

INTRODUCCIÓN

La evolución del clima en la Tierra es una preocupación relevante en diversos ámbitos en todo el planeta. Existe un nivel de consenso en cuanto a que la frecuencia en aumento de eventos climáticos extremos registrada durante los últimos años es atribuible a un leve incremento en la temperatura superficial de la Tierra, que estaría marcando el inicio del esperado cambio global. Este consenso se robustece a medida se registran con inusual frecuencia eventos climáticos que pueden ser calificados como extremos. Debido a que los elementos del clima están relacionados, un incremento en la temperatura media del planeta generará a su vez modificaciones en elementos del clima conectados directa o indirectamente con ella; por ejemplo: los patrones globales de precipitación, nubosidad, humedad -el ciclo hidrológico en general-, el albedo, el volumen de los hielos polares, se verían afectados por una modificación de la temperatura. En la situación concreta de un lugar, la evolución de la temperatura superficial tiene una componente adicional en las modificaciones del entorno local. En el caso de El Salvador, debe considerarse la transformación apresurada en el uso de los suelos como fuente de cambio climático en el nivel local (microclima). Ello se debe a que al modificarse el uso de los suelos se produce una alteración del balance radiativo local, el cual es el elemento rector del clima. El Salvador es un país con un crecimiento demográfico explosivo, que se traduce en un crecimiento desordenado de los centros urbanos, a lo cual se une la sobreexplotación de los recursos naturales, todo lo cual son factores que inciden en un ritmo muy activo en cuanto a la modificación del uso del suelo.

Las implicaciones de las alteraciones en el clima son de la mayor importancia en diversos aspectos de la vida de las poblaciones, tanto en salud, agricultura, economía y por tanto en el campo social. Por estas razones, la investigación de la evolución del clima del país es vital, tanto desde el punto de vista global como del local. El presente proyecto pretende evaluar estos cambios a través del estudio de las tendencias de las principales variables que definen el tiempo/clima, estableciendo si la magnitud de dichas tendencias es semejante entre las diferentes localidades. Así mismo, contrastar las diferencias en el ritmo de cambio en los casos en que fueron encontrados con la evolución del uso de suelos.

DATOS Y MÉTODOS

Los datos meteorológicos de 13 estaciones que se utilizaron en el presente estudio fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional del Servicio Nacional de Estudio Territoriales, SNET. Los juegos de datos cubren diferentes períodos de tiempo, comenzando los registros más largos en los primeros años de la década de los '50's, con uno que inicia antes, a fines de los 40's. Las series más cortas empleadas tienen 33 años de registros. Las estaciones utilizadas fueron: Santa Ana, Los Andes, Ahuachapán, Acajutla, Ilopango, Nueva Concepción, La Palma, Chorrera El Guayabo, Cojutepeque, La Unión, Santiago de María, San Francisco Gotera y Papalón. Las series de tiempo, con la finalidad de establecer una climatología deben tener al menos 30 años (Brooks y Carruthers (1953), citados por Carlson y Todey (1997)). En el caso del presente estudio, el tamaño de las series utilizadas varía de entre 33 y 53 años. Los datos que sirvieron como base para el estudio fueron: temperatura media, promedios mensuales; temperatura máxima, promedios mensuales; temperatura mínima, promedios mensuales; humedad relativa, promedios mensuales; y precipitación, totales anuales. Los datos faltantes fueron rellenados utilizando las medias mensuales. En la mayoría de los casos dichos datos faltantes son muy pocos, o ninguno, al menos en cuanto a temperatura promedio, precipitación y humedad relativa, por lo que para efectos de la investigación el método de relleno es adecuado.

Cada una de las series de tiempo en estudio fue sometida a análisis de regresión lineal (Solow, 1987; Carlson, 1990), usando el siguiente modelo:

$$T = b_0 + b_1X \quad (1)$$

Donde : b_0 y b_1 son los coeficientes de regresión, X es el año, el cual es codificado como $X = \text{año} - \text{año anterior al inicio de la serie}$. La significancia estadística del modelo adoptado fue determinada por la prueba F . El análisis comprendió también análisis visual y análisis gráfico. Para cada serie se calculan (previo análisis gráfico y visual): b_1 , b_0 , F .

Como elemento final para establecer comparaciones entre las tendencias en las diferentes localidades (estaciones) se repitió el proceso anterior homogenizando las series a un período idéntico de 33 años.

RESULTADOS

La Fig. 1 muestra la temperatura promedio anual para 12 de las estaciones estudiadas. De las gráficas mostradas puede apreciarse que la tendencia positiva es evidente, y se destaca por encima de la variación interanual. A fines de la década de los ochenta y en algunos casos a mediados de la misma década, se observa en muchas de las series de tiempo estudiadas el inicio de un notable incremento en la temperatura, la cual se extiende hasta los primeros años de la década de los noventa. Este es el caso de Santa Ana, Nueva Concepción, Chorrera del Guayabo, Papalón (no mostrado en la figura), La Unión y San Francisco Gotera. Así mismo el análisis gráfico sugiere una leve disminución de la temperatura promedio a inicios de los años setenta. Al efectuar el análisis de regresión, éste arroja como resultado pendientes positivas con valores de entre 0.01 y 0.05 °C por año. Al aplicar la prueba F, ésta confirma que en 11 de las 13 estaciones estudiadas en el caso de la temperatura media, con nivel de confianza del 95%, la pendiente es diferente de cero. Se repitió la prueba a un nivel de confianza del 99%, confirmándose el resultado. La Fig. 2 presenta un resumen gráfico de la temperatura media para todas las estaciones, el cual fue realizado agrupando los datos de forma estacional, cada tres meses. El criterio para el agrupamiento fue el rango en el cual se encuentran los valores de la temperatura en cada período. En estas gráficas puede observarse que en todos los casos se destaca un período caliente que abarca de 1987 a 2003, con un enfriamiento relativo a fines de los noventa, pero por encima del mostrado a principios-mediados de los setenta en aquellas series en las cuales se tienen los datos, y un aumento posterior que sigue en ascenso hasta el 2003, último año reportado en el presente documento. La Fig. 3 presenta la gráfica resumen de la temperatura media de las estaciones estudiadas. En ésta se evidencian nuevamente los rasgos antes señalados, aunque suavizados por haber incluido en el promedio las estaciones para las cuales la pendiente de la línea de tendencia es mínima, que son las que se

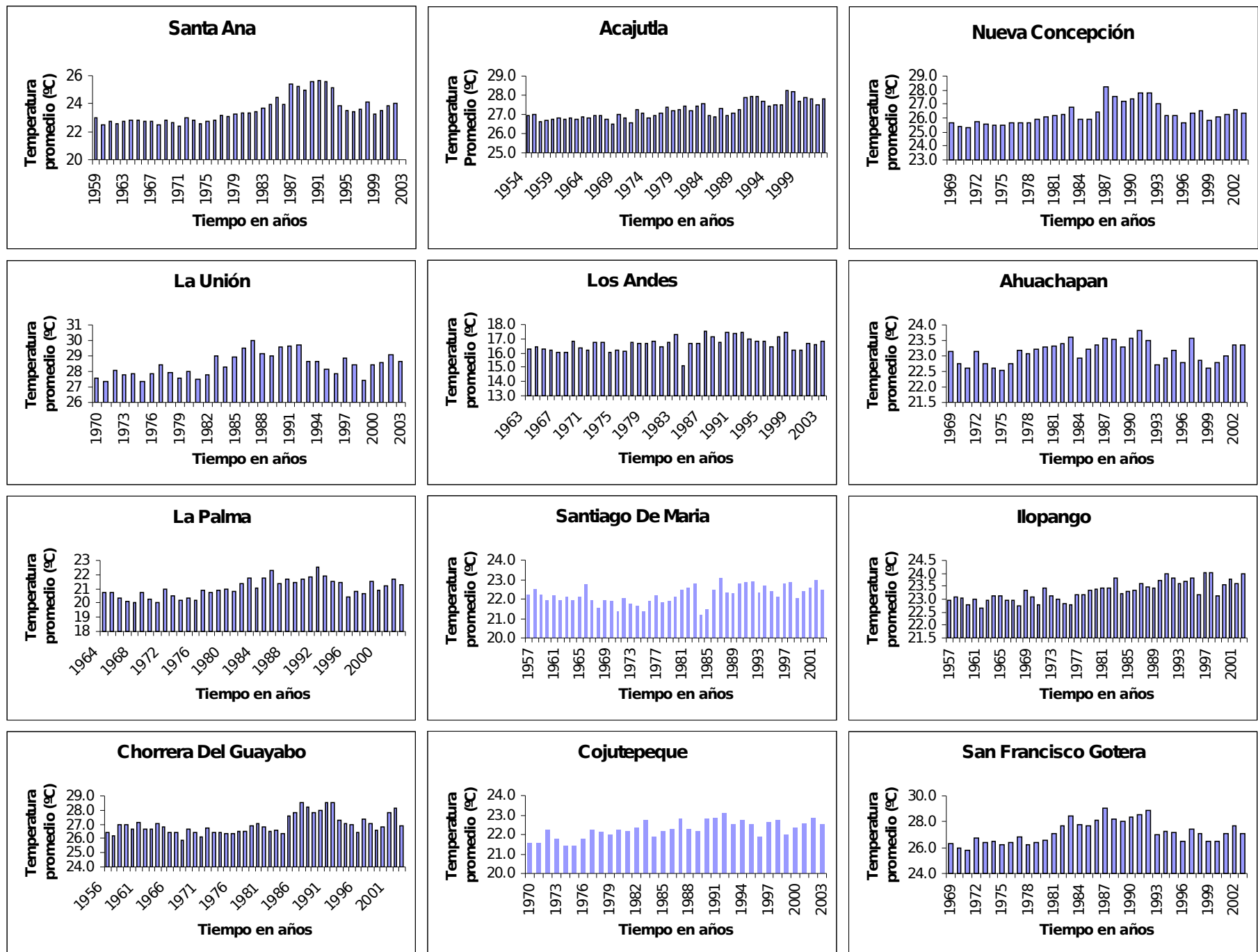


Fig. 1 Temperatura media, promedios anuales para 12 estaciones de El Salvador.

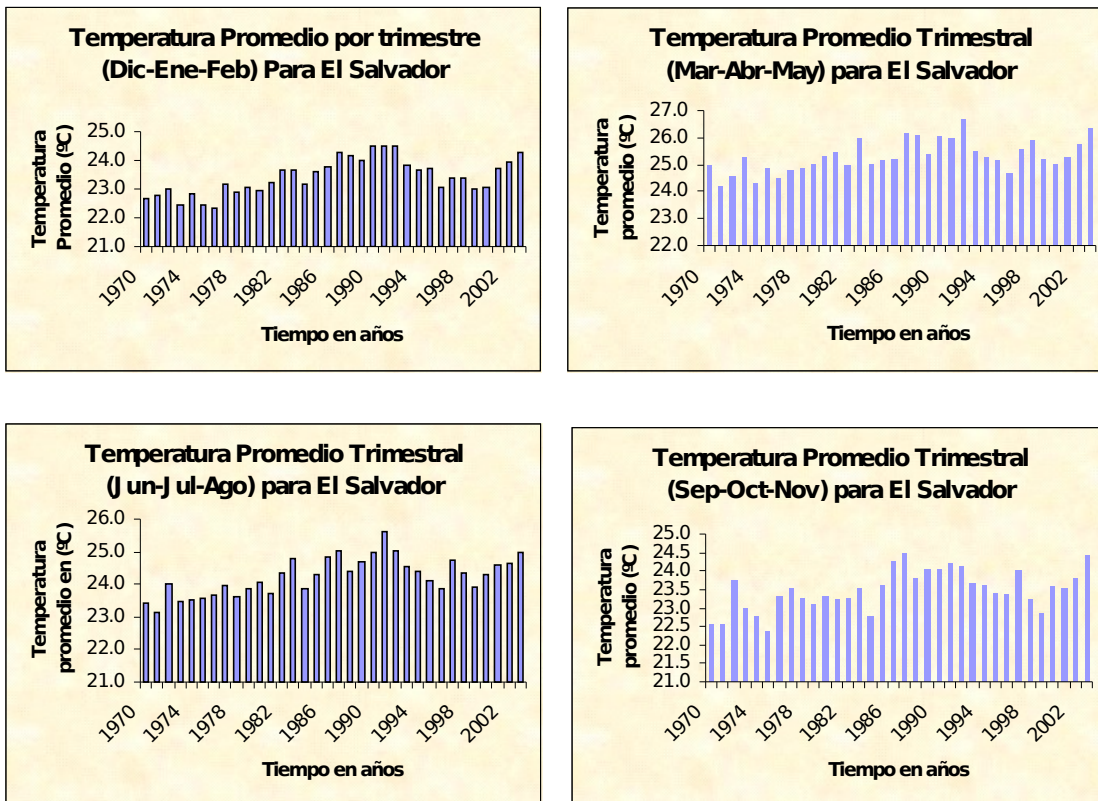


Fig. 2 Temperatura Promedio – promedios estacionales.

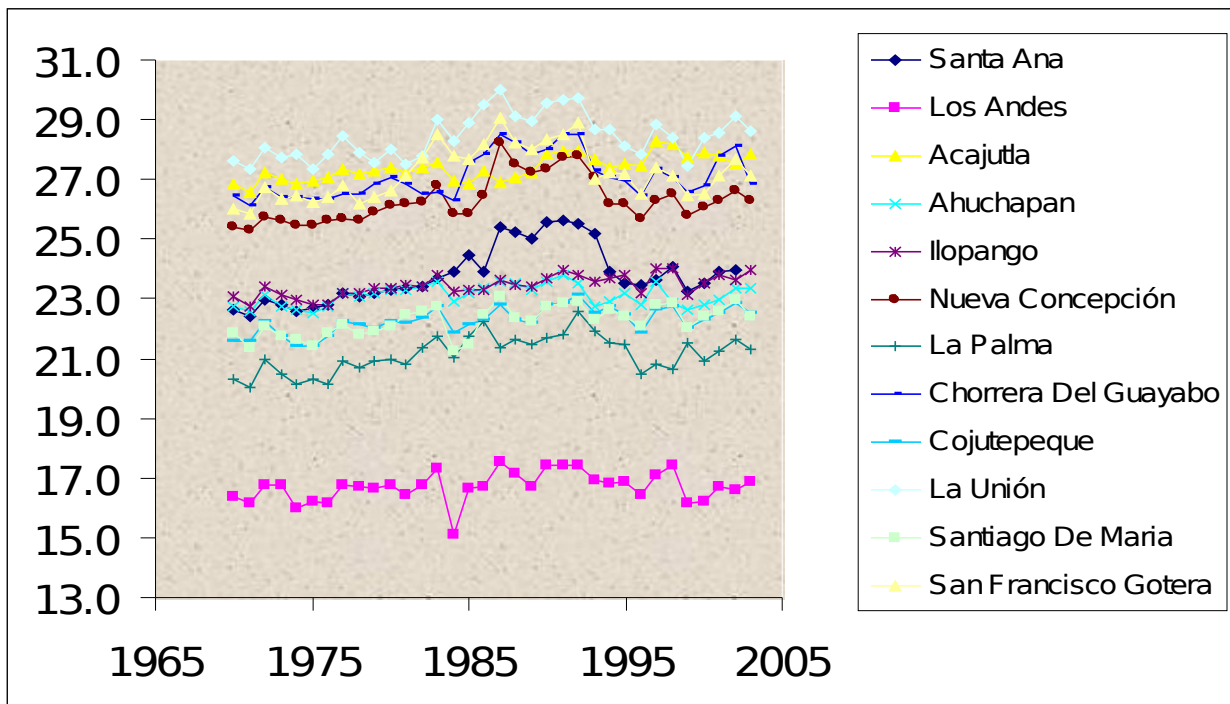


Fig. 3. Gráfica resumen de la temperatura media para 12 estaciones de El Salvador.

mostraron negativas al estadístico de prueba utilizado. Debe observarse aquí que en esta figura pueden distinguirse tres grupos; estos corresponden a las diferentes altitudes.

Al analizar las series de temperatura máxima y mínima, se encontró una pendiente positiva en el análisis de regresión, en la mayoría de los casos. Al calcular el estadístico de prueba, F, para la temperatura máxima promedio se confirma un aumento de ésta para seis de las trece estaciones estudiadas al nivel de confianza de 95%. Para el resto de estaciones no se encuentra un aumento de la temperatura estadísticamente significativo. Es interesante el hecho de que las dos estaciones que no muestran aumento de su temperatura media sí reporten incremento de su temperatura máxima promedio. En cuanto a la temperatura mínima, se encontró un aumento significativo en siete de las series estudiadas, al nivel de confianza del 95%. También en este caso las estaciones que no muestran incremento en la temperatura media registran aumento en la temperatura máxima al nivel de confianza señalado.

De los resultados obtenidos al estudiar el comportamiento de la temperatura, podría esperarse que la humedad relativa disminuya, por cuanto es en buena medida función de la temperatura ambiente. Sin embargo, mientras en algunas series de datos el análisis visual de las gráficas sugiere una tendencia negativa, en algunas estaciones no se observó tendencia definida; y más aun, la serie de San Francisco Gotera sugiere un incremento en la humedad. De igual modo al hacer el análisis de regresión de las series solo algunas muestran tendencias positivas consistentes. La prueba F confirma la disminución de la humedad relativa solo en dos casos, para localidades con alturas sobre el nivel del mar de alrededor de novecientos metros, cuyas temperaturas media y mínima reporta un aumento. Hay un caso particular en el cual se encontró que la humedad relativa aumenta, San Francisco Gotera, en acuerdo con el análisis gráfico visual.

Al analizar la precipitación, el análisis visual sugiere una disminución en la precipitación en algunos casos. La Fig. 4 muestra la precipitación para 12 estaciones en todo el territorio nacional. Las gráficas de la precipitación anual en las estaciones de Santa Ana, Los Andes, Ilopango y Nueva Concepción sugieren una posible disminución; incluso, esta tendencia parece al análisis gráfico-visual más consistente que en el caso de la humedad relativa. Sin embargo, solamente para dos de las estaciones en estudio, Ilopango y Los Andes, se encuentra una tendencia negativa al nivel de confianza del 95%. En la Fig. 5 se representa el promedio de la precipitación de las estaciones estudiadas

en todo el país a partir de 1970, período común para todas las series. En esta gráfica resumen no se evidencia tendencia ninguna, mostrando solo la variabilidad climática a la que están sometidas las variables climáticas en general.

Al analizar los resultados obtenidos en cuanto a la temperatura en general, y en particular a la temperatura media, un hecho relevante es la disparidad en las pendientes de las líneas de tendencia, también en su comportamiento ante la prueba F. Estas diferencias sugieren que una de las fuentes del resultado mostrado es local; de aquí que puede concluirse que el origen de las diferencias encontradas en el incremento en la temperatura se encuentra en el papel del entorno, el cual ha sido modificado en el transcurso del período en estudio; es decir, la influencia de la modificación del uso del suelo se refleja en estos resultados. Debe tenerse presente que El Salvador es un país con un crecimiento poblacional explosivo, y

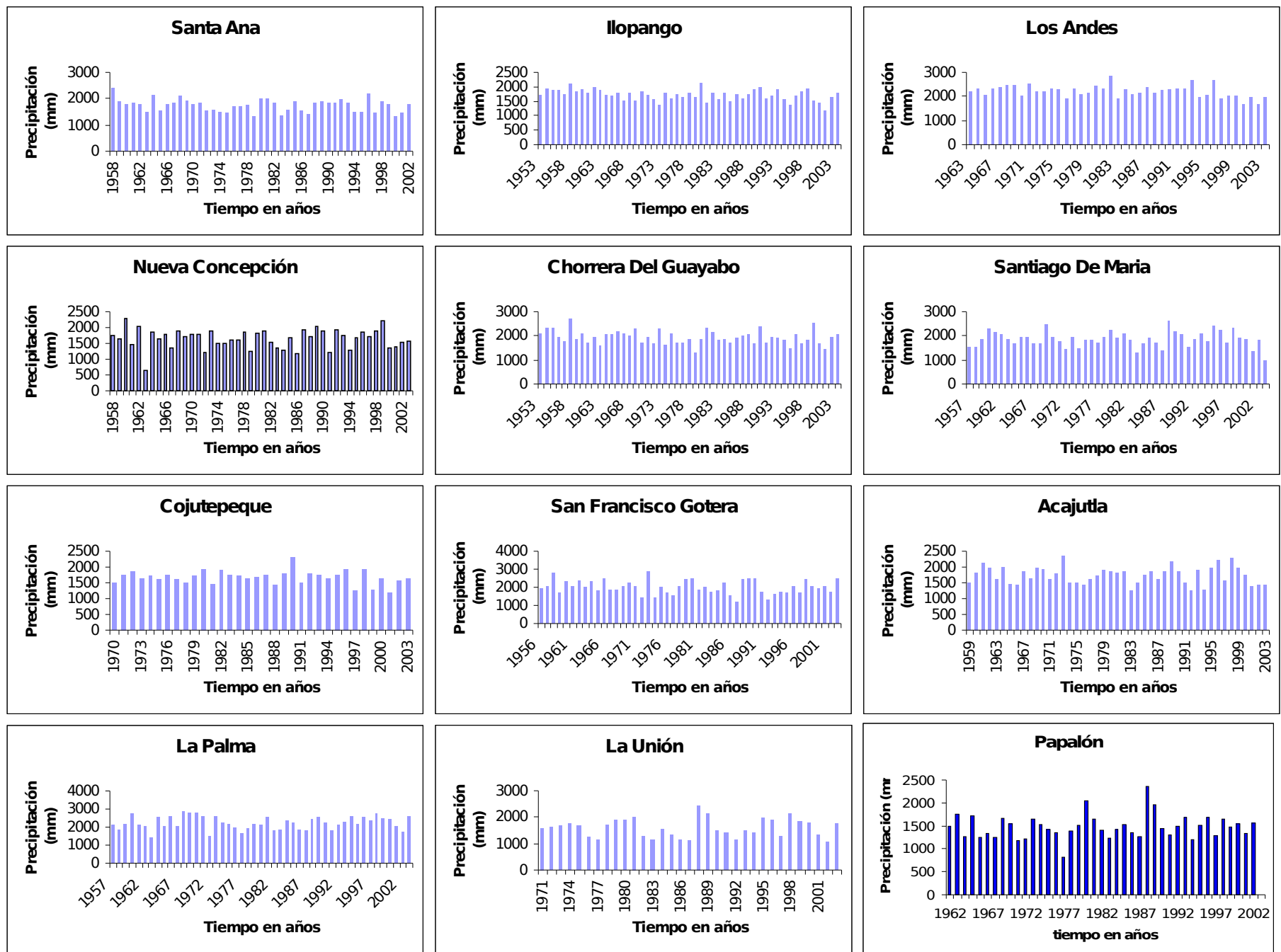


Fig. 4. Gráficas de precipitación anual para 12 estaciones en El Salvador.



Fig. 5 Resumen precipitación anual para El Salvador.

con pocas regulaciones en cuanto a la explotación de los recursos naturales. Para tener un elemento para evaluar este punto, con relación al cambio de la cobertura superficial, se efectuó la comparación de los mapas de uso de suelos de El Salvador correspondientes a dos diferentes momentos, para lo cual se utilizaron el mapa de uso de suelos de 1970, y el mapa de uso de suelos de 1997. Al comparar ambos mapas de uso de suelos, el de 1970 con el de 1997, es evidente que entre esos años se ha producido una amplia diversificación en el uso del suelo. Se ha dado en el territorio salvadoreño una reducción de las áreas de cultivo de café y algodón y también de bosque; y a la vez un aumento de las áreas de pasto y urbanas. Esto resulta especialmente evidente para estaciones como La Palma e Ilopango. Cabe señalar que no en todos los casos la comparación entre los mapas es concluyente.

CONCLUSIONES

El clima en El Salvador muestra tendencias de diferente signo en los elementos que lo conforman, entre ellos los evaluados acá, los cuales son temperatura, precipitación y humedad relativa. Sin embargo, desde del punto de vista estadístico, es la temperatura la variable que muestra una tendencia significativa, en todo el territorio, sobre todo la temperatura promedio. Si se considera que todos los elementos del tiempo y del clima están concatenados, es prudente interpretar que las variables que no mostraron tendencias significativas en todo el país, es

decir, que arrojaron tendencias solo en parte del territorio, están ajustándose a los cambios en la temperatura, y de ahí los resultados divididos encontrados. Vale destacar que la precipitación no muestra tendencias significativas durante el período estudiado.

Un resultado interesante ha sido el que durante los últimos años de la década de los ochenta y los primeros años de la década de los noventa la temperatura media muestra un alza mayor, que contribuye a la tendencia encontrada. Estudios de las tendencias del clima realizados en otras latitudes muestran resultados semejantes durante fines de los ochenta, (Carlson, 1990), a pesar de no registrar tendencias con fundamento estadístico, no así en los primeros años de los noventa. Una causa probable son los eventos ENOS de intensidad extraordinaria ocurridos al principio y fin de la década de los ochenta, y los que se sucedieron uno tras otro durante la primera mitad de la década de los 90.

Un resultado a destacar son las diferencias encontradas al evaluar la magnitud de la tendencia anual en el caso de la temperatura promedio, reflejando la influencia del medio circundante. En cuanto a la precipitación, se recomienda evaluar este tema desde un punto de vista de datos diarios, decadales o quincenales, para considerar el efecto del cambio global y de la modificación del entorno sobre la distribución de la lluvia, por cuanto en la investigación aquí solo se ha estudiado la tendencia de los totales anuales.

Deben subrayarse las consecuencias inmediatas del alza en la temperatura sobre la agricultura, y la conveniencia de monitorear la propagación de su efecto, tanto sobre otras variables climáticas, incluida la temperatura del suelo, como en aspectos concretos de la vida nacional, como los cultivos y el consumo de energía.

Se concluye, como ya se señaló antes, que los cambios encontrados no son uniformes, por lo que puede proponerse que un componente importante en los cambios observados es la acelerada modificación en el uso de suelos en El Salvador.

RECONOCIMIENTOS

La autora desea agradecer a las numerosas contribuciones que hicieron posible el desarrollo de la investigación cuyos resultados más relevantes se presentan en este documento. En primer lugar, al Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador, CIC-UES, que patrocinó y estimuló este proyecto; a Dina Larios de López y a Richard Carlson, quienes se interesaron en el presente proyecto y

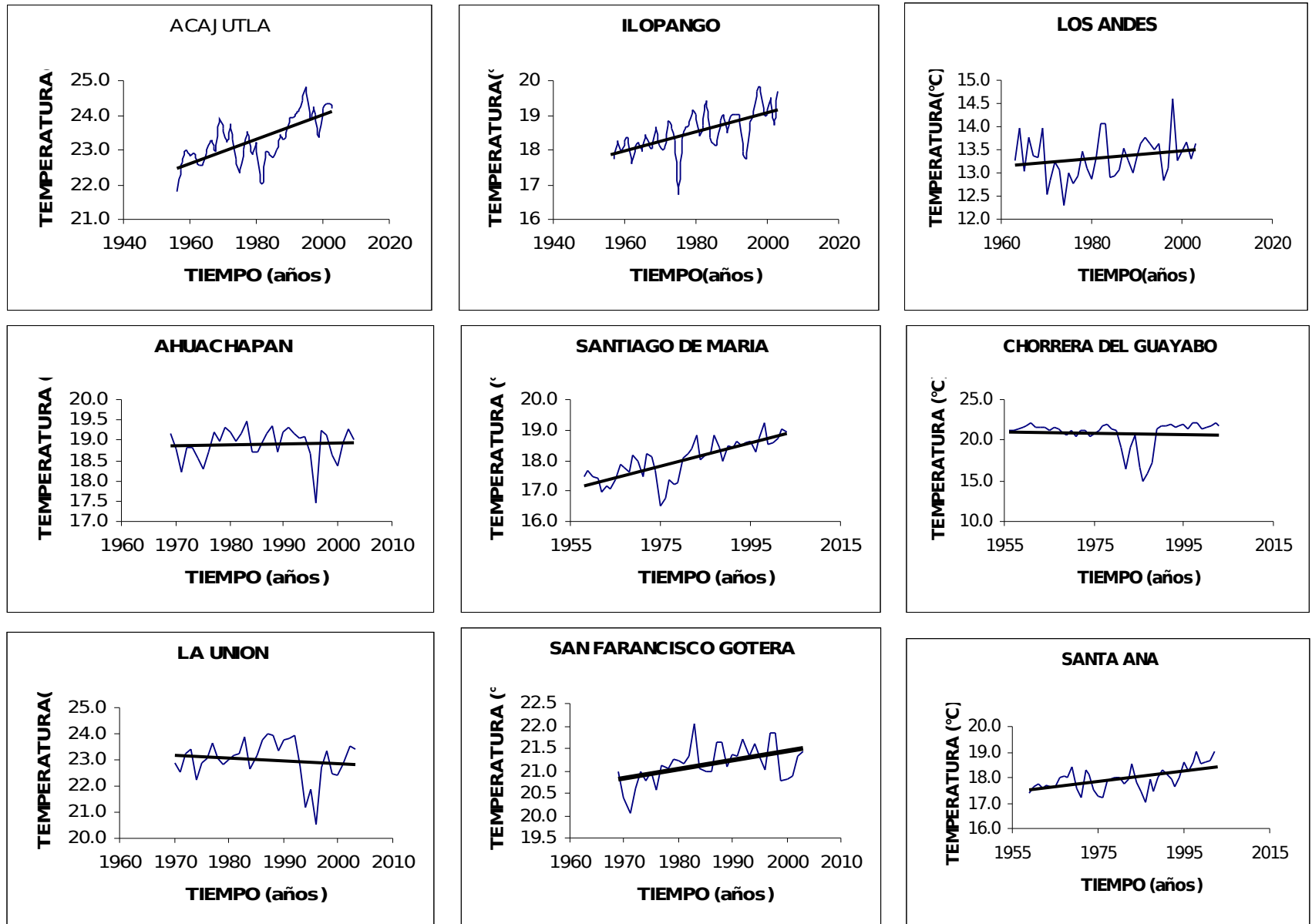
discutieron conmigo métodos y resultados; a Luis Castillo, del Laboratorio de SIG de la Escuela de Física de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad de El Salvador, quien proporcionó los mapas de uso de suelo, además de colaborar con su adaptación a las necesidades de la investigación en curso; al Servicio Nacional de Estudios Territoriales, SNET, que hicieron posible la realización de este trabajo al proporcionar la información meteorológica, y dentro de esta institución en especial al Ing. Tomás Rivas Pacheco, con quien discutí diferentes aspectos del mismo, y quien me ayudó con sus atinadas observaciones y al Lic. Luis García, quien se mostró siempre muy anuente a colaborar proporcionándonos artículos actualizados e información adicional sobre el tema, y a los observadores que han colectado a lo largo de varios de varios años la información aquí utilizada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

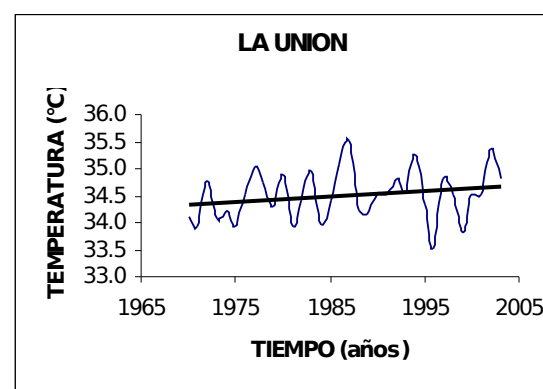
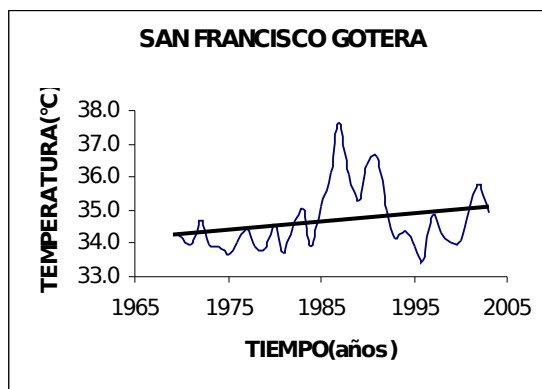
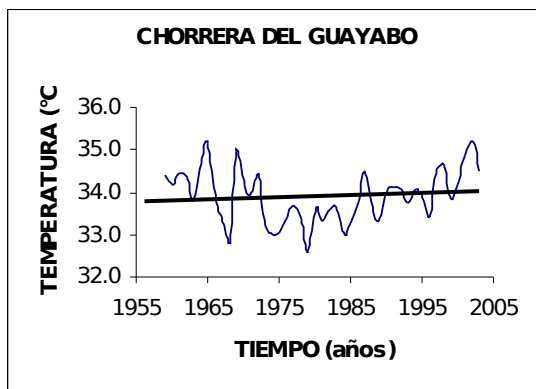
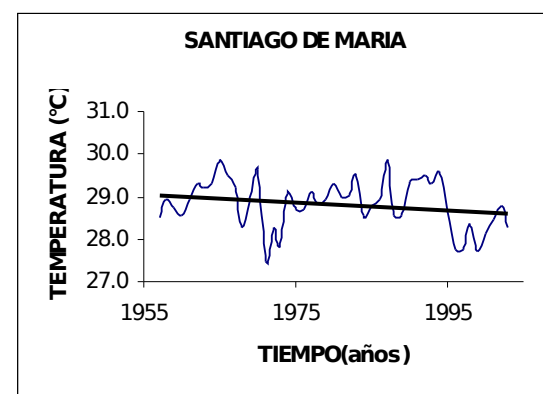
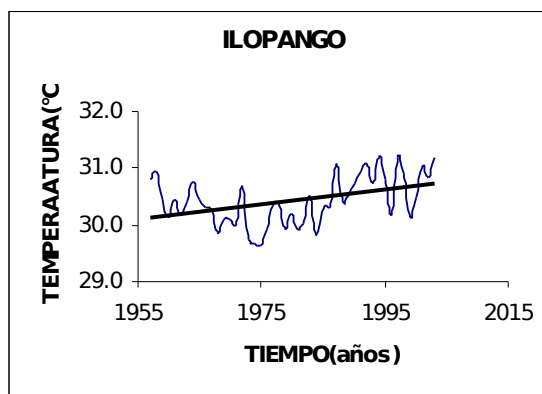
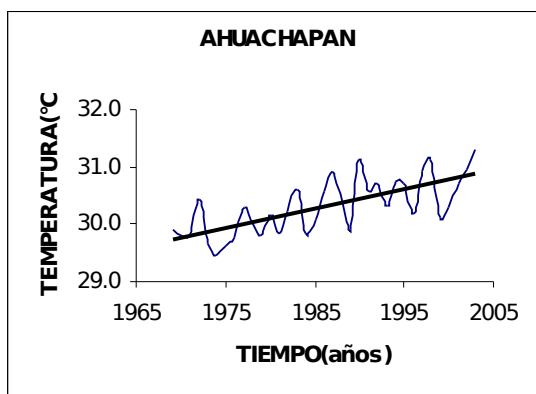
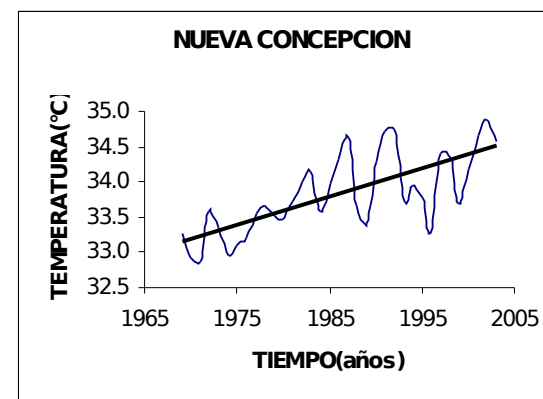
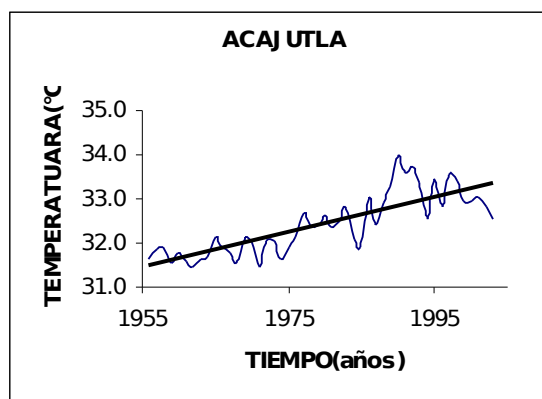
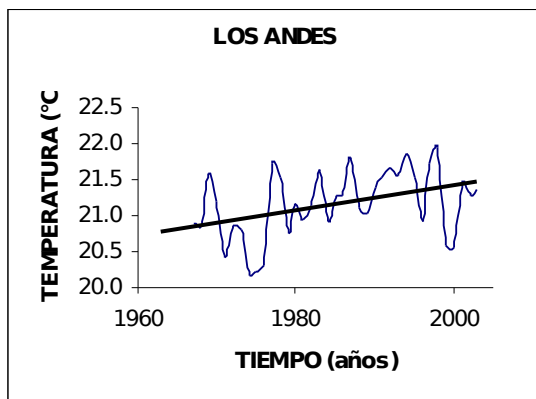
- Carlson, Richard E. *Climate Trends in Iowa* 1990 Journal Acad. Sci. 97(3): 77-81
- Carlson, Richard E. D. P. Todey *A search for Average, Extremes and Runs of Unusual Weather in Iowa* 1997 Journal Acad. Sci. 104(1): 21-27
- Centella, A et al. 1998a *Escenarios de Cambio climática para la evaluación de los Impactos de Cambio Climático en El Salvador.* Proyecto GEF/ELS/97/G32, Primera Comunicación Nacional de Cambio Climático, Reporte Técnico, 49 p.
- Centella, Abel, Luis Castillo y A. Aguilar 1998b *Escenarios Climáticos de Referencia Para la República de El Salvador* Proyecto GEF/ELS/97/G32 Primera Comunicación Nacional de Cambio Climático, -eorte Técnico, 21 p.
- Cotton, William R., Roger A. Pielke *Human Impacts on Weather and Climate* 1996 Cambridge University Press New York 288 p.
- Jiménez M., Telma E. *Análisis de variabilidad de los parámetros climáticos: temperatura, humedad relativa y precipitación para la zona oriental de El Salvador* 1998 Premio Mujer y Ciencia-UES-Fundación Kovalevskiaia

ANEXOS

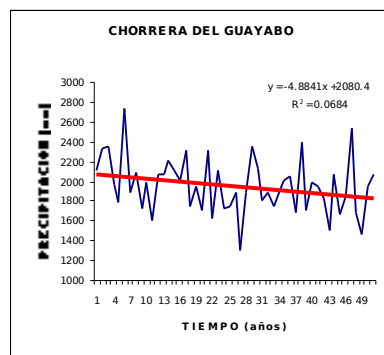
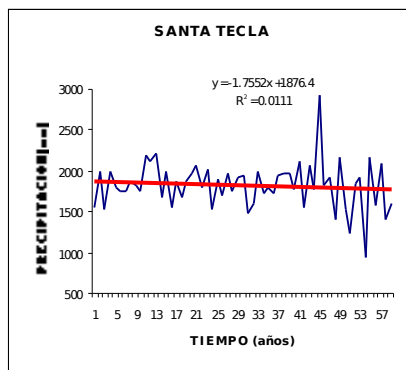
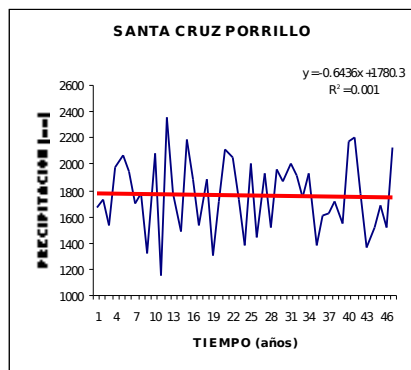
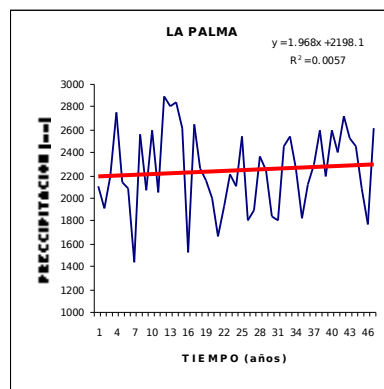
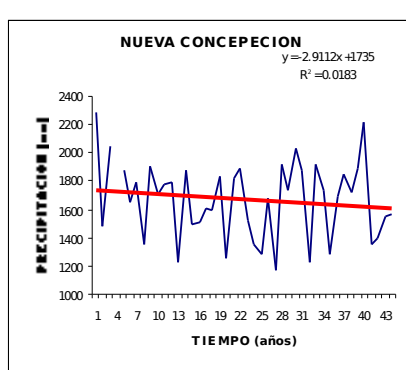
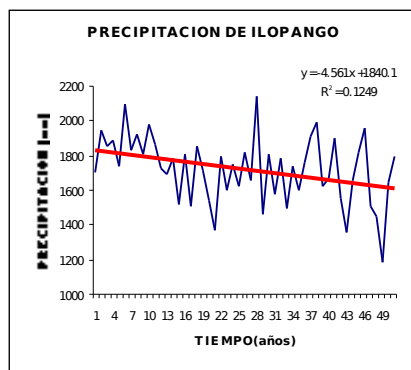
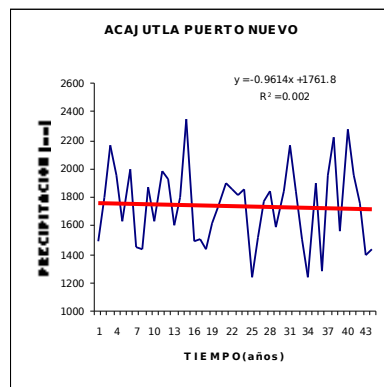
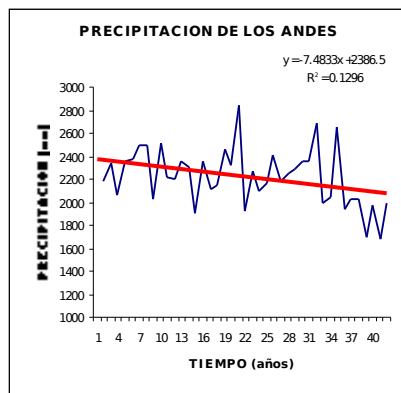
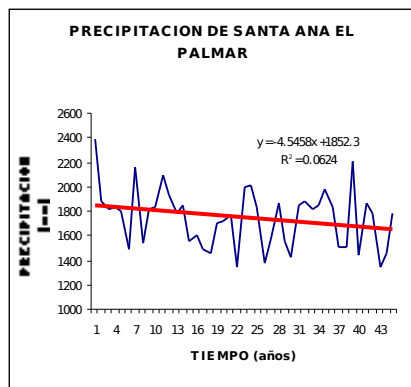
ANEXO A: Gráficas de temperatura mínima anual para 9 estaciones de El salvador.



ANEXO B: Gráficas de temperatura máxima anual para 9 estaciones de El salvador.



ANEXO C: Gráficas de precipitación anual de 9 de las estaciones en estudio mostrando las líneas de tendencia.



ANEXO D: Mapa de uso de suelos correspondiente a 1970.



ANEXO E: Mapa de usos de suelos correspondiente a 1997.

