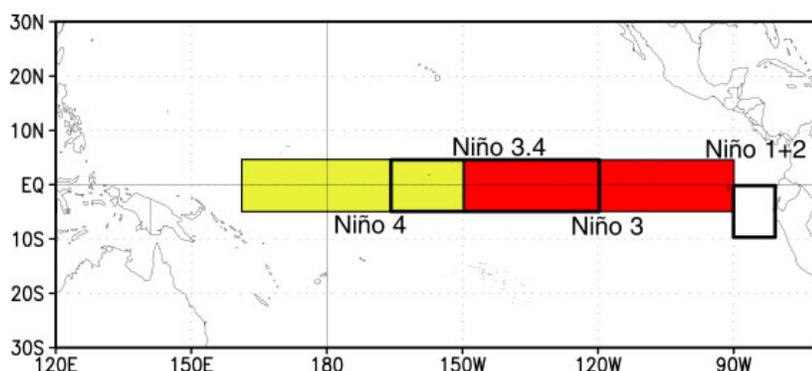


Figura 3.4: Áreas en el Océano Pacífico donde se miden las variables de El Niño. Fuente NOAA.

Región	Latitud	Longitud
Niño 1	5° S a 10° S	80° O a 90° O
Niño 2	0° a 5° S	80° O a 90° O
Niño 3	5° N a 5° S	90° O a 150° O
Niño 4	5° N a 5° S	150° O a 160° E
Niño 3.4	5° N a 5° S	90° O a 160° E

Cuadro 3.1. Zonas para los reportes referentes a El Niño.

Los años reconocidos como El Niño, se han presentado durante algunos meses o los siguientes años: 1968-1969, 1972-1973, 1976-1977, 1982-1983, 1986-1987, 1991-1995, 1997-1998, 2002-2003, 2004-2005, 2006. Los más fuertes han sido el de 1982-1983 y el de 1997-1998.

Las fases frías o La Niña, se han presentado durante algunos meses o los años: 1964, 1967-1968, 1970-1971, 1974-1976, 1984-1985, 1988-1989, 1995-1996, 1998-2000.

En los años Niño, estos se clasifican según la anomalía positiva de la temperatura que alcancen en un área del Océano Pacífico denominado Niño 3.4 como se muestra en el cuadro 3.2.

El Niño	Anomalía de la temperatura
Débil	$0.3^{\circ} \text{ C} < \text{Anomalía} < 0.8^{\circ} \text{ C}$
Fuerte	$0.8^{\circ} \text{ C} < \text{Anomalía} < 1.2^{\circ} \text{ C}$
Muy fuerte	$\text{Anomalía} > 1.2^{\circ} \text{ C}$

Cuadro 3.2. Clasificación de la fase cálida del ENOS "El Niño". Fuente NOAA.

Atlántico Tropical Norte

La región del Atlántico Tropical Norte o ATN comprendida entre los 6 a 22°N y los 15 a 80°W también ha sido estudiada recientemente como factor importante de cambio en el régimen de lluvia en Centro América, Alfaro (1999).

Se encontraron en varias investigaciones la relación directa o positiva entre dicho índice y las lluvias; además, ejerce una mayor influencia en el período de inicio de la época lluviosa entre abril o mayo que respecto al final de éstas.

También Alfaro (2000) al calcular los eventos fríos o cálidos del ATN encuentra un inicio de las fases durante el semestre de diciembre a mayo y un final durante el semestre de junio a noviembre. Elaboró además una clasificación

del ATN que se basa en las anomalías positivas sobre el último quintil (cálida) o por abajo del primer quintil (fría) de la media móvil de 5 meses, las fases cálidas han sido de Diciembre '62-Mayo '63, Febrero '69-Julio '70, Mayo '87-Septiembre '88, abril '95 - septiembre '96 y las fases frías son: Abril '71-Ago '72, Diciembre '73 - septiembre '76, Noviembre '84-Julio '85, Diciembre '85-Agosto '86, Enero '89-Junio '89, Enero '94 - Agosto '94.

En el mismo sentido Gray (1984) encontró un incremento (disminución) en la cantidad de huracanes en dicha región en la fase cálida (fría) de dicho parte del océano.

Usando la misma metodología se continuó con el cálculo desde el año '96 a la fecha, para encontrar las siguientes fases cálidas: Agosto '97 - Diciembre '98, Agosto '03-Abril '07 y fase fría de enero a abril 2001.

Se utilizó también el índice CAR que se ubica también en la región tropical del Océano Atlántico pero abarcando el Caribe.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.atl.indices>

<http://www.cdc.noaa.gov/Correlation/car.data> (Figura 3.5)

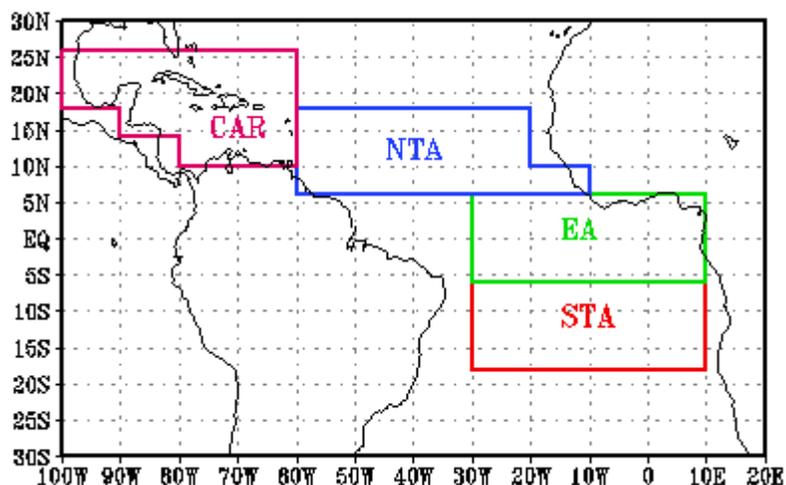


Figura 3.5. Ubicación geográfica de registros del índice CAR. Fuente NOAA.

Otros índices de los cuales no se conocen investigaciones elaboradas en El Salvador y los cuales serán usados aquí para explorarlo serán:

El índice PDO, Oscilación Decadal del Pacífico, un índice con una estacionalidad de 20 a 30 años, el cual se conoce afecta a Norte América, pues interactúa con el ENOS, por ejemplo en la fase fría predominan la Niña y lo contrario sucede en su fase cálida. <http://www.cdc.noaa.gov/ClimateIndices/List/#PDO>.

La Oscilación del Atlántico Norte (NAO) ejerce cambios en los patrones climáticos de los EUA, Europa y África, se relaciona con las diferencias de presión o dipolo entre Groenlandia y la norte del Atlántico, las que modifican el chorro en altura y trayectorias de tormentas, en la fase positiva se incrementa la temperatura en los EUA y Europa y la lluvia durante el invierno.

La Oscilación Cuasibienal o QBO (Quasi-Bienal Oscillation) se calcula sobre el flujo zonal del viento en un nivel alto de la atmósfera a 30mb sobre la región tropical, Alfaro y Amador (2001) encontraron que este tiene una periodicidad o

estacionalidad de casi 28 meses, la mitad del tiempo el flujo es del este y la otra del oeste, períodos con cortante este (oeste) en el viento zonal coinciden con fases frías (calientes) en la temperatura, en el mismo sentido Amador y Alfaro (1996) encontraron que en la fase este de la QBO se relacionaba con El niño e incrementos de temperatura sobre Costa Rica.

<http://www.cdc.noaa.gov/Correlation/qbo.data>

<http://www.imn.ac.cr/publicaciones/index.html>

3.3. La señal de los forzantes en El Salvador.

Sobre nuestro país la fase cálida del ENOS, conocida como El Niño, se asocia a una época lluviosa irregular, caracterizada por la disminución de las cantidades de lluvia acumuladas y un aumento de días secos consecutivos, inclusive se presentan canículas prolongadas o severas, en ocasiones durante el mes de junio, impactando drásticamente en las zonas bajas de la costa y especialmente los valles interiores del oriente del país, los déficit de lluvia afectan negativamente los suelos, la cobertura vegetal, los cultivos y la fauna.

En El Salvador, dentro de las áreas de influencia de años con sequías se encuentran, los embalses que producen la mayor parte de la energía hidroeléctrica, los asentamientos humanos cuyo abastecimiento de agua potable se hace con acueductos que se surten de fuentes de recarga anual y en esas zonas también se desarrollan actividades agrícolas para la producción de granos básicos como maíz, frijol y sorgo, de allí la problemática generada por la Canícula severa.

La relación entre la lluvia y la fase cálida del fenómeno ENOS indican que en julio y/o agosto el déficit se incrementa por la canícula severa, observándose esto

en la zona costera y el oriente de El Salvador, con mayor énfasis durante eventos fuertes y muy fuertes. En ocasiones cuando el evento El Niño es moderado no es claro la disminución de las lluvias en los meses mencionados arriba, en especial en la zona de los valles interiores y las montañas del norte (García y Fernández, 1996 b).

En el país han ocurrido períodos secos, como en el año 2001, que no fue provocado por El Niño, de hecho en aquella ocasión la sequia afectó gran parte de Centro América. Esta se originó por las anomalías de temperaturas frías del agua superficial del Océano Atlántico Tropical Norte (ATN), tal indicador o forzante ha sido poco estudiado. Durante el año 2001 el enfriamiento de las aguas causó la intensificación del anticiclón semipermanente de las Azores y el alargamiento en el sentido Este-Oeste de dicho sistema, desarrollándose un núcleo de alta presión en las capas bajas de la atmósfera en las cercanías del Golfo de México, comportándose como un “bloqueo” para el flujo del este, acelerando el flujo alisio o jet de bajo nivel el cual limita la formación de nubosidad convectiva y por tanto disminuyen las lluvias (Ramírez y Brenes, 2001).

También una fase cálida del ATN provoca incremento de huracanes en la cuenca del Atlántico y el Caribe, como ocurrió en el año 2005, por lo que es muy probable tener mucha lluvia sobre Centro América y El Salvador.

En la fase fría del ENOS o Niña se genera más inestabilidad en el área y por tanto más lluvias, estos excesos provocan desbordamientos e inundaciones, en especial sobre la zona costera donde desembocan los principales ríos.

Por lo antes descrito, las actividades socio económicas, la producción agropecuaria, la pesca y la generación de energía hidroeléctrica son impactadas

negativamente, ya sea por sequías asociadas a la presencia del fenómeno El Niño y los eventos fríos del ATN o por las inundaciones asociadas con La Niña y los eventos cálidos del ATN.

Las pérdidas estimadas durante el Niño '97-'98, en la que existió primero una sequía y luego inundaciones por el Huracán Mitch fue de ₡ 1,584.75 millones de colones (US \$ 181.1 millones), que representaron el 1.6% del PIB, en sectores como granos básicos, pesca, ganadería y caña. (OAPA, MAG).

Durante el año 2005, en una fase cálida del ATN, la combinación de la erupción del Volcán Ilamatepec y el Huracán Stan (temporada activa en el Atlántico) provocaron pérdidas en vivienda, educación, salud, agropecuarios, industria y otros de alrededor de 355 millones de dólares.