

ESCENARIOS CLIMATICOS DE REFERENCIA PARA LA REPUBLICA DE EL SALVADOR

Abel Centella

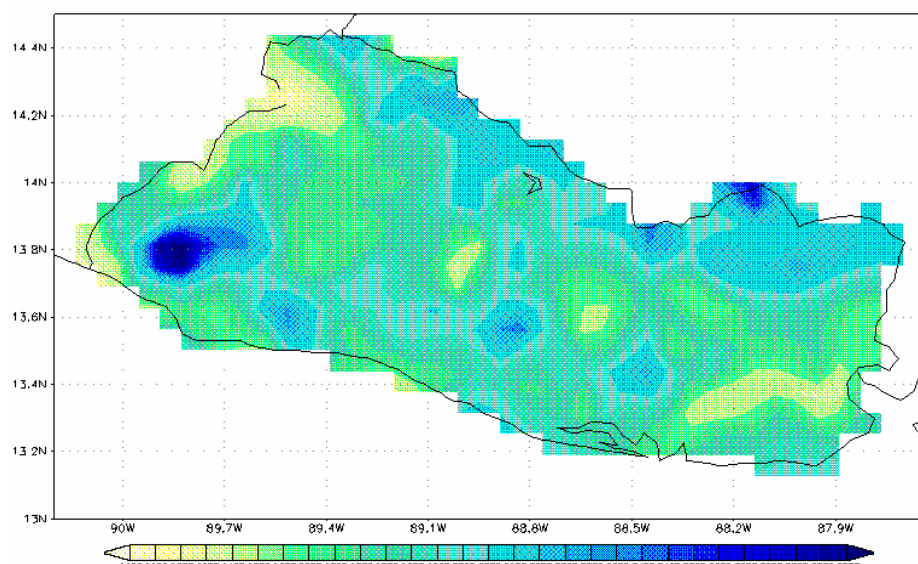
Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología de Cuba

Luis Castillo

Escuela de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador

Alfredo Aguilar

Escuela de Matemática, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador



Precipitación anual



CENTRO NACIONAL DEL CLIMA

San Salvador, julio 1998



TABLA DE CONTENIDO

	Página
Resumen	4
I. Introducción	5
II. Datos observacionales	6
III. Interpolación y creación de campos en rejilla	8
<i>III.1. Creación de la climatología inicial en puntos de rejilla</i>	<i>10</i>
<i>III.2. Creación de las series temporales en puntos de rejilla y preparación de la climatología final.....</i>	<i>12</i>
<i>III.3.. Análisis de los errores de la interpolación.....</i>	<i>14</i>
IV. Variaciones interanuales de la temperatura superficial del aire y la precipitación.....	15
<i>IV.1. Temperatura superficial del aire.....</i>	<i>16</i>
<i>IV.2. Precipitación.....</i>	<i>18</i>
V. Conclusiones.....	21
VI. Agradecimientos.....	22
VII. Referencias.....	22
Anexo I. Mapas de los promedios mensuales de temperatura y precipitación para el período 1961-1990.	
Anexo II. Descripción de la Base de Datos en Soporte Magnético	

Información General

El trabajo presentado en este documento fue realizado durante el mes de julio de 1998, como parte de las tareas realizadas en la creación de los escenarios de cambio climático para La República de El Salvador. Estos resultados serán utilizados en la evaluación del impacto de los cambios climáticos en diferentes sectores, la cual se realiza al amparo del Proyecto PNUD ELS97G32: Comunicación Nacional de Cambio Climático. El trabajo fue realizado en la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas bajo la dirección técnica de Abel Centella Artola del Centro Nacional del Clima, del Instituto de Meteorología de Cuba.

Los autores de este informe se hacen responsables por cualquier omisión o error en la información, excluyendo de cualquier compromiso al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y a la Secretaría del Medio Ambiente.

Si los resultados de este informe o la base de datos que lo acompaña son utilizados, por favor, sirvase a citarlo de la siguiente manera:

Centella, A., L. Castillo y A. Aguilar, 1998: Escenarios climáticos de referencia para la República de El Salvador, PNUD ELS97G32, San Salvador, El Salvador, 21 pp.

Resumen

Se describe la nueva climatología desarrollada para la República de El Salvador, la cual ha sido creada para ser utilizada como escenario climático de referencia en la evaluación de los impactos del cambio climático en el país. A partir de los datos disponibles, fue generada una base de datos en puntos de rejilla con una resolución de 5 minutos latitud/longitud, la cual está compuesta por la climatología 1961-1990 y por las series temporales de ambas variables para el mismo período de tiempo. Los resultados obtenidos muestran que la climatología generada permite describir los principales rasgos de la estructura estacional y espacial del clima del país, así como las variaciones interanuales observadas en las series de tiempo. En general se pudo observar la existencia de una tendencia estadísticamente significativa hacia el incremento de los valores de temperatura, que en términos medios indica un calentamiento del orden de los 1.2 °C. Para las precipitaciones, sin embargo, las tendencias estimadas no fueron significativas. Para la precipitación se detectó la existencia de variaciones interanuales significativas en el rango de 3 años, las cuales parecen estar asociadas con los efectos del evento el Niño/Oscilación del Sur. Las evidencias observacionales sugieren que la señal ENOS presenta una fuerte relación con el régimen de lluvias en el país, la cual aparece desfasada entre 1 y 2 meses. De acuerdo con los resultados obtenidos y tomando en cuenta la documentación que pudo ser consultada, es posible expresar que la climatología generada ofrece nuevas oportunidades para las investigaciones climáticas en el país, principalmente aquellas relacionadas con las variaciones climáticas y el desarrollo de esquemas de predicción climática a corto plazo. Lo anterior se hace evidente, si se considera que, por primera vez, se determinó la relación estadística y su significación entre las variaciones de las precipitaciones y las temperaturas en el país y un indicador de las condiciones relacionadas con el evento El Niño/Oscilación del Sur. La posibilidad de investigar con mayor profundidad los modos de variación climática temporal y espacial es ahora mayor, al contar con una base de datos de buena calidad, adecuada resolución espacial y con series temporales de una duración aceptable para ese tipo de estudios.

I. Introducción

La evaluación de los posibles impactos del cambio climático es un proceso que involucra varias etapas. Dentro de ellas, la construcción de los escenarios de cambio climático es una de las de mayor importancia, pues de los mismos pueden depender la magnitud y dirección de los resultados de la evaluación en los sectores seleccionados como unidades de exposición. Es por eso, que dicha etapa debe ser cuidadosamente planeada, de manera que las decisiones puedan ser balanceadas adecuadamente.

Uno de los requerimientos básicos en la creación de los escenarios climáticos, es la preparación de la referencia o línea base climática. Esta referencia debe ser elaborada de forma que permita tipificar las condiciones climáticas actuales, y de acuerdo con Carter *et. al.* (1992), su creación está determinada por varios aspectos, entre los cuales se encuentran: i) ser representativa de las condiciones climáticas medias recientes en la región de interés; ii) ser de suficiente duración para poder considerar un rango importante de variaciones climáticas, incluyendo un número significativo de anomalías (p. ej. sequías severas, períodos anormalmente fríos, etc.), tales anomalías permitirían evaluar los impactos de la variabilidad climática extrema en condiciones actuales; iii) representar un período para el cual los datos son abundantes, fácilmente accesibles y adecuadamente distribuidos en el orden espacial; iv) incluir datos de adecuada calidad; y v) ser consistente o fácilmente comparable con las referencias utilizadas en estudios desarrollados sobre otras regiones.

A pesar de que en ocasiones todos los requerimientos anteriores no pueden ser reunidos en una referencia climática, existe el consenso de que un período de 30 años es suficientemente prolongado para calcular, con significación estadística, distribuciones de frecuencia de diferentes variables y para obtener una buena representación de algunas características de la variabilidad del clima, sobre todo aquellas relacionadas con la variabilidad interanual (Parry y Carter, 1998). Las variaciones de muy baja frecuencia (e.g. interdecadales o múltidecadales), sin embargo, difícilmente pueden ser captadas dentro períodos de esta duración. El empleo de 30 años para crear la referencia climática está en línea con las normas de la Organización Meteorológica Mundial y es un período temporal lo suficientemente corto, como para garantizar una adecuada cobertura espacial de las estaciones de observación y garantizar, de esta forma, que aparezcan descritos adecuadamente los rasgos que caracterizan el clima de una región.

El desarrollo de una línea base climática puede realizarse por varias vías. En algunos casos se pueden desarrollar climatologías para una serie de estaciones meteorológicas individuales, las cuales son seleccionadas para representar los rasgos fundamentales del clima de una región. En otros casos, los valores de las estaciones pueden ser interpolados sobre rejillas regulares con una resolución espacial lo suficientemente grande. Un método que también resulta adecuado es la preparación de promedios espaciales considerando áreas cuyas características climáticas sean similares.

La selección de una u otra vía para generar la referencia climática está en dependencia de las exigencias y necesidades de los estudios que evaluarán el impacto del clima sobre las diferentes unidades de exposición, de las características físico-geográficas y

dimensiones de las unidades de exposición y de la cobertura espacial de la información climática.

El objetivo de este documento es explicar como fue preparado el escenario de referencia climático para la República de El Salvador. Esta referencia climática se generó sobre una rejilla regular, con una resolución de 5 minutos latitud/longitud, considerando estrictamente el período 1961-1990. Las variables climáticas involucradas son la temperatura superficial del aire y la precipitación. En la sección II se describen las características más importantes de los datos iniciales. La sección III se dedica a explicar la metodología utilizada para realizar la interpolación y crear los campos climatología y de las series temporales en puntos de rejilla. En la cuarta sección se realiza un análisis de las variaciones observadas en las series de temperatura y precipitación de El Salvador durante el período considerado. Finalmente, se presentan algunas conclusiones generales.

II. Datos observacionales.

Los datos observacionales utilizados en este trabajo son las medias mensuales de temperatura y precipitación, calculadas a partir de las observaciones que realiza la red de estaciones meteorológicas perteneciente a la Dirección General de Recursos Naturales Renovables del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Según Chacón (1998, comunicación personal) la División Técnica de Meteorología e hidrología (en lo sucesivo Servicio Meteorológico Nacional) realiza el cálculo de la temperatura media mediante la expresión:

$$T_m = \sum t_d / n \quad \text{con} \quad t_d = (t_{07} + t_{14} + 2t_{21}) / 4 \quad (\text{II.1})$$

donde: T_m es la temperatura media mensual, t_d es la temperatura media diaria, n es la cantidad de días involucrados, t_{07} , t_{14} , t_{21} son las temperaturas secas del aire registradas a las 07, 14 y 21 horas, respectivamente.

En general, los datos recopilados pueden dividirse en dos categorías. La primera categoría quedó integrada por los promedios mensuales históricos. Aquí se incluyeron los valores medios históricos mensuales de precipitación y temperatura generados por Engels *et. al* (1998), a partir de las observaciones realizadas en 46 estaciones climatológicas principales durante el período 1960-1992. Según Engels (comunicación personal) estos promedios históricos fueron generados luego de una exhaustiva revisión de la información inicial. A este grupo de datos se adicionaron los promedios históricos de precipitación mensual de 181 estaciones meteorológicas adicionales los cuales forman parte del archivo de datos histórico del Servicio Meteorológico Nacional. La Figura 1 muestra la distribución espacial de todas las estaciones con datos promedios históricos de precipitación, mientras que en la Figura 2 aparecen las estaciones cuyos promedios históricos de temperatura estuvieron disponibles.

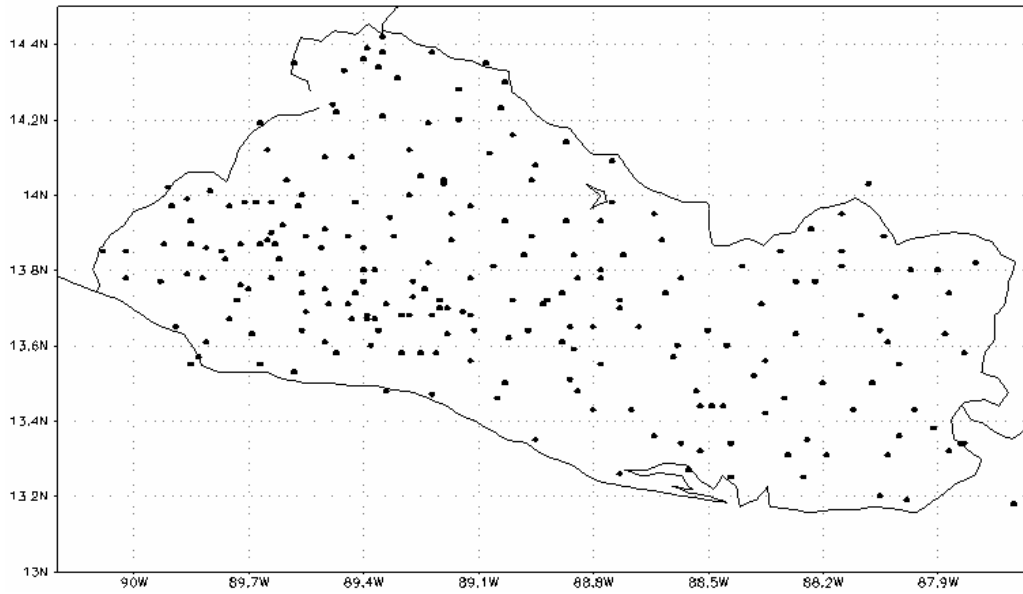


Figura 1. Distribución de las 234 estaciones meteorológicas con valores promedios mensuales históricos (46 estaciones: Engels *et. al* (1998) y 181 estaciones: archivos de promedios históricos del Servicio Meteorológico Nacional).

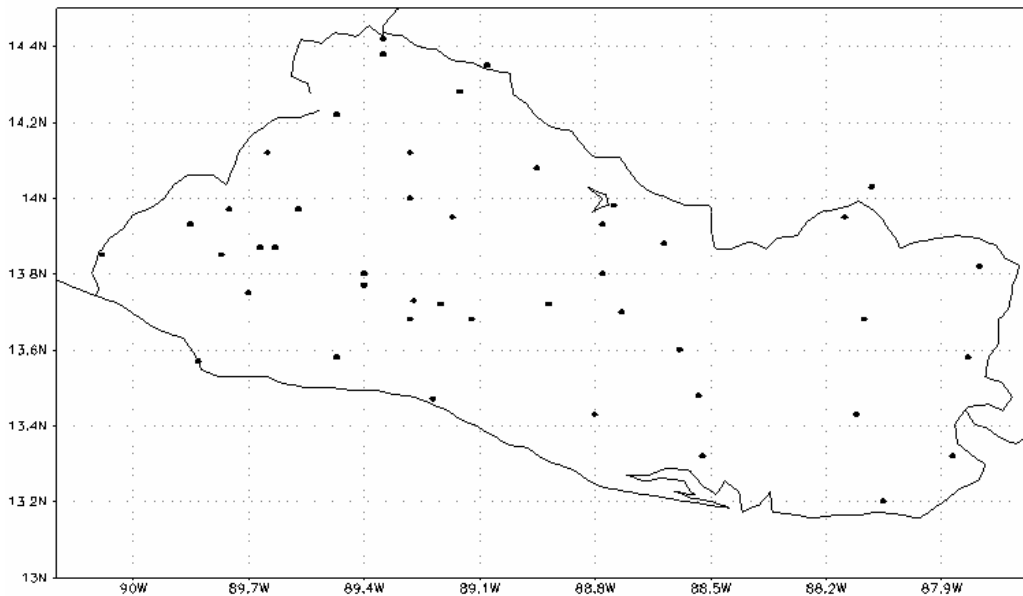


Figura 2. Distribución espacial de las 46 estaciones con promedios históricos de temperaturas mensuales.

La segunda categoría la integraron las series temporales de medias mensuales de temperatura y totales mensuales de precipitación correspondientes a 46 estaciones meteorológicas, las cuales coinciden con las utilizadas por Engels *et. al.* (1998) y cuya distribución espacial es la misma que se muestra en la Figura 2. Las series de tiempo de estas estaciones estuvieron disponibles para períodos de tiempo diferentes dentro de los años 1961 y 1990, reflejando una variación en el número de estaciones con el transcurso del tiempo (Figura 3). Nótese que hacia inicios de la década de los años 70

se produce un incremento significativo en la cantidad de estaciones, para después reducirse paulatinamente, quizás a causa del conflicto bélico que existió en el país durante la década de los años 80.

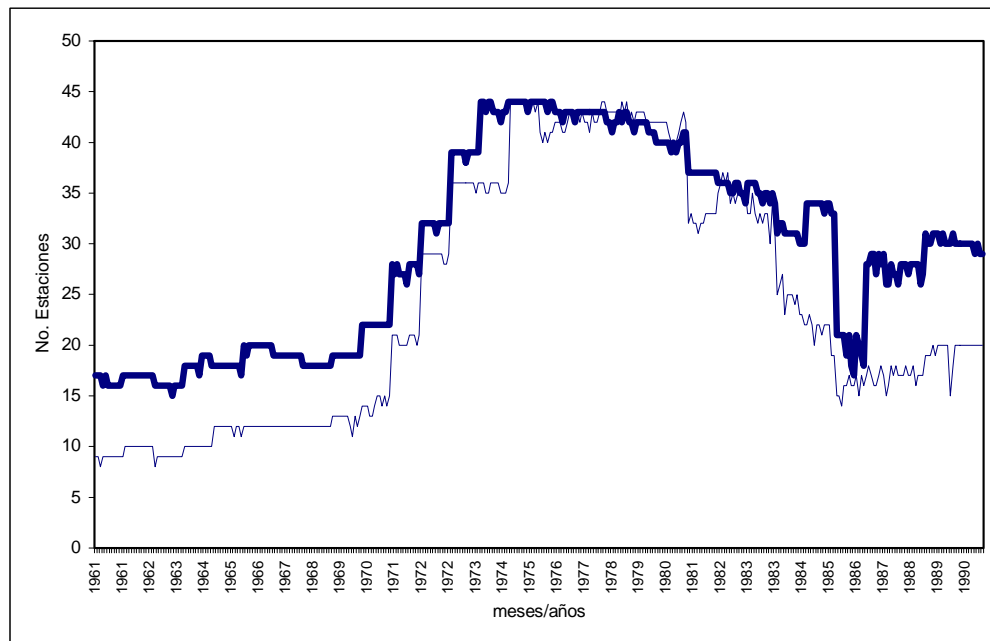


Figura 3. Variación de la cantidad de estaciones por meses y años cuyas series temporales de temperatura superficial del aire (línea continua) y precipitación (línea gruesa) estuvieron disponibles.

III. Interpolación y creación de campos en rejilla.

La interpolación de datos desde localidades distribuidas irregularmente hacia una rejilla uniforme ha sido objeto de atención de múltiples trabajos desarrollados en el campo de la meteorología. Diversos esquemas de interpolación han sido utilizados para crear rejillas regulares de diferentes variables meteorológicas, ellos van desde métodos relativamente simples como el de Thiessen (Thiessen, 1911) hasta los sofisticados métodos geoestadísticos como el Kriging.

Para realizar la interpolación de los valores de las estaciones meteorológicas hacia una rejilla de 5 minutos latitud/longitud (Figura 4), se utilizó la versión 1.7beta9 del Sistema de Visualización y Análisis en Rejilla (GrADS, por sus siglas en inglés), un software desarrollado por el Centro para Estudios Tierra-Océano-Atmósfera de la Universidad de Maryland de los Estados Unidos. El esquema de interpolación incorporado en GrADS es el conocido método de Cressman, el cual ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones de la meteorología y aparece detallado en Cressman (1959).

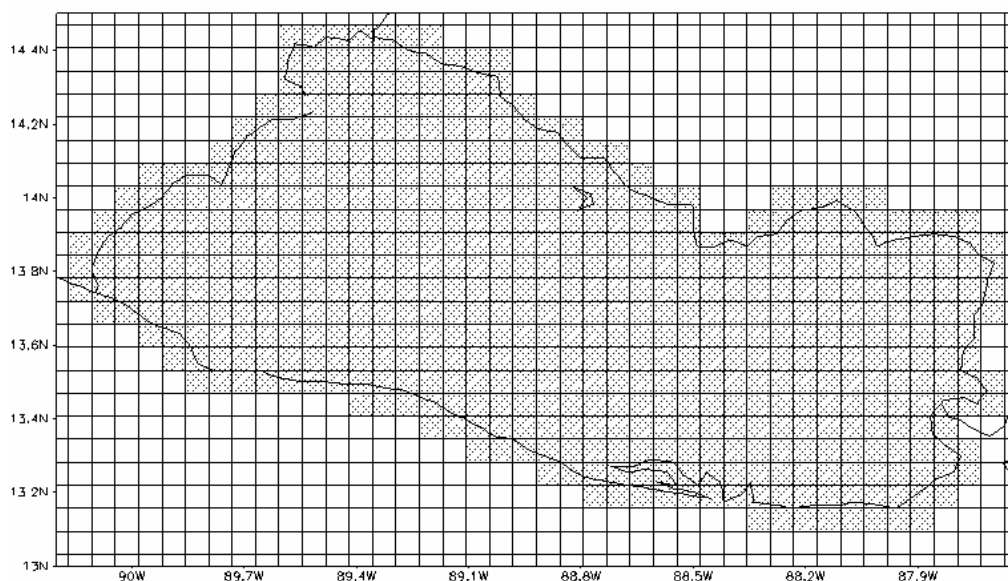


Figura 4. Rejilla de 5 minutos latitud/longitud utilizada para la creación de la climatología de temperatura y precipitación. El área sombreada corresponde a la máscara de puntos válidos para la república de El Salvador.

En sentido general, el método de Cressman se basa en la realización de diferentes niveles de interpolaciones, cuya cantidad está determinada por el número de radios de influencia que se especifique. En cada nivel de interpolación, el valor de cada punto de rejilla se determina utilizando los valores de las estaciones que se encuentren dentro del radio de influencia. Antes de pasar al siguiente nivel (siguiente radio de influencia) se realiza una estimación de errores, los cuales son utilizados para producir un factor de corrección, que es aplicado a cada punto de rejilla. Los factores de corrección son estimados mediante una fórmula de distancia ponderada.

Dentro de cualquier esquema de interpolación que se utilice para estimar campos de variables climáticas sobre una rejilla, resulta conveniente considerar el relieve. En el caso de El Salvador, la incorporación del relieve es imprescindible pues en este país, de aproximadamente 21 000 km² de extensión, se observa una estructura topográfica muy compleja, la cual es el principal elemento que origina las mayores diferencias espaciales en el clima.

Atendiendo a lo anterior, se generó una rejilla de alturas que fuera representativa de las características topográficas más importantes del país y que sirviera como variable predictora en el proceso de interpolación de la temperatura. La rejilla de alturas fue creada con la información obtenida del modelo de elevación digital (DEM), disponible en <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/globsys/topo.html>, la cual fue corregida con los datos extraídos de la edición de 1973 del Mapa Oficial de El Salvador escala 1:300 000, preparado por el Instituto Geográfico Nacional del Ministerio de Obras Públicas. Como se puede apreciar en la Figura 5, las principales estructuras del relieve salvadoreño fueron captadas adecuadamente, lo cual es un elemento que ofrece garantías en la utilización de esta información.

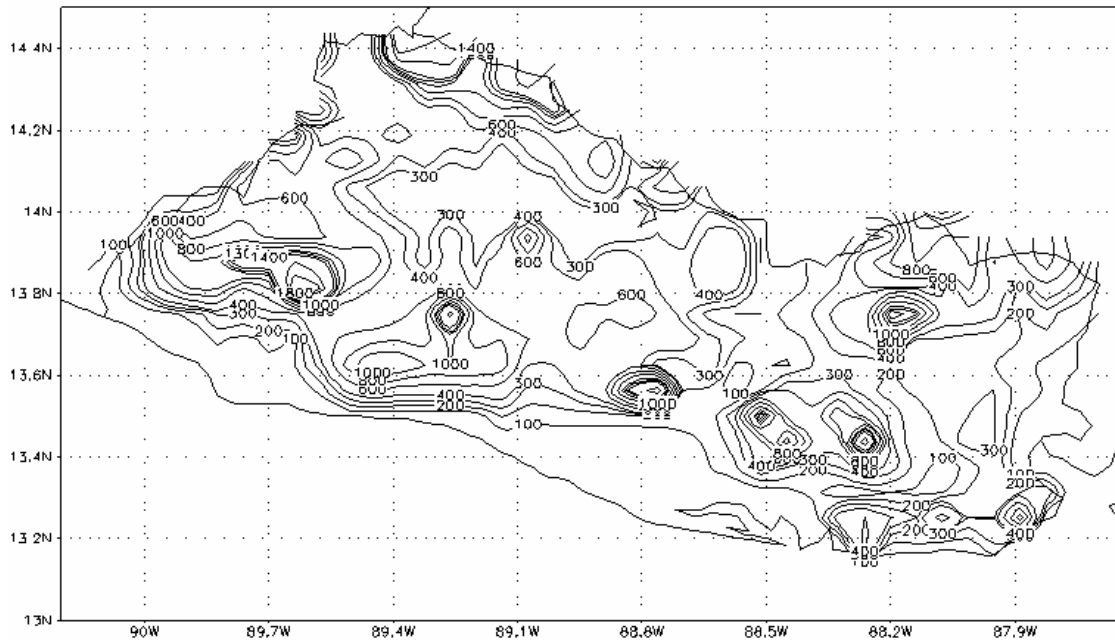


Figura 5. Mapa de topográfico de la República de El Salvador generado en este estudio.

III.1. Creación de la climatología inicial en puntos de rejilla.

Para producir los campos medios de temperatura se utilizaron todas las estaciones con promedios históricos y se introdujo el relieve como una variable predictora de importancia. La combinación de la información dada por el relieve con el campo de temperaturas se realizó mediante el método de la interpolación inteligente ("smart" interpolation), la cual se basa en el empleo de los conocimientos de aquellos factores que, como el relieve, influyen sobre las variaciones espaciales de un determinado fenómeno (Willmott y Matssura, 1995).

Conociendo que las variaciones de la temperatura con la altura (Δt_h) son del orden de $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100$ metros, se procedió primero a generar un campo en el cual se interpolaron los valores de las estaciones reducidos al nivel del mar. La reducción de estos valores se realizó mediante la expresión:

$$T_{nm} = T_e + \Delta t_h * h \quad (\text{III.1})$$

donde T_{nm} : es la temperatura reducida al nivel del mar para una estación, T_e : es la temperatura observada en la estación y h es la altura de la estación.

El campo de temperaturas reducidas a la altura cero, fue entonces combinado con la rejilla de relieve para obtener el campo final mediante

$$T_{gi} = T_{0i} - \Delta t_h * R_{hi} \quad (III.2)$$

donde T_{gi} : temperatura corregida por la altura para el i ésimo punto de la rejilla, T_{0i} : es la temperatura reducida a nivel del mar para el i ésimo punto de la rejilla y R_{hi} : es el valor de la altura en metros del i ésimo punto de la rejilla de relieve.

En el caso de la precipitación, como la relación con el relieve es mucho más compleja, dicho predictor no fue considerado directamente en la creación de los campos. Sin embargo, la gran densidad de estaciones que estuvo involucrada en este caso (Figura 1), facilita que las variaciones de esta variable climática con relación al relieve, puedan ser captadas con bastante precisión.

Las Figuras 6 y 7 presentan los resultados de los campos anuales de temperatura y precipitación. Estos resultados fueron comparados con otros análisis generados para el país (Guzmán, 1995; Engels et. al. 1998) encontrándose la existencia de una gran similitud, tanto en la forma de los campos como en las magnitudes a ellos asociadas. Sin embargo, es conveniente destacar que dichas comparaciones fueron realizadas únicamente de forma visual, debido a que la información a la que se tuvo acceso, o bien fue producida por métodos manuales de interpolación, o sólo estuvo disponible en gráficos impresos.

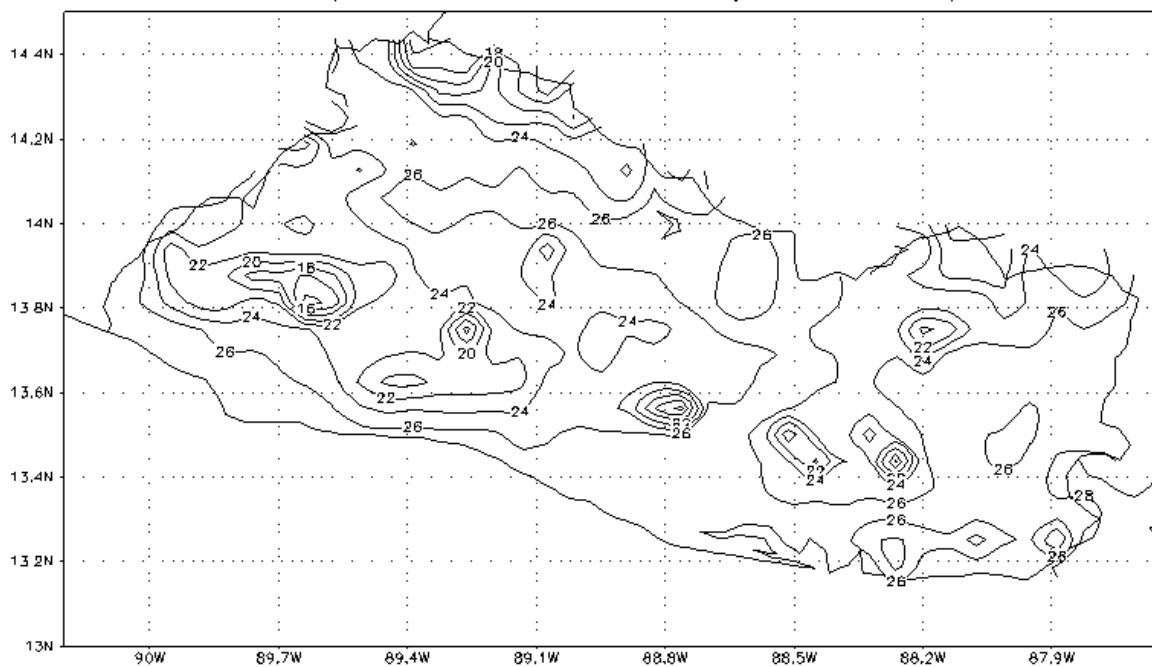


Figura 6. Campo de la temperatura media anual del aire para la climatología inicial.

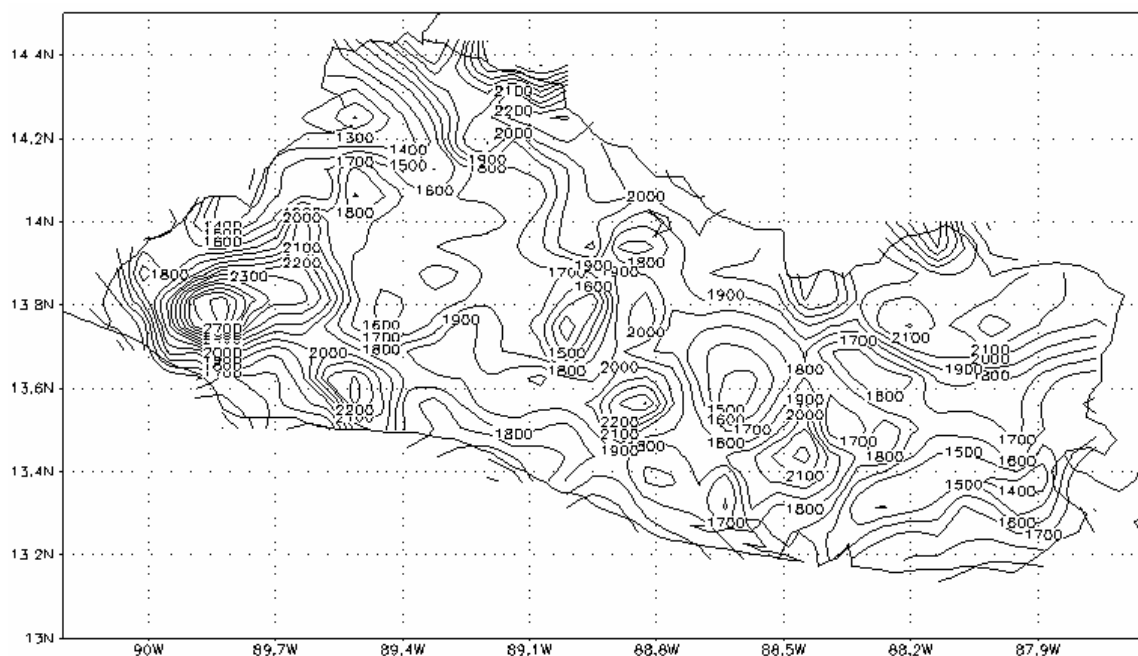


Figura 7. Campo de la precipitación anual para la climatología inicial

III.2. Creación de las series temporales en puntos de rejilla y preparación de la climatología final.

La preparación de series de tiempo en rejillas fue realizada utilizando el método propuesto por Willmott y Robeson (1995). Este método, denominado por esos autores como Interpolación Climatológicamente Asistida (ICA), parte de la idea de realizar la interpolación directa de las series de tiempo, desde las estaciones hacia una rejilla uniforme, separando las componentes espaciales y temporales. Para ello, primero se construye una climatología media (promedios de muchos años) de alta resolución de la variable climática de interés y seguidamente, se producen rejillas de anomalías mensuales, relativas al período para el cual fue definida la climatología. Los campos de la climatología y de las anomalías son entonces combinados para producir las rejillas de series de tiempo de la variable.

La creación de los campos promedios para muchos años debe realizarse con un elevado grupo de estaciones, de manera que los rasgos de las variaciones espaciales sean captados adecuadamente. Para el caso de los campos de anomalías, como estas tienden a ser función de los patrones de circulación atmosférica de gran escala y son relativamente independientes de las características morfológicas, una cantidad inferior de estaciones puede ser suficiente para describir sus variaciones. La ventaja práctica que este método ofrece es que, con frecuencia, es mucho más fácil acceder a un mayor número de estaciones con promedios históricos disponibles que con series temporales.

Para producir las series temporales de precipitación y temperatura en rejillas uniformes sobre El Salvador, se empleó la ICA, utilizando los campos de la climatología inicial

descritos en la sección III.1 y las series temporales de anomalías mensuales para el grupo de estaciones que se describió dentro de la segunda categoría en la sección II.

Un análisis de la calidad de las series temporales permitió detectar algunas estaciones cuyas series de temperatura ofrecían dudas importantes y al no poder ser revisadas, fueron eliminadas del análisis. De esta forma se utilizaron 46 estaciones para precipitación, mientras que 35 fueron empleadas para la temperatura.

Después de combinar las series de anomalías con los campos de la climatología inicial, se obtuvieron rejillas de valores mensuales de temperatura y precipitación para el período 1961-1990. Dichas rejillas fueron nuevamente promediadas para generar los nuevos campos que representan la climatología para la República de El Salvador en el período 1961-1990.

Si se analizan los resultados mostrados en la Tabla 1 y en las dos primeras figuras del Anexo I, se hacen evidentes rasgos del clima de El Salvador que han sido descritos por otros autores (e. g. Guzmán, 1995). Estos se refieren a la existencia de una variación térmica anual relativamente pequeña, con la ocurrencia de los mayores valores hacia el mes de abril y una disminución hacia los meses de diciembre y enero, que aparecen como los más fríos del año. En el caso de las precipitaciones se aprecia el gran contraste en la distribución mensual de los acumulados de lluvia, el cual establece la clara diferenciación entre el período seco y lluvioso. También se puede observar la relativa reducción de los totales de lluvia que se produce durante los meses de julio y agosto, asociada a la canícula o veranillo, como comúnmente se les denomina.

Tabla 1. Valores de la media, desviación estándar (D. S.), mínimo (Mín.) y máximo (Máx.) para la temperatura y la precipitación por meses, trimestres y anuales para el período 1961-1990.

Mes	Precipitación				Temperatura			
	Media	D. S.	Min.	Max.	Media	D. S.	Min.	Max.
Enero	3.7	5.3	0.7	26.2	23.9	0.6	22.6	25.5
Febrero	3.7	4.2	0.7	16.4	24.4	0.8	22.7	26.2
Marzo	14.7	11.7	3.4	52.3	25.7	0.6	24.8	27.0
Abril	53.2	28.1	19.5	113.1	26.4	0.6	25.0	27.7
Mayo	194.8	54.2	85.8	327.8	26.0	0.6	25.0	28.0
Junio	339.1	67.5	198.0	484.4	25.0	0.6	23.9	26.2
Julio	263.2	77.6	126.3	424.0	25.1	0.6	24.1	26.0
Agosto	296.8	67.8	151.2	507.0	24.9	0.6	23.9	26.2
Septiembre	368.6	74.7	237.9	503.5	24.4	0.5	23.6	25.8
Octubre	228.9	73.3	65.7	380.3	24.4	0.4	23.7	25.2
Noviembre	49.2	43.0	8.8	163.0	24.1	0.7	22.6	25.8
Diciembre	7.7	8.4	0.6	36.2	23.8	0.7	22.1	26.0
DEF	15.1	11.0	2.9	48.3	24.1	0.5	23.3	25.2
MAM	262.7	53.1	165.0	392.8	26.0	0.5	25.2	27.1
JJA	899.2	130.8	660.8	1198.8	25.0	0.5	24.2	26.0
SON	646.7	119.0	374.0	888.8	24.3	0.5	23.5	25.5
Anual	1823.6	172.4	1525.8	2127.2	24.8	0.5	24.2	25.9

En el Anexo I aparece una serie completa de mapas con los patrones mensuales de temperatura y precipitación.

III.3. Análisis de los errores de la interpolación.

El análisis de los errores asociados a la interpolación es un aspecto de notable importancia y en pocas oportunidades se le dedica la atención necesaria (New et. al. 1997). En nuestro caso, el análisis de los errores tiene como objetivo fundamental que los usuarios de los datos producidos puedan realizar las consideraciones adecuadas sobre su empleo, así como evaluar adecuadamente los resultados que se obtengan al utilizar los mismos. El análisis de los errores también facilita que los resultados de estimaciones futuras puedan ser comparados y validados con mayor precisión.

La determinación de los errores se realizó calculando las diferencias absolutas entre los valores reales y estimados para cada estación. Los valores estimados para las estaciones se obtuvieron realizando una interpolación bilineal de las magnitudes obtenidas previamente para cada punto de rejilla. Debe notarse que este método tiende a maximizar la magnitud de los errores pues, además de considerar las desviaciones propias del método de Cressman, también puede aportar información sobre la interpolación bilineal.

La Figura 10 presenta los errores medios absolutos (MAE) resultantes de la interpolación. En general, todos los errores fueron muy bajos y se agruparon en el rango de 0.05 a 0.25 °C , con un incremento de las magnitudes para los cuatro primeros meses y una posterior reducción en el resto del año.

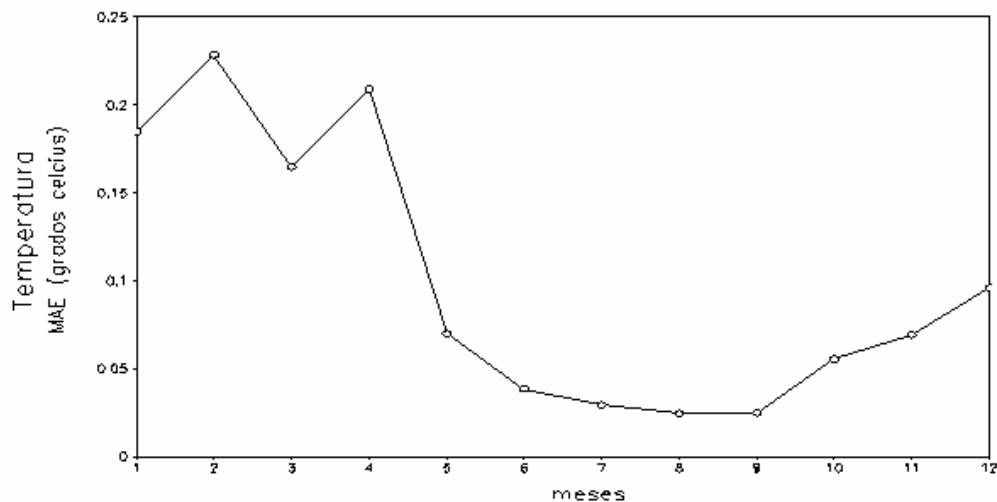


Figura 10. Errores medios absolutos (MAE) mensuales de la interpolación de los promedios de temperatura superficial del aire.

Para el caso de la precipitación (Figura 11) los mayores errores porcentuales se observan en los meses de la época menos lluviosa del año, lo cual parece estar condicionado por la pequeña magnitud de los registros de lluvia durante esos meses. Esto significa que el método utilizado en la interpolación, la red de estaciones utilizada, o ambos, no son totalmente adecuados para representar con gran precisión los campos

de precipitaciones cuando los valores de lluvia son muy bajos. No obstante, los errores relativamente pequeños que se obtienen para el resto del año, ofrecen confianza en la validez de los resultados alcanzados.

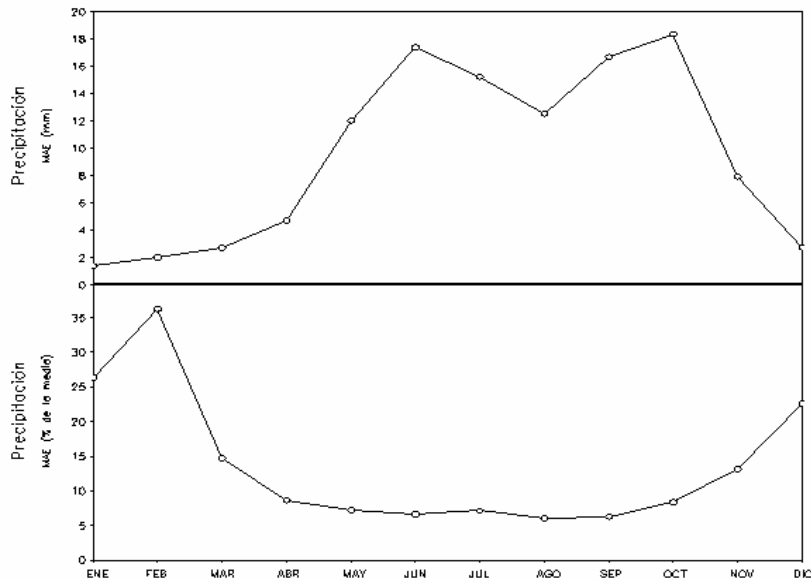


Figura 11. Errores medios absolutos (MAE) mensuales expresados en milímetros y en % de la media de cada mes para la interpolación de los promedios de precipitación.

IV. Variaciones interanuales de la temperatura superficial del aire y la precipitación.

El clima de El Salvador, como el de la mayoría de los países localizados en la zona tropical, presenta una variación relativamente pequeña en sus valores medios, en comparación con otros lugares ubicados en latitudes más altas. A pesar de ello, de año en año se producen anomalías climáticas que ocasionan un impacto considerable en la vida económica y social del país.

El adecuado conocimiento de las variaciones climáticas sobre diferentes escalas temporales facilita la creación de capacidades para adoptar las medidas más adecuadas que permitan reducir los impactos adversos y sacar ventaja de aquellos que resulten positivos. Este aspecto tiene gran validez dentro de la evaluación de los posibles impactos del cambio climático, toda vez, que al examinar los efectos del clima actual sobre diferentes sectores socioeconómicos, facilita la elaboración de estrategias de respuesta más apropiadas, para adaptarse a los cambios climáticos futuros.

De acuerdo con lo expresado arriba, en esta sección se ofrecen los resultados del análisis de las variaciones interanuales observadas en la temperatura superficial del aire y la precipitación durante el período 1961-1990. Para ello se estimaron las tendencias lineales de las series de ambas variables considerando sus promedios para todo el país. También fue realizado un análisis espectral de las mismas con el fin de poder

identificar la posible existencia de ciclos o "modos de variación" significativos que permitieran ofrecer una caracterización más precisa.

IV.1. Temperatura superficial del aire.

Una simple inspección de la serie de temperatura superficial del aire para El Salvador (Figura 12), permite apreciar el notable incremento de sus magnitudes hacia los años de la década de los 80. En efecto, los valores estimados de las tendencias lineales indican la ocurrencia de un proceso de calentamiento de aproximadamente 0.04°C/año , lo cual significa que, durante el período 1961-1990, la temperatura media anual aunmetó en aproximadamente 1.2°C . La década de los 80 fue la más cálida del período considerado, teniendo a 1987, 1990 y 1983 como los tres años más calientes (anomalías de 1.1°C , 0.8°C y 0.7°C , respectivamente).

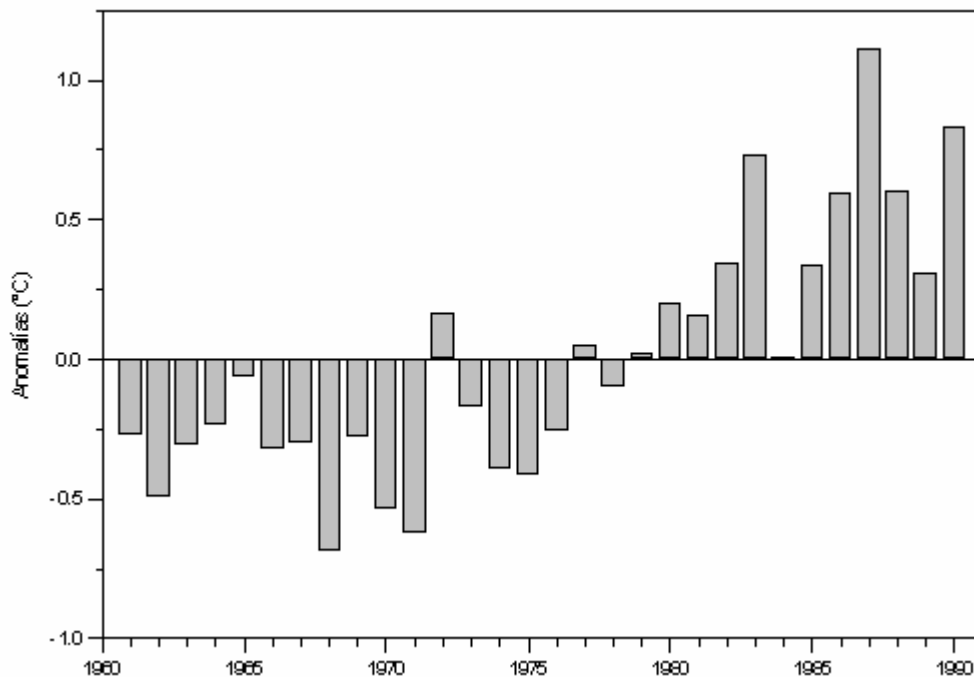


Figura 12. Anomalías de la temperatura superficial del aire El Salvador, referidas a la media del período 1961-1990.

Para todos los trimestres del año (Figura 13) también se observaron incrementos significativos, los cuales son ligeramente más intensos en los trimestres de diciembre-febrero y junio-agosto.

Es importante notar que las anomalías anuales de la temperatura muestran un cambio importante en sus magnitudes a mediados de la década de los años 70, el cual es consistente con el significativo calentamiento de las capas bajas de la tropósfera que se inició alrededor de esos años (Naranjo y Centella, 1997). También guarda relación con

los resultados obtenidos por Centella (1997) en el análisis de las variaciones de la temperatura superficial del aire en Cuba.

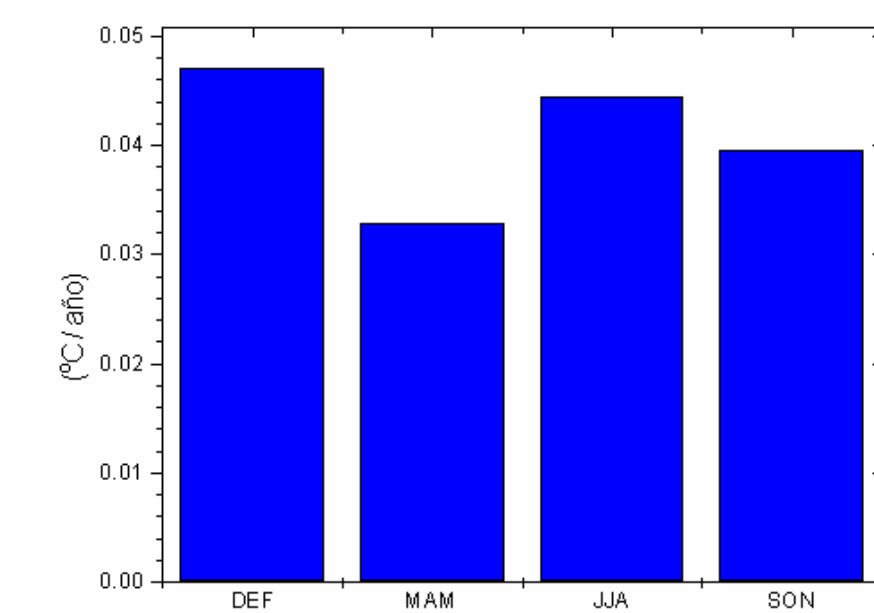


Figura 13. Tendencias estimadas (°C/año) para las temperaturas medias por trimestre.

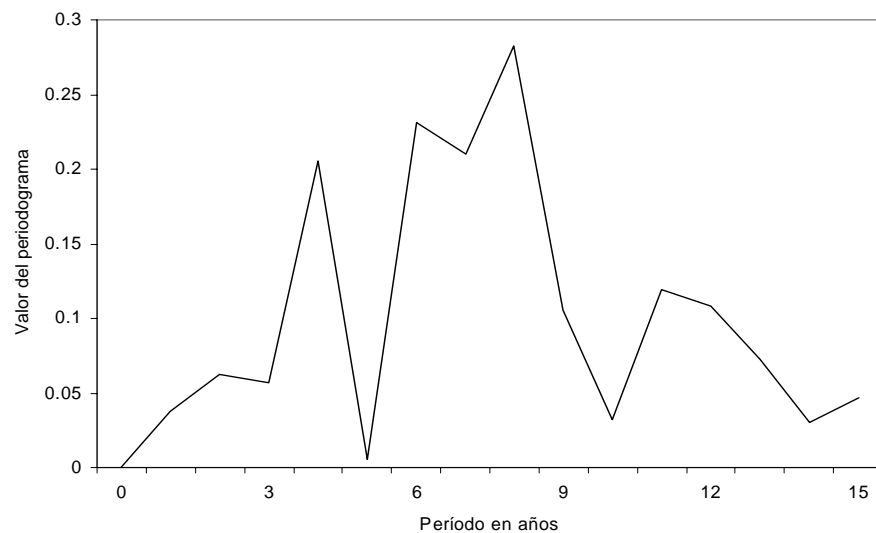


Figura 14. Periodograma de las anomalías de temperatura mostradas en la figura 12.

En la Figura 14 se muestran los resultados del análisis espectral realizado a la serie anual de anomalías de temperatura, a la cual se le eliminó previamente la tendencia mediante una función cuadrática. Como puede apreciarse, aparecen señales que parecen indicar la existencia de variaciones cíclicas en el rango de 4 a 8 años. Sin embargo, mediante el empleo de un estadístico F de Fisher (Wei 199X) se pudo determinar que ninguna de las señales fue estadísticamente significativa, por lo cual no es posible llegar a conclusiones definitivas sobre este aspecto.

IV.2. Precipitación

Una de las características más sobresalientes de la serie de precipitaciones anuales para el período temporal considerado (Figura 15) es la existencia alterna de períodos de importantes déficit de precipitación, con otros donde los acumulados fueron bastante superiores a los promedios históricos. A diferencia de la temperatura, en este caso la tendencia estimada para los valores anuales, no fue significativa desde el punto de vista estadístico e indicó una reducción de apenas 0.38 mm/año. Aunque pequeña, esta tendencia a la reducción de los totales anuales de lluvia, parece estar condicionada por la disminución de las precipitaciones registradas en los meses del trimestre septiembre-noviembre.

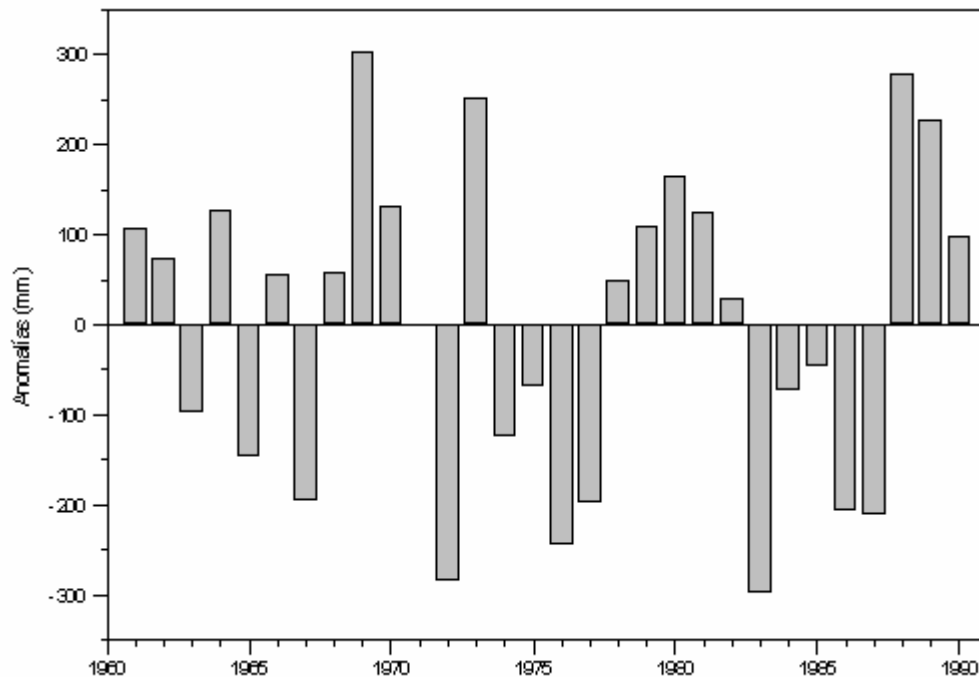


Figura 15. Anomalías de los totales de precipitación en El Salvador referidas a la media del período 1961-1990.

La imagen ofrecida por la Figura 15 permite apreciar que los períodos de reducciones intensas en la cantidad anual de lluvia acumulada parecen estar relacionados con aquellos años donde se desarrolló el evento El Niño/Oscilación del Sur (ENOS). De hecho, los resultados del análisis espectral realizado a la serie de anomalías anuales de precipitación, permiten indicar la existencia de señales relacionadas con variaciones del orden de 3 a 6 años, de las cuales la única que resultó significativa (nivel de significación de 0.05) fue la de frecuencia más alta (Figura 16).

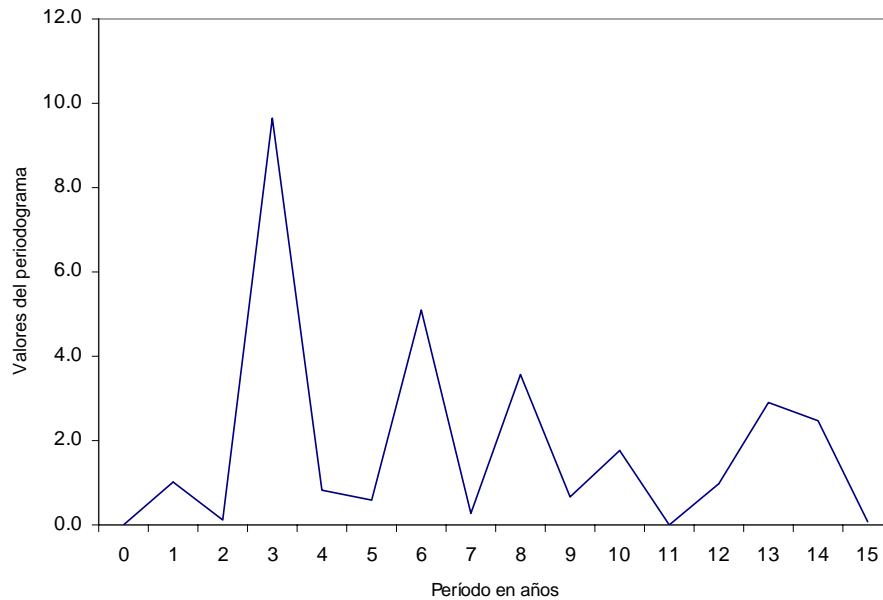


Figura 16. Periodograma de la serie de anomalías anuales de la precipitación mostrada en la figura 15

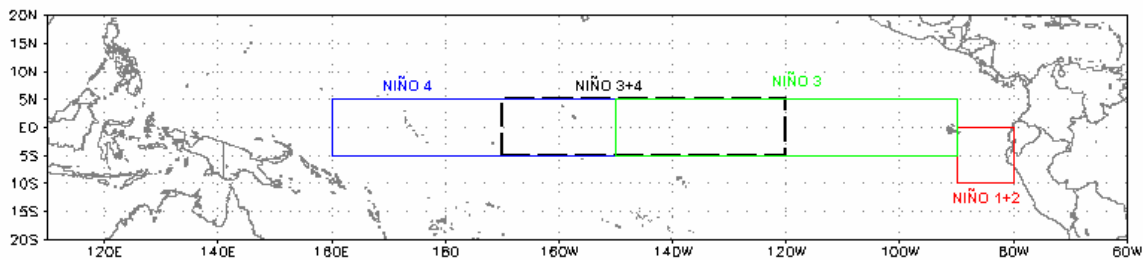


Figura 17. Localización de las regiones para las cuales se obtuvieron las anomalías de la temperatura superficial del mar. Los nombres de las regiones aparecen en el mismo color que el cuadro que las identifica

Con el fin de determinar el grado de relación entre las condiciones existentes en la zona geográfica donde se desarrolla el evento ENOS (eventos fríos o cálidos) y las precipitaciones del país, se realizó un análisis de correlación entre las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (ATSM) en diferentes regiones del océano Pacífico

(Figura 17), conocidas como Niño 3-4, Niño 3 y Niño 1+2, y las series de precipitaciones mensuales desfasadas en el tiempo. Los resultados de este análisis sirven para determinar el período de tiempo que transcurre, entre el desarrollo de determinadas condiciones en el Pacífico (El Niño o La Niña) y la ocurrencia de efectos sobre el régimen de lluvias en el país.

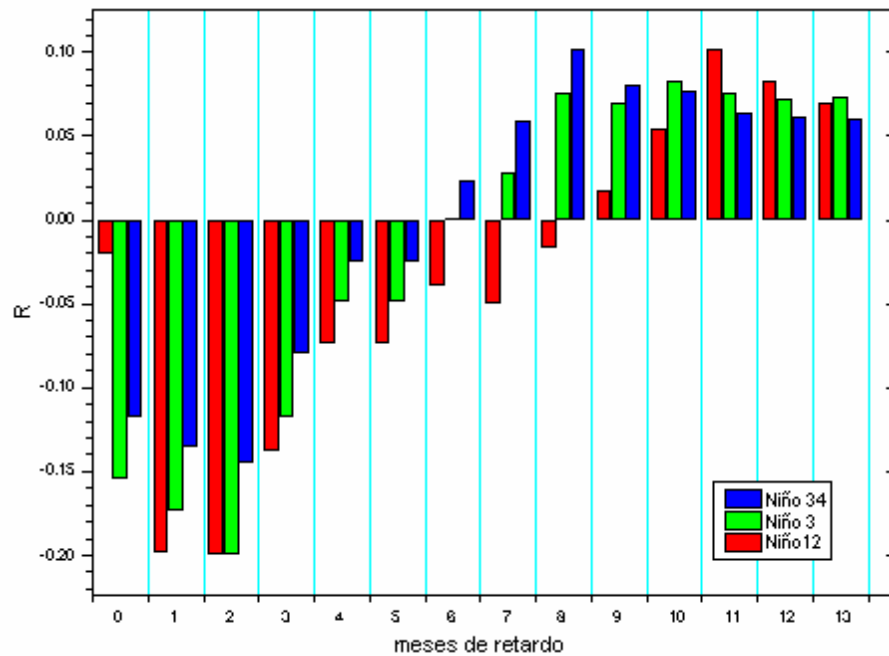


Figura 18. Correlaciones entre las anomalías de temperatura superficial del mar en diferentes regiones del Pacífico ecuatorial (ver Figura 17) y los promedios de precipitación para varios meses de retardo.

Los resultados presentados en la Figura 18 indican con bastante claridad que, si se consideran todas las regiones Niño, las mayores relaciones se obtienen para 1 y 2 meses de retardo, las cuales fueron altamente significativas en el sentido estadístico. Dado que el signo de esas relaciones es negativo, se puede afirmar que el desarrollo de ATSM positivas (relacionadas con El Niño) tiende a producir una reducción de las precipitaciones en el país, mientras que ATSM negativas (asociadas con la Niña) tienden a propiciar el incremento de los acumulados de lluvia.

Si se realiza una diferenciación de las relaciones con cada región Niño, el retardo de dos meses es el más importante para las ATSM observadas en Niño 1+2 y Niño 3. Debe notarse que, las variaciones observadas en las relaciones con cada región Niño, son consistentes con la forma en que se desarrollan las anomalías de temperatura en el océano Pacífico. Así mismo, la intensidad de dichas relaciones, parece tener un estrecho vínculo con la cercanía de esas zonas al país.

Es importante notar que los vínculos descritos en términos estadísticos, sólo permiten describir la existencia de una asociación entre la componente oceánica del ENOS y la precipitación de El Salvador. Así, bajo la comprensión de que el ENOS es un fenómeno de interacción océano-atmósfera, es necesario desarrollar estudios posteriores que permitan profundizar y describir, con más detalle, las posibles relaciones empleando indicadores relacionados con la circulación de la atmósfera en esa región del Pacífico.

V. Conclusiones

Una nueva climatología de temperatura superficial del aire y precipitación para la República de El Salvador, ha sido construida sobre una rejilla uniforme, con una resolución espacial de 5 minutos latitud/longitud. Esta climatología describe adecuadamente las variaciones espaciales de las variables involucradas durante el período 1961-1990.

La nueva climatología fue comparada con análisis de temperatura y precipitación realizados por otros autores, encontrándose una elevada concordancia en la estructura de los campos, aun cuando por razones lógicas, las magnitudes que ellos describen sean ligeramente diferentes. El análisis de los errores del proceso de interpolación indicó que, tanto para la temperatura como para la precipitación, las mayores desviaciones se encontraron en los meses del invierno. En el caso de la temperatura los errores fueron muy pequeños, con magnitudes que oscilaron entre 0.02 y 0.24 °C, mientras que en la precipitación, los errores porcentuales se ubicaron entre 5 y 10 %, para los meses de la temporada lluviosa del año, y entre 10 y 36 % en los meses restantes.

Otro aspecto considerado en este trabajo fue el análisis de las variaciones interanuales de las series temporales para ambas variables. Los resultados permiten indicar que, durante los años de 1961 a 1990, la temperatura superficial del aire presentó una tendencia significativa hacia el incremento de sus magnitudes anuales, en un orden cercano a 1.2 °C. Los años más cálidos del período considerado fueron 1987, 1990 y 1983, en los cuales se produjeron anomalías de 1.1°C, 0.8°C y 0.7°C, respectivamente.

En la precipitación se observó una tendencia muy ligera hacia la disminución de sus valores anuales, aunque estos no fueron significativos. Para esta variable, lo más importante fue la existencia de una variación ciclica estadísticamente significativa del orden de 3 años. Esta variación parece estar relacionado con los efectos de las condiciones oceánicas en el Pacífico sobre las precipitaciones anuales en el país. También, se pudo determinar que las mayores relaciones entre las condiciones del océano en esa región geográfica y las lluvias en El Salvador, se producen con un retardo de 1 a 2 meses. Estos resultados son evidencias del efecto que tiene el ENOS sobre el clima en El Salvador y los mismos pueden tener una gran importancia para el posterior desarrollo de esquemas de predicción climática a corto plazo en el país. Debe apuntarse, sin embargo, que este estudio debería ser profundizado con vistas a describir con mayor detalle los procesos involucrados.

Es importante señalar que la base de datos desarrollada es una fuente muy importante de información para el desarrollo de investigaciones relacionadas con la variabilidad

climática interanual, así como para otro tipo de investigaciones y aplicaciones climáticas. A demás por primera vez se tiene una climatología para el país que posibilite al mismo tiempo el análisis de las variaciones espaciales y temporales de la temperatura y la precipitación en El Salvador.

VI. Agradecimientos.

Este trabajo ha sido desarrollado con el soporte financiero proveniente del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (Proyecto ELS97G32: Comunicación nacional de Cambio Climático de la República de El Salvador). Deseamos expresar nuestra gratitud a la Lic. Yvette Munguía de Aguilar por su activa y efectiva gestión como coordinadora del Proyecto y por el enorme apoyo brindado a nuestro trabajo. Extendemos nuestro agradecimiento a la División Técnica de Meteorología e Hidrología, de la Dirección General de Recursos Naturales Renovables del Ministerio de Agricultura y Ganadería, por los datos meteorológicos suministrados, en especial al Señor Orlando Chacón, jefe de la sección de Climatología, por su rápida atención a nuestras peticiones de información. Al Señor Martín Engels por ofrecernos la información necesaria sobre los resultados sus investigaciones. A la dirección de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática y de sus escuelas de Física y Matemática por el efectivo apoyo.

VII. Referencias.

Carter, T., E. Holopainen y M. Kannien, 1993: Techniques for developing regional climatic scenarios for Finland. Publications of the Academy of Finland 2/93, Painatuskeskus, Helsinki, 63 pp.

Centella A., 1997: Variaciones de la temperatura superficial y la precipitación atmosférica. En Variaciones y Cambios del Clima en Cuba. (eds.) Abel Centella, Lino R. Naranjo and Luis Paz. Reporte Científico, Instituto de Meteorología, Cuba, 62pp

Cressman, G. P., 1959: An operative objective analysis system. *Monthly Weather Review*, 87, 367-374.

Engels, M., C. Urbina, P. Sloom y V. Castillo, 1998: Estudio Climático de datos meteorológicos para llegar a una zonificación agroclimática. Documento de campo No. 15, Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal, El Salvador, 28 pp.

Guzman, G. T., 1995: Historia natural y ecológica de El Salvador, Tomo I. Capítulo: Clima y recursos atmosféricos. Ministerio de Educación, República de El Salvador, 169-208.

Naranjo L. R., Centella A. 1996: Interannual variations in the meteorological fields over the Caribbean and Gulf of Mexico. Part I: Sea level pressure and 500 hPa. heights. Scientific Report, National Climate Center, Institute of Meteorology, Cuba, 25pp.

New, M., M. Hulme y P. Jones, 1997: A 1961-1990 mean monthly climatology of global land areas, version 1.0, November 1997. Climate Research Unit, University of East Anglia, UK. 32 pp.

Parry, M. y T. Carter, 1998: Climate impact and adaptation assessment. A guide to the IPCC aproach. Earthscan Publication, London, 166 pp.

Thiessen, A. H., 1911: Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, 39, 1082-1084.

Willmott, C. J. y K. Matsuura, 1995: Smart interpolation of annually average air temperature in the United States. *Journal of Applied Meteorology*, 34, 2577-2586.

Willmott, C. J. y S. M. Robeson, 1995: Climatologically aided interpolation (CAI) of terrestrial air temperature. *International Journal of Climatology*, 15, 221-229.

Wei, W. W. S., 1994: Time series analysis. Univariate and multivariate methods. Addison-Wesley, United Stated, 478 pp.