
Apéndice II

Escenarios climáticos futuros

Escenarios de cambio climático para 2020 y 2085 en la planicie costera, entre los departamentos de La Paz, San Vicente y Usulután, El Salvador

Autor: Tomás Rivas Pacheco

Febrero de 2007

Tabla de Contenido

I. Introducción

- 1.1. Propósito
- 1.2. Datos utilizados
- 1.3. Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero

II. Ubicación geográfica

III. El método estadístico de reducción de escala

- 3.1. Control de calidad de los datos
- 3.2. Selección de predictores *NCEP*
- 3.3. Calibración del modelo

IV. Temperatura mínima

- 4.1. Comparación temperatura mínima media observada, reanálisis y escenarios 1961-1990
- 4.2. Escenarios futuros de temperatura mínima para 2020 y 2085

V. Temperatura máxima

- 5.1. Comparación entre temperatura máxima observada, reanálisis y escenarios A2 y B2, 1961-1990
- 5.2. Escenarios de temperatura máxima para 2020 y 2085

VI. Precipitación

- 6.1. Comparación precipitación observada, modelo *NCEP* y escenarios A2 y B2, 1961-1990
- 6.2. Comparación entre escenarios de precipitación A2 y B2 1961-1990 y futuros para 2020 y 2085
- 6.3. Rebase de lluvias de 40 mm diarios

VII. Conclusiones

VIII. Bibliografía

I. Introducción

El presente estudio forma parte integrante del documento *Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de los pobladores rurales de la planicie costera central de El Salvador*, el cual fue desarrollado dentro del marco del proyecto *Fomento de capacidades para la Etapa II de Adaptación al Cambio Climático en Centroamérica, México y Cuba*.

Experimentos numéricos con Modelos de Circulación General de la Atmósfera, (*GCM* por sus siglas en inglés), permiten concluir que el aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero tendrá impactos significativos en el clima global y regional. Sin embargo, es menos claro en qué medida las condiciones climáticas en sitios particulares se modificarán. Para la elaboración de los escenarios climáticos futuros locales, se hace uso de las llamadas técnicas de reducción de escala (*downscaling*), las cuales se han desarrollado como una interfase entre los encargados de los *GCM*, los que se hacen los experimentos de cambio climático y los encargados de evaluar los impactos potenciales del cambio climático. La técnica de reducción de escala empleada en este estudio es la del *SDSM* (*Statistical DownScaling Model*), la cual permite obtener información de escala espacial mucho más fina. Algunas veces, los impactos de las variaciones globales del clima cobran características especiales en regiones de topografía marcada, en islas o en regiones de contrastes en el uso de suelo, factores que generan circulaciones de mesoescala o de escala local. En las técnicas estadísticas de reducción de escala las variables del clima regional o local (predictandos) se obtienen generando un modelo estadístico que las relaciona con las variables de gran escala del *GCM* (predictores). Dicha relación involucra relaciones entre observaciones de gran escala y de superficie, teniendo como hipótesis fundamental que las relaciones construidas con el clima actual se mantienen aun bajo cambio climático.

Los escenarios de cambio climático regional están basados en las emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero, como único forzante para la sensibilidad climática. Por consiguiente, en los estudios de impactos del cambio climático deben considerarse dos fuentes fundamentales de incerteza:

- a. Las incertezas derivadas de las emisiones futuras de gases de efecto invernadero, que afectan el forzamiento radiativo del sistema climático. Este elemento cobra importancia pues los cambios en temperatura y precipitación, incluso a escala regional, pueden variar de acuerdo a las concentraciones proyectadas.
- b. Las incertezas asociadas a la sensibilidad global del clima y a los cambios de patrones de circulación a escala regional que simulan los modelos del clima. Las diferencias en la formulación de los *GCM* de la atmósfera llevan a que se generen diferencias entre escenarios aun para un mismo forzante, de tal manera que mientras un modelo proyecta un cambio de 1°C, otro puede indicar un cambio de 2°C. Similarmente, algunos modelos proyectan incrementos en la precipitación, mientras que otros sugieren una disminución. Tales diferencias entre modelos son fuente de incerteza.

Por consiguiente, se genera una cascada de incertezas en la relación entre emisiones e impactos, de la manera siguiente: escenario de emisiones \Rightarrow respuesta del ciclo del carbono \Rightarrow sensibilidad de clima global \Rightarrow escenarios de cambio climático regional \Rightarrow rango de posibles impactos. Una fuente adicional de incerteza se encuentra en la variabilidad natural del sistema climático, que en gran medida es el resultado de inestabilidades propias o de forzamientos externos, como los que resultan de la actividad volcánica o la actividad solar. En todo caso, para el análisis de impactos y de adaptación es importante conocer, tanto las incertidumbres en los escenarios de cambio climático como las resoluciones espaciales de los mismos escenarios.

1.1 Propósito

El presente estudio está encaminado a generar una representación del clima futuro, mediante la proyección al año 2020 y 2085 de los valores de las variables meteorológicas como la temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en sus condiciones medias y absolutas o de acuerdo la frecuencia de algunos umbrales, a fin de integrar dichas proyecciones en un índice de amenaza climática para la evaluación integrada de la vulnerabilidad climática futura en el territorio seleccionado. Para tal efecto, el estudio utilizó un modelo estadístico de reducción de escala, para proyectar el clima local a horizontes de tiempo futuros, y para crear capacidades nacionales en el uso de dichas herramientas.

1.2 Datos utilizados

En el área del territorio estudiado, ubicado en la planicie costera central, entre los departamentos de La Paz, San Vicente y Usulután de El Salvador, la información meteorológica es escasa. Debido a esto, se seleccionaron los datos diarios de la estación meteorológica San Miguel¹, ubicada alrededor de la ciudad del mismo nombre, cuyas características climatológicas son similares a las del sitio de interés. La climatología local de referencia es la de 1961-1990 pero la calibración del modelo se realizó con datos del período 1961-2001, igual al período del reanálisis del Centro Nacional de Predicción del Medio Ambiente de Estados Unidos (*NCEP*, en inglés); asimismo, el modelo *Hadley Center* versión 3 (*HadCM3*) del Reino Unido facilitó la elaboración de escenarios climáticos de acuerdo a los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero A2 y B2 en el horizonte de tiempo desde 1961 hasta 2099.

1.3 Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero

Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (*IPCC*, en inglés), es prácticamente seguro que las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) debidas a la quema de combustible de origen fósil constituirán la influencia dominante en las tendencias de concentración atmosférica de CO₂ durante este siglo XXI². Los modelos climáticos proyectan la respuesta de muchas variables climáticas ante un conjunto de escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales se asocian a distintos niveles de concentraciones de dichos gases en la atmósfera de la tierra, tal como se muestra en la Figura 1. Para este estudio, de las familias de escenarios de emisiones de GEI, se seleccionaron los A2 y B2, relativos a niveles medio alto y medio bajo de emisiones de GEI, respectivamente. Como ejemplos, el escenario A2 supone un mundo muy heterogéneo, preservación de las identidades locales, alta tasa de crecimiento poblacional, desarrollo económico regional, desarrollo económico más lento que en otras regiones; mientras que el escenario B2 se centra en el sostenimiento medio ambiental, es decir, un mundo con énfasis en las soluciones locales, un aumento continuo de la población menor que en A2, niveles intermedios de desarrollo económico.

¹ El nombre actual de la estación es San Miguel-UES, a continuación de las dos estaciones Beneficio El Sitio y Beneficio El Papalón.

² Cambio Climático 2001, Informe de síntesis, *IPCC*.

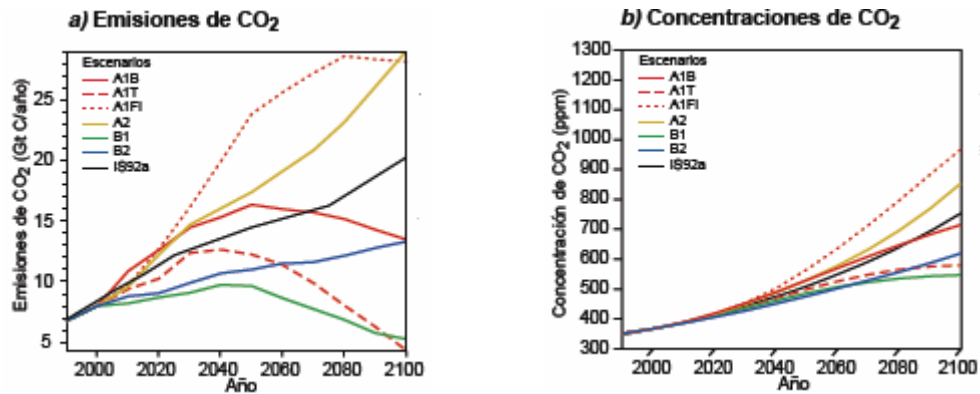


Figura 1. Niveles de emisiones y de concentraciones atmosféricas de GEI (IPCC).

II. Ubicación geográfica

Los datos diarios observados de predictor derivados del reanálisis *NCEP* y datos diarios de predictor de escenarios derivados del modelo (*HadCM3*), para el período 1961-2099, que se utilizaron para elaborar los escenarios climáticos corresponden a la cuadrícula, Y=30 Latitud: 12.5°N y X=74 Longitud: 86.25°O (Figura 2), la más cercana desde el punto de vista geográfico y climático al territorio de estudio (Figura 3). Asimismo, la ubicación de la estación climatológica San Miguel corresponde a las coordenadas 13° 26.4' latitud Norte y 88° 07.6' longitud Oeste, en el sector de la planicie central de la zona oriental del país.

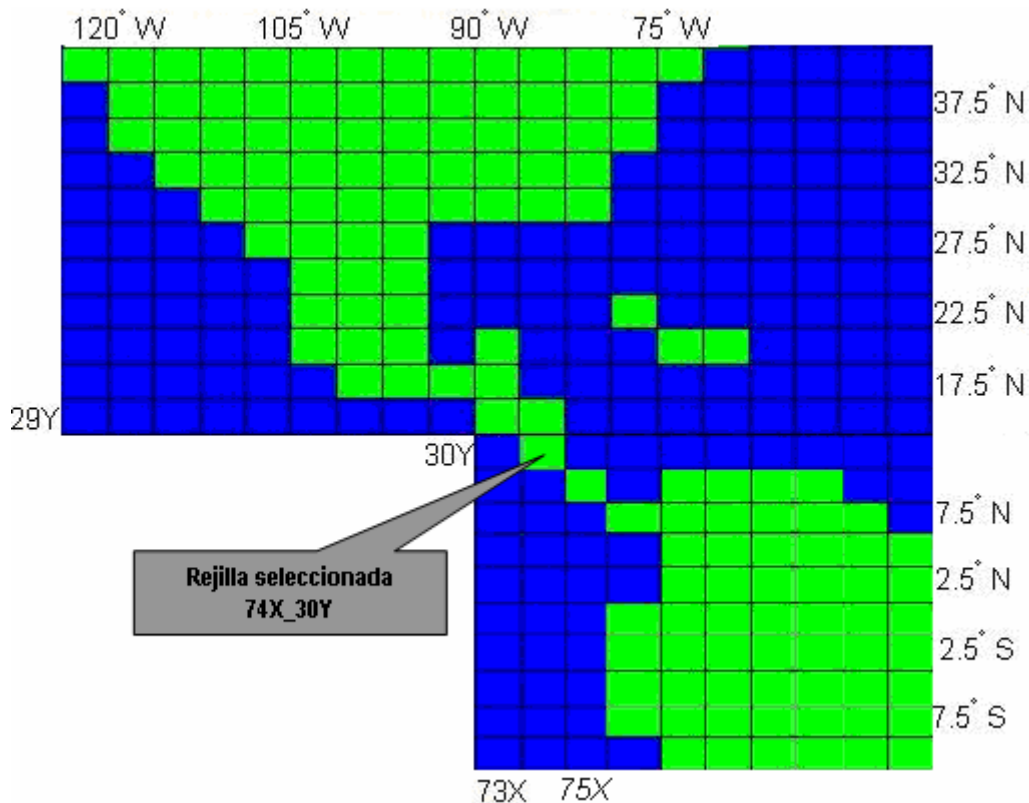


Figura 2. Rejilla seleccionada de los datos de reanálisis *NCEP* y de los escenarios *HadCM3*.

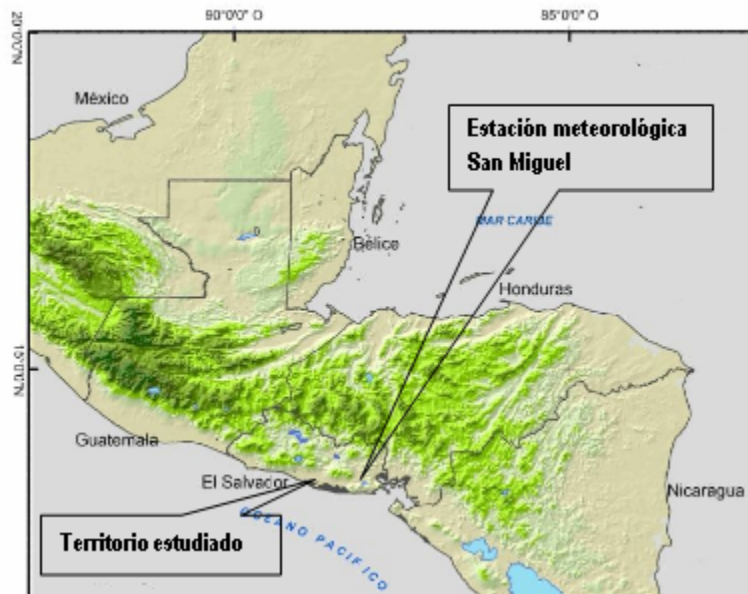


Figura 3. Ubicación geográfica de la estación meteorológica San Miguel y del territorio estudiado.

III. El Método Estadístico de Reducción de Escala

Uno de los esquemas de reducción de escala espacial más útiles, en materia de generación de escenarios de cambio climático, se basa en procedimientos estadísticos de regresión. El Modelo Estadístico de Reducción de Escala Espacial (*SDSM*, en inglés), constituye una de las herramientas más fáciles de usar y que aporta gran cantidad de información de relevancia para los estudios de impactos del cambio climático.

3.1. Control de calidad de los datos

El primer paso en la aplicación del *SDSM* consiste en un proceso de control de la consistencia de los datos observados localmente. Una vez el procesamiento es completado de manera satisfactoria, se generan los resultados, tal como se indica en el Cuadro 1. En este caso, los resultados de cada variable son pertinentes. Los datos faltantes representan el 5.1%, 4.4% y 1.2% de la serie datos diarios de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación (lluvia), respectivamente.

Resultado	Temperatura (°C)		Lluvia (mm)
	Mínima	Máxima	
Mínima	10.2	23.5	0
Máxima	26.9	44	221.6
Promedio	20.9	35.3	4.1
Numero de valores	14975	14975	14975
Valores faltantes	759	662	187
Número de valores OK	14216	14313	14788
Código valores faltantes	-99.9	-99.9	-99.9

Cuadro 1. Resultados del proceso de control de los datos diarios observados, para el período 1961-1990, de la estación meteorológica San Miguel.

3.2. Selección de predictores

De 26 variables de calibración, derivadas del reanálisis *NCEP*, se busca la mejor correlación y explicación física (una a una o en conjunto) con una variable local (predictando), se selecciona una variable predictor o la combinación de dos o tres para cada predictando. Las variables de calibración están relacionadas con alturas geopotenciales, dirección o fuerza del viento, divergencia, humedad específica o relativa, presión, temperatura o vorticidad, ya sea a nivel medio del mar, en superficie o en altura a 850 ó 500hPa, según corresponda.

Respecto a la temperatura mínima diaria se encuentra que la mayor correlación (Cuadro 2), se da con la humedad específica en superficie (*ncepshumsa*) del reanálisis *NCEP*, observándose en su varianza explicada (Cuadro 3) que para el mes de mayo (sin valor en el Cuadro 3), la relación no es estadísticamente significativa, y que para el mes septiembre, es baja. En el diagrama de dispersión (Figura 4) se muestra con claridad el comportamiento de la relación directa entre las dos variables, temperatura mínima local y humedad específica *NCEP*, ambas observadas en superficie. Entre menor es la humedad específica, también es más baja la temperatura mínima.

CORRELATION MATRIX		
Analysis Period: 01/01/1961 - 31/12/2001 (Annual)		
Missing values: 759		
Missing rows: 759		
	1	2
1 Tminobs1961-2001_Miguel.dat	1	0.504
2 ncepshumsa.dat	0.504	1
NO PARTIAL CORRELATIONS TO CALCULATE		

Cuadro 2. Correlación entre los datos diarios de temperatura mínima observada y la humedad específica de superficie *NCEP*.

RESULTS: EXPLAINED VARIANCE												
Analysis Period: 01/01/1961 - 31/12/2001												
Significance level: 0.05												
Total missing values: 759												
Predictand: Tminobs1961-2001_Miguel.dat												
Predictors:	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ncepshumsa.dat	0.046	0.094	0.101	0.174		0.066	0.069	0.063	0.022	0.073	0.216	0.153

Cuadro 3. Varianza explicada, indicando la relación entre los datos diarios de temperatura mínima observada y los de humedad específica en superficie *NCEP*.

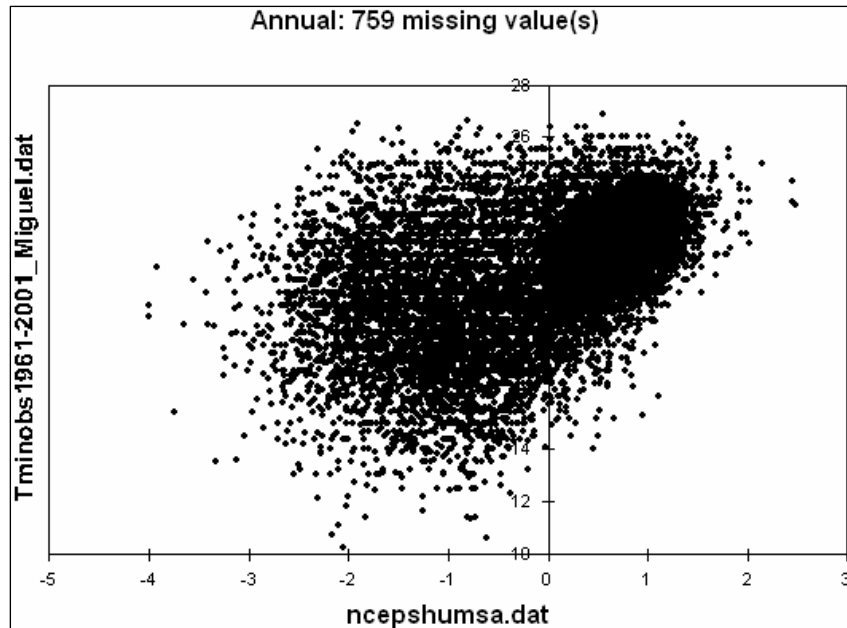


Figura 4. Diagrama de dispersión entre temperatura mínima local y humedad específica *NCEP*, ambas observadas en superficie.

Con la temperatura máxima diaria se encontró que la mayor correlación (Cuadro 4) se da con la velocidad del viento zonal en superficie (*ncepp_usa*) del reanálisis *NCEP* y su varianza explicada se muestra en el Cuadro 5. En el caso de los meses de enero y diciembre, la correlación no es estadísticamente significativa, presentando valores menores que 0.1.

CORRELATION MATRIX		
Analysis Period: 01/01/1961 - 31/12/2001 (Annual)		
Missing values: 662		
Missing rows: 662		
	1	2
1 Tmax_ 1961-2001_ Miguel.dat	1	-0.452
2 ncepp__usa.dat	-0.452	1
NO PARTIAL CORRELATIONS TO CALCULATE		

Cuadro 4. Correlación entre datos diarios de temperatura máxima observada y velocidad del viento zonal en superficie *NCEP*.

RESULTS: EXPLAINED VARIANCE												
Analysis Period: 01/01/1961 - 31/12/2001												
Significance level: 0.05												
Total missing values: 662												
Predictand: Tmax_ 1961-2001_ Miguel.dat												
Predictors:	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ncepp__usa.dat	0.005	0.055	0.089	0.219	0.275	0.319	0.350	0.418	0.401	0.300	0.152	0.027

Cuadro 5. Varianza explicada indicando la relación entre los datos diarios de temperatura máxima observada y los de velocidad del viento zonal en superficie *NCEP*.

En el diagrama de dispersión (Figura 5) se muestra con claridad lo que es el comportamiento de la relación inversa entre las dos variables, temperatura máxima local y velocidad del viento zonal *NCEP*, ambas observadas en superficie. Entre menor es la velocidad del viento zonal (componente del viento oeste-este) en superficie mayor es la temperatura máxima observada, el viento tiene un efecto refrescante en el ambiente.

Respecto a la precipitación diaria, se encuentra que la mayor correlación (Cuadro 6), se da con la velocidad del viento meridional en 850hPa (ncepp8_vsa, 1 1/2 km de altitud, aproximadamente) del reanálisis *NCEP* y su varianza explicada se muestra en el Cuadro 7, donde la relación es significativa estadísticamente, al menos de julio a octubre, período que representa las dos terceras partes de la época lluviosa (mayo-octubre). Sucede que los meses de diciembre, enero y febrero son los más secos de la época seca, y por lo tanto, no habría relación alguna debido a la nula o muy escasa lluvia. Lo mismo sucede en el mes de abril, aunque este mes es de transición de estaciones seca-lluviosa, similar a noviembre.

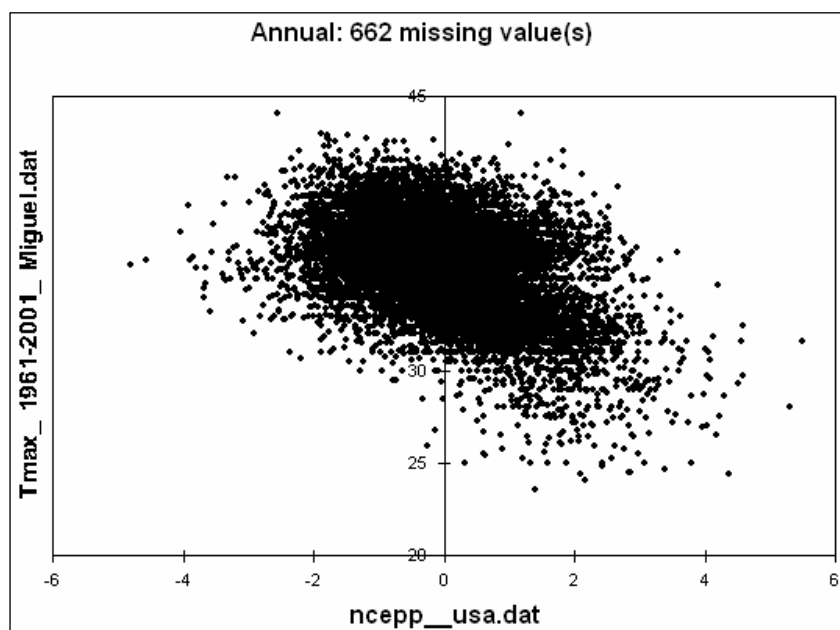


Figura 5. Diagrama de dispersión entre temperatura máxima local y velocidad del viento zonal *NCEP*, ambas observadas en superficie.

En el diagrama de dispersión (Figura 6), se muestra el comportamiento de la relación entre las dos variables, precipitación diaria local y velocidad del viento meridional en 850hPa *NCEP*. Según esta relación, las cantidades de precipitación oscilan de acuerdo a la velocidad del viento en su componente meridional (norte-sur). Físicamente, circulaciones locales como las brisas mar-tierra (norte-sur, aproximadamente), o circulaciones de mayor escala como los vientos alisios (vientos del noreste) y de otros sistemas meteorológicos, son factores asociados al régimen de lluvias de El Salvador; las máximas precipitaciones diarias ocurren en situaciones de temporal, en las cuales el viento es relativamente suave o calmado. También, los frentes de brisa marina producen lluvias, no así vientos alisios acelerados.

CORRELATION MATRIX		
Analysis Period: 01/01/1961 - 31/12/2001 (Annual)		
Missing values: 187		
Missing rows: 187		
	1	2
1	PCPobs1961-2001_Miguel.dat	1
		0.189
2	ncepp8_vsa.dat	0.189
		1
NO PARTIAL CORRELATIONS TO CALCULATE		

Cuadro 6. Correlación entre datos diarios de precipitación observada y velocidad del viento meridional en 850hPa *NCEP*.

RESULTS: EXPLAINED VARIANCE												
Analysis Period: 01/01/1961 - 31/12/2001												
Significance level: 0.05												
Total missing values: 187												
Predictand: PCPobs1961-2001_Miguel.dat												
Predictors:	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ncepp8_vsa.dat			0.004		0.010	0.030	0.061	0.047	0.054	0.052	0.044	

Cuadro 7. Varianza explicada, indicando la relación entre los datos diarios de precipitación observada y los de velocidad del viento meridional en 850hPa *NCEP*.

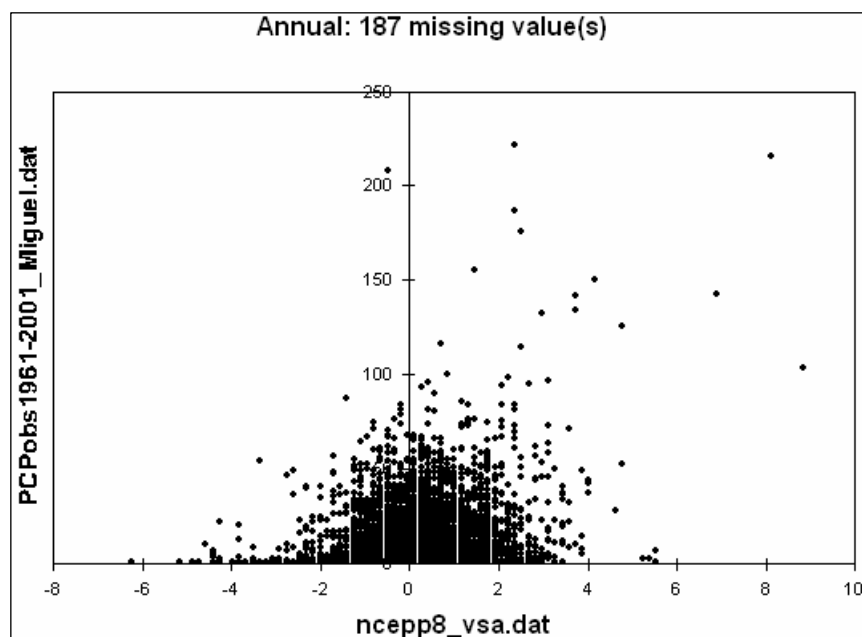


Figura 6. Diagrama de dispersión entre precipitación diaria local y velocidad del viento meridional en 850hPa *NCEP*.

3.3. Calibración del modelo

A partir de la mejor relación entre la variable predictando y una o varias variables atmosféricas predictoras, se calibra el modelo de reducción de escala regional basado en las ecuaciones de regresión lineal múltiple a partir de los datos diarios del tiempo. Los resultados de la calibración entre las variables predictando y los respectivos predictores se muestran en la Cuadro 8, en donde la mejor calibración se da entre la temperatura máxima observada localmente y la velocidad del viento zonal en superficie con un mayor $R^2=0.218$.

Variable del tiempo local (predictando)	Variable atmosférica regional (predictor)	Unconditional R-Squared	Unconditional Standard Error
Temperatura mínima diaria	Humedad específica en superficie	0.089	1.511
Temperatura máxima diaria	Velocidad del viento zonal en superficie	0.218	1.520
Precipitación diaria	Velocidad del viento meridional en 850hPa	0.025	8.502

Cuadro 8. Resultados de la calibración del modelo entre las variables predictando y predictoras.

A partir de este modelo se estiman los valores *NCEP* día a día para el periodo 1961-2001 y se evalúa en qué medida el modelo reproduce la climatología observada (predictandos). Finalmente, se procede a la construcción de los escenarios climáticos futuros.

IV. Temperatura mínima

La temperatura mínima diaria es la menor temperatura observada en un día, en el caso de El Salvador típicamente las temperaturas más bajas (mínimas) son observadas diariamente alrededor de las cinco de la mañana. Los meses de diciembre, enero y febrero son los más frescos del año y por lo tanto las temperaturas más bajas ocurren en estos meses, ocasionalmente suceden antes y muy poco frecuente después de esos meses. Lo más importante es el análisis de las temperaturas mínimas absolutas, las más bajas en un período dado, como eventos extremos del tiempo y las temperaturas mínimas medias como el comportamiento de las condiciones del clima.

4.1. Comparación temperatura mínima media observada, reanálisis y escenarios, 1961-1990

Durante el período 1961-1990, los datos de reanálisis *NCEP* (Figura 7) reproducen muy bien el comportamiento mensual de la climatología observada de la temperatura mínima media, por ejemplo, las épocas calurosas o relativamente frescas, el período canicular de julio y agosto, descenso de la temperatura a partir del la llegada del otoño hasta el invierno boreal. Las diferencias entre lo observado y el reanálisis son del orden de las dos décimas de grados Celsius en promedio mensualmente. Los escenarios A2 y B2 siguen el comportamiento del reanálisis y las diferencias entre ambos escenarios A2 y B2 son del orden de las centésimas de grado Celsius. El comportamiento mensual de las temperaturas mínimas absolutas (Figura 8), también es bien simulado por *NCEP* y los escenarios A2 y B2, las mayores diferencias (hasta de 2°C) se observan durante los meses de mayor insolación (abril y agosto, especialmente), cuando el sol se encuentra en nuestro cenit dos veces al año.

Las temperaturas mínimas absolutas son las temperaturas más bajas registradas en cada mes en el período 1961-1990. En la Figura 8 se observa que las temperaturas mínimas más bajas han sido registradas durante el invierno boreal de diciembre, enero y febrero; mientras que las temperaturas, mínimas más altas han sucedido durante los meses de septiembre y junio, correspondientes en el mismo orden a los meses con mayor precipitación y más nubosidad predominantemente nocturnas durante la época de las lluvias.

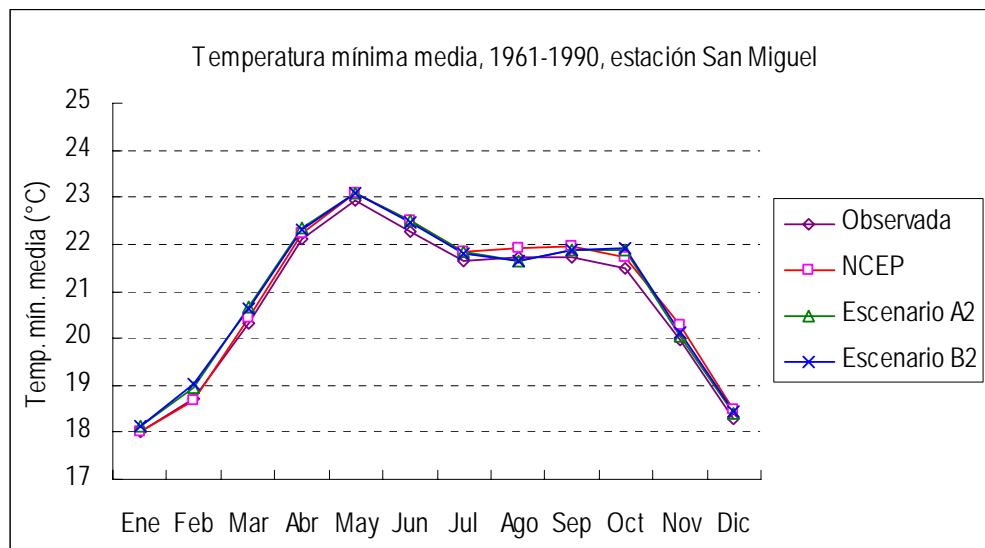


Figura 7. Comparación de la temperatura mínima media observada, *NCEP*, escenarios A2 y B2, 1961-1990, estación San Miguel.

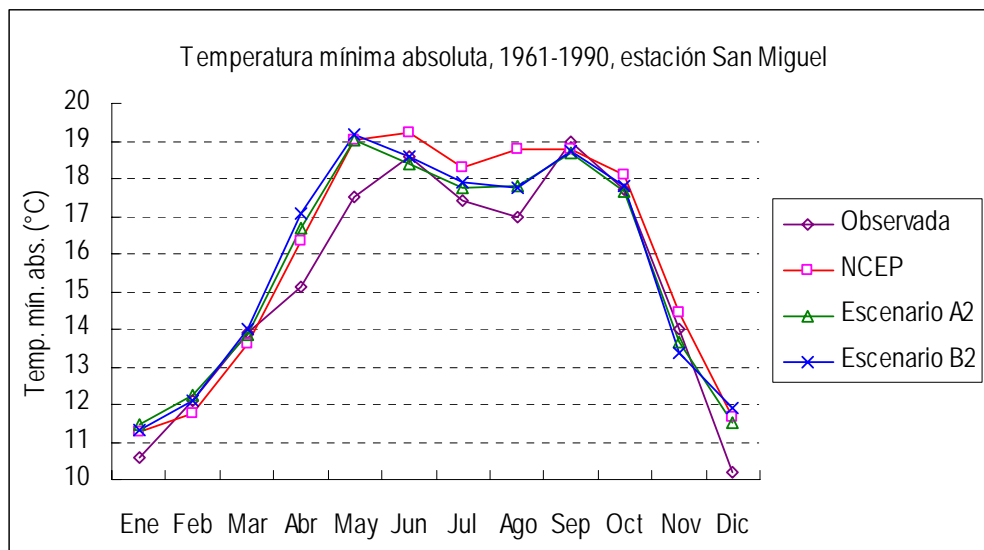


Figura 8: Temperatura mínima absoluta observada *NCEP*, escenarios A2 y B2, 1961-1990, estación San Miguel.

4.2. Escenarios futuros de temperatura mínima para 2020 y 2085

En el escenario A2 las temperaturas mínimas medias en el mes de marzo para el año 2020 (2006-2035) aumentarían hasta 0.5°C (Figura 9), y 1.0°C para el año 2085 (2070-2099), tal como se observa en la Figura 10. Este aumento de 1.0°C de la temperatura mínima media, después de 2020, representaría una condición por encima de lo normal, de uno de los meses más caluroso del año con relación a la climatología 1961-1990. Bajo el escenario A2 durante todos los meses se observarían aumentos de la temperatura mínima, excepto durante agosto donde disminuiría 0.2°C en este siglo XXI. En el escenario B2 las temperaturas mínimas medias tienen casi el mismo comportamiento que en el A2, la diferencia es que los incrementos de temperatura serían menores en el escenario B2 y que además de agosto también en julio disminuiría dicha temperatura para 2085.

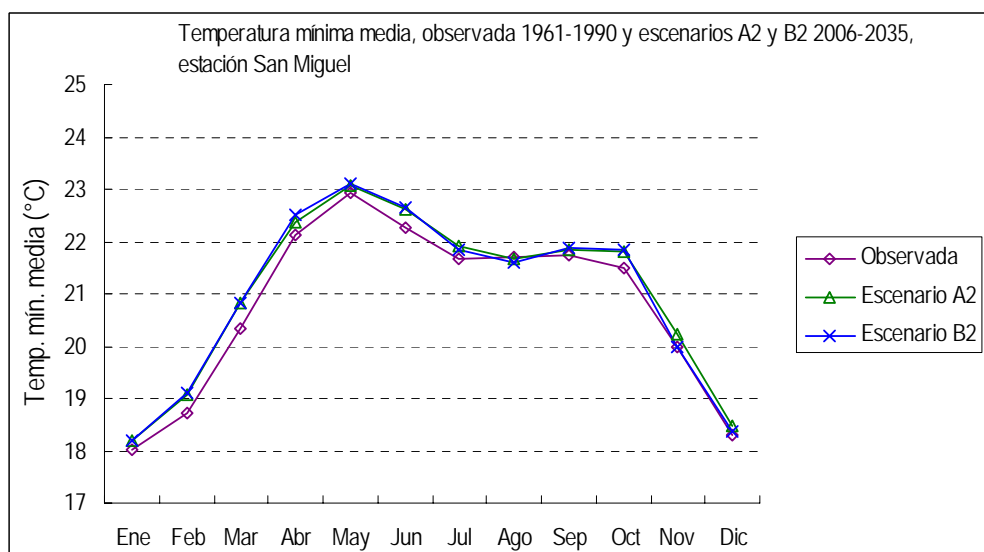


Figura 9. Comparación entre la temperatura mínima media observada 1961-1990 y los escenarios futuros A2 y B2 2006-2035, estación San Miguel.

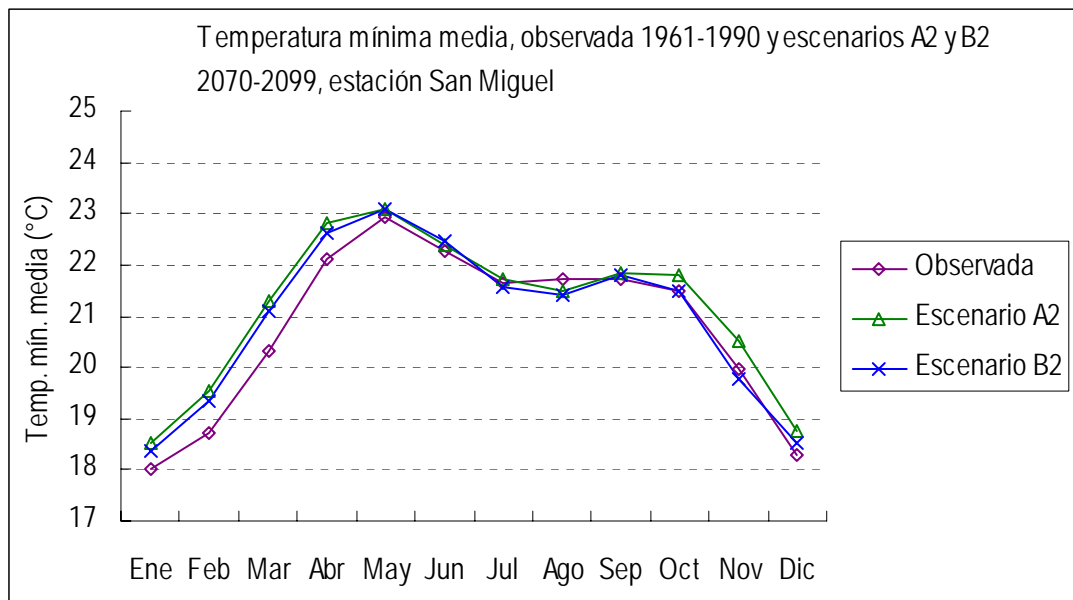


Figura 10. Comparación de la temperatura mínima media observada 1961-1990 y los escenarios A2 y B2 2070-2099, estación San Miguel

Para el año 2020 las temperaturas mínimas absolutas podrían aumentar hasta 1.8°C en el mes de abril, respecto al periodo 1961-1990, tanto para el escenario A2 como el B2 (Figura 11) y, para 2085, aumentaría hasta 2.3°C en ese mes en el escenario A2 (Figura 12).

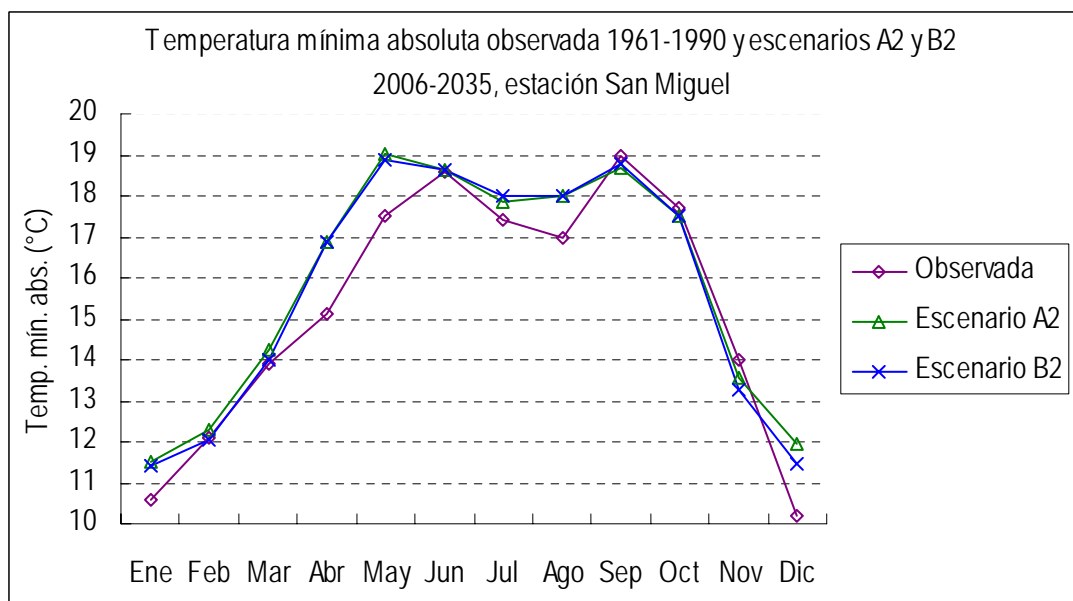


Figura 11. Comparación de las temperaturas mínimas absolutas observadas 1961-1990 y los escenarios A2 y B2 para 2020, estación San Miguel.

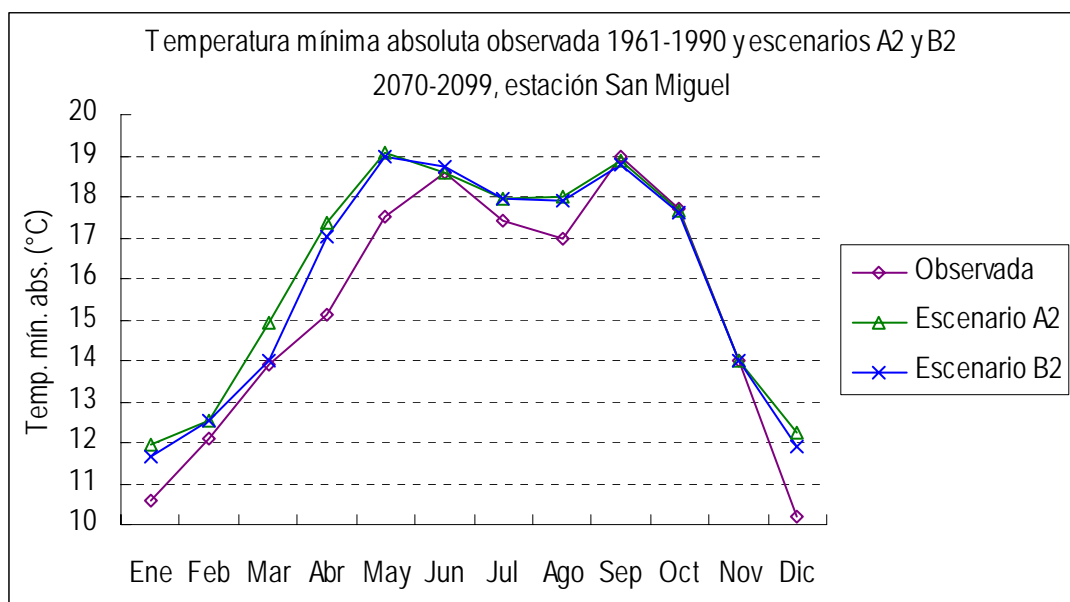


Figura 12. Comparación de las temperaturas mínimas absolutas observadas 1961-1990 y los escenarios A2 y B2 para 2085, estación San Miguel.

En el Cuadro 9 se pueden observar los cambios de la temperatura mínima media, respecto a la climatología 1961-1990 (año 1975), estos cambios indican que en promedio para el año 2020 (climatología 2006-2035), bajo el escenario A2, la temperatura mínima media anual aumentaría 0.2°C y para el 2085 aumentaría 0.2°C más. Al contrario, durante agosto (mes canicular) dicha temperatura disminuiría dos décimas de grado para 2085 (después de 2020). Bajo el escenario B2 la temperatura mínima media anual aumentaría 0.2°C y se mantendría hasta 2085. En el mes de julio (el otro mes canicular, además de agosto) la temperatura mínima disminuiría 0.1°C en el escenario B2 y después del año 2020, mientras que en agosto, en el escenario A2 disminuiría 0.2°C y hasta -0.3°C en todo el horizonte de tiempo. Después de 2020 en el escenario B2, el resto de meses del año muestra aumentos de la temperatura, excepto noviembre.

Mes	Temperatura mínima media (°C)				
	Actual 1975 (1961-1990)	Cambio climático			
		2020 (2006-2035)		2085 (2070-2099)	
		A2	B2	A2	B2
Enero	18.0	0.2	0.2	0.5	0.4
Febrero	18.7	0.4	0.4	0.8	0.6
Marzo	20.3	0.5	0.5	1.0	0.8
Abril	22.1	0.3	0.4	0.7	0.5
Mayo	22.9	0.2	0.2	0.2	0.2
Junio	22.3	0.4	0.4	0.1	0.2
Julio	21.7	0.3	0.2	0.0	-0.1
Agosto	21.7	0.0	-0.1	-0.2	-0.3
Septiembre	21.7	0.1	0.2	0.1	0.1
Octubre	21.5	0.3	0.4	0.3	0.0
Noviembre	20.0	0.3	0.0	0.5	-0.2
Diciembre	18.3	0.2	0.1	0.5	0.2
Anual	20.8	0.2	0.2	0.4	0.2

Cuadro 9. Temperatura mínima media, escenarios futuros A2 y B2 para 2020 (2006-2035) y 2085 (2070-2099) menos observada 1975 (1961-1990), estación San Miguel.

V. Temperatura máxima

La temperatura máxima diaria es la temperatura más alta observada en un día. En El Salvador la temperatura máxima normalmente ocurre alrededor de las dos de la tarde. Las temperaturas más altas del año se registran durante los meses de marzo, abril o en los primeros días de mayo antes del establecimiento pleno de las lluvias. El análisis del comportamiento de las temperaturas extremas (mínimas y máximas) de medición directa, no es menos importante que el conocimiento de la temperatura media de un día, mes o año, la cual generalmente es calculada (y no observada directamente) produciéndose menor exactitud en su evaluación.

5.1. Comparación entre temperatura máxima observada, reanálisis y escenarios A2 y B2, 1961-1990

Durante el período 1961-1990, los datos de reanálisis *NCEP* (Figura 13) reproducen muy bien todo el comportamiento de la climatología observada de la temperatura máxima media. Por ejemplo, épocas más calurosas durante los meses de marzo y abril (con mayor insolación y abundante bruma), o épocas menos calurosas durante los meses de septiembre y octubre (con lluvias y nubosidad abundantes) y además, un leve ascenso de las temperaturas máximas en el período canicular de julio y agosto, el que se puede asociar a la disminución relativa de las lluvias respecto a junio y septiembre. Las máximas diferencias entre lo observado y *NCEP* alcanzan hasta las cuatro décimas de grados Celsius en los meses de febrero a abril. Las diferencias entre sí de los escenarios A2 y B2 son del orden de centésimas de grados Celsius y no se alcanzan a distinguir en la Figura 13. Dichos escenarios describen bien el comportamiento o patrón

climatológico de la temperatura máxima observada, excepto y curiosamente, durante el mes de julio, en el cual difieren significativamente. En el comportamiento de las temperaturas máximas absolutas (Figura 14), tanto los datos *NCEP* como los escenarios A2 y B2, generalmente sobreestima hasta 2.9°C lo observado, aunque el reanálisis *NCEP* y los escenarios A2 y B2 muestran casi el mismo comportamiento con la diferencia marcada en el mes de julio, igual como en el caso de la temperatura máxima media.

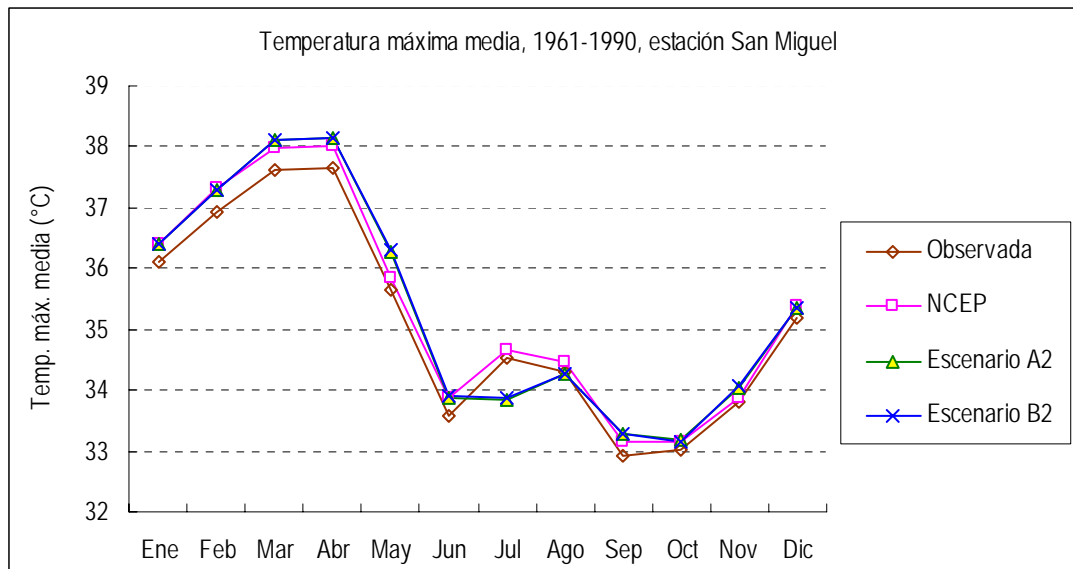


Figura 13. Comparación entre la temperatura máxima media observada, *NCEP* y los escenarios A2 y B2, 1961-1990, estación San Miguel.

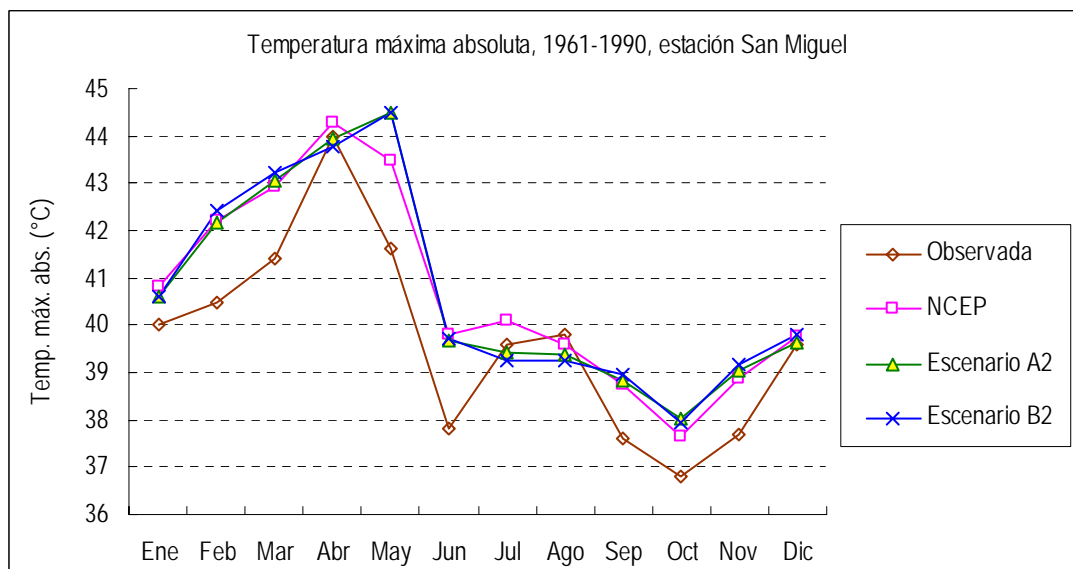


Figura 14. Comparación entre la temperatura máxima absoluta observada, *NCEP* y los escenarios A2 y B2, 1961-1990, estación San Miguel.

5.2. Escenarios de temperatura máxima para años 2020 y 2085

Para el año 2020, los escenarios muestran que las temperaturas máximas medias aumentarían 0.3°C en promedio anual (Cuadro 10), en ambos escenarios A2 y B2, respecto al período 1961-1990. Prácticamente todos los meses experimentarían aumentos de temperatura llegando hasta los 0.7°C en el mes de mayo (Figura 15). Este aumento de 0.7°C de la temperatura máxima media en mayo para el período 2006-2035, sería una condición por encima de lo normal de uno de los meses calurosos del año, al menos en su primera mitad, con relación a la climatología 1961-1990. En el mes de julio la temperatura disminuiría 0.5°C (A2) y 0.6°C (B2), respectivamente, en el mes de agosto las disminuciones serían del orden de la centésima de grado Celsius. Las diferencias de aumento de temperatura entre los escenarios A2 y B2 para 2020 son del orden de un décimo de grado Celsius y de signo variable. Las temperaturas máximas absolutas experimentarían aumentos significativos hasta de 2.8°C (Figura 16) en el mes de mayo en el escenario B2 (correspondiente a menores emisiones de gases de efecto invernadero). Para el período 2006-2035, igual que las temperaturas máximas medias, las máximas absolutas se presentarían por debajo de lo observado en el mes de julio y los incrementos de temperatura serían mayores en el escenario B2.

Mes	Temperatura máxima media (°C)				
	Actual 1975 (1961-1990)	Cambio climático			
		2020 (2006-2035)		2085 (2070-2099)	
		A2	B2	A2	B2
Enero	36.1	0.3	0.3	0.3	0.3
Febrero	36.9	0.4	0.5	0.4	0.3
Marzo	37.6	0.4	0.5	0.4	0.4
Abril	37.6	0.6	0.4	0.5	0.5
Mayo	35.6	0.7	0.7	0.9	0.7
Junio	33.6	0.4	0.5	0.8	0.6
Julio	34.5	-0.5	-0.6	0.0	-0.2
Agosto	34.3	0.0	0.0	0.9	0.6
Septiembre	32.9	0.6	0.6	1.3	1.2
Octubre	33.0	0.1	0.2	0.3	0.3
Noviembre	33.8	0.2	0.2	0.3	0.3
Diciembre	35.2	0.2	0.1	0.2	0.2
Anual	35.1	0.3	0.3	0.5	0.4

Cuadro 10. Temperatura máxima media, escenarios futuros A2 y B2 para 2020 (2006-2035) y 2085 (2070-2099) menos observada 1975 (1961-1990), estación San Miguel.

Temperaturas máximas diarias de 38°C ó superiores, se consideran temperaturas extremas ubicadas en el rango por encima lo normal. En la Figura 17 se muestra el número de veces que la temperatura máxima diaria ha alcanzado los 38°C ó más, se puede observar que el modelo (escenarios *NCEP*) describe bien el comportamiento o patrón de rebases del período 1961-1990, pero sobrestima dicho número en más del 50% en los meses de enero, febrero, y mayo, especialmente. Debido a la sobrestimación de dichos rebases es conveniente indicar el cambio entre escenarios modelados para 1961-1990 y para horizontes futuros. La Figura 18 muestra claramente que para 2020 en los meses de febrero y mayo aumentaría el

número de rebases de 38°C de la temperatura máxima diaria, una señal de que estos meses serían ligeramente más calurosos.

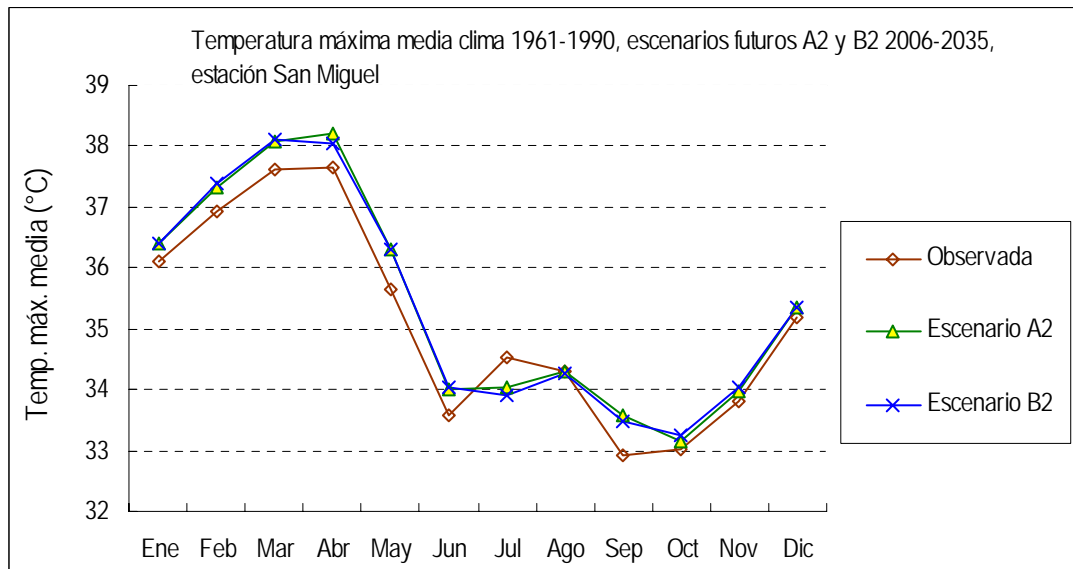


Figura 15. Comparación entre los escenarios futuros A2 y B2 para 2020 de la temperatura máxima media y la climatología observada 1961-1990.

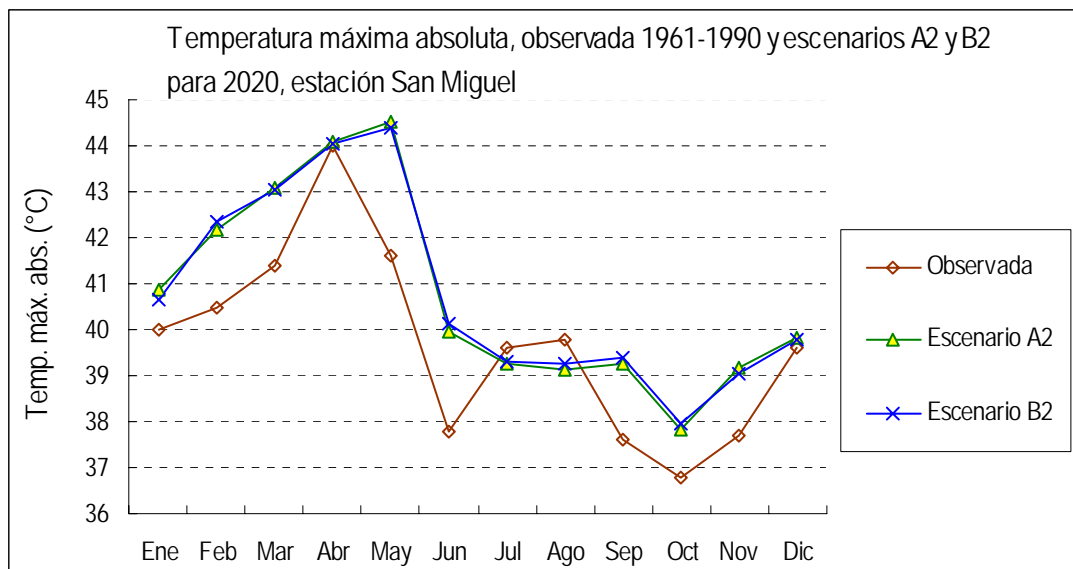


Figura 16. Comparación entre los escenarios futuros A2 y B2 de la temperatura máxima absoluta para 2020 (2006-2035) y lo observado (1961-1990).

Para el año 2085, los escenarios futuros muestran que las temperaturas máximas medias aumentarían en promedio anual 0.2°C y 0.1°C más, después de 2020, respecto a la climatología 1961-1990 en los escenarios A2 y B2, respectivamente, tal como se muestra en el Cuadro 10 ya referido. El comportamiento mensual de la temperatura máxima media para 2085 es similar al escenario del 2020, en cuanto a tendencias, excepto, que en el mes de julio la temperatura máxima media de lo escenarios estarían al menos igual que lo observado en el período 1961-1990 y no por debajo como en el escenario para 2020. Se puede observar que en el presente siglo XXI el escenario A2 representaría mayor calentamiento que el escenario B2 (Figura 19), con aumentos de la temperatura máxima media anual de 0.5°C y 0.4°C, respectivamente, en ambos casos son condiciones de temperatura anual arriba de lo normal.

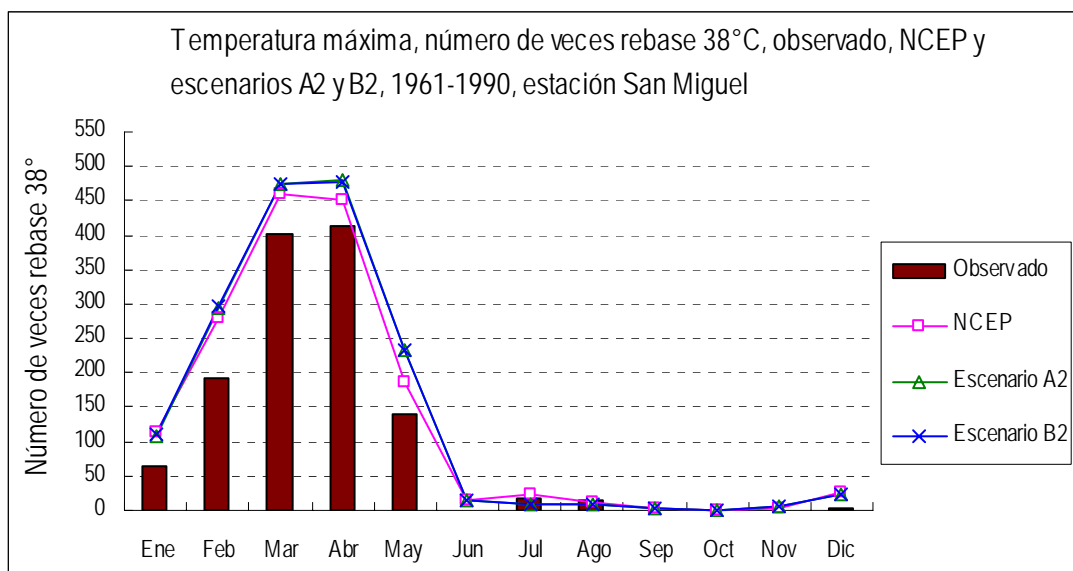


Figura 17. Comparación del número de veces que la temperatura máxima diaria ha sido igual o mayor de 38°C y lo que modelan los escenarios A2, B2 y NCEP respecto a los observado 1961-1990.

En el escenario A2 las temperaturas máximas absolutas para el año 2085 casi llegarían a los 45°C, principalmente en mayo, y no en los meses de marzo o abril, en los cuales la temperatura media es más alta (Figura 20). Se observaría una reducción del número de rebases de 38°C de la temperatura máxima para el año 2085, aunque no de manera significativa (Figura 21), principalmente en los meses de febrero y marzo. En general, los rebases de 38°C de la temperatura máxima diaria aumentarían en ambos escenarios A2 y B2, especialmente durante la época lluviosa (Cuadro 11).

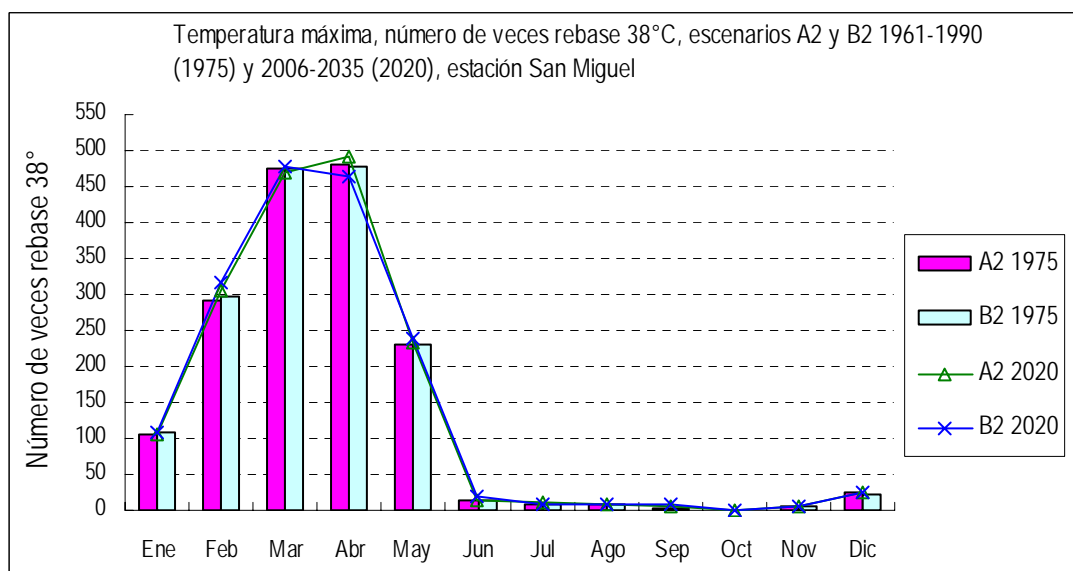


Figura 18. Comparación entre escenarios A2 y B2 observados 1975 y futuros 2020 del número de veces que la temperatura máxima sea de 38°C ó más.

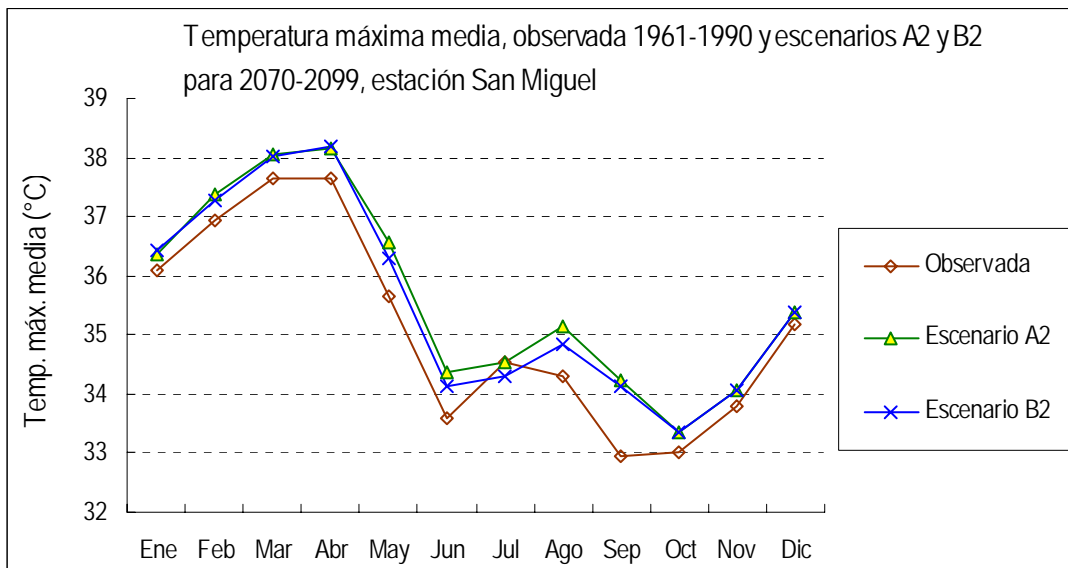


Figura 19. Comparación escenarios futuros A2 y B2 de la temperatura máxima media para 2085 y la observada 1961-1990.

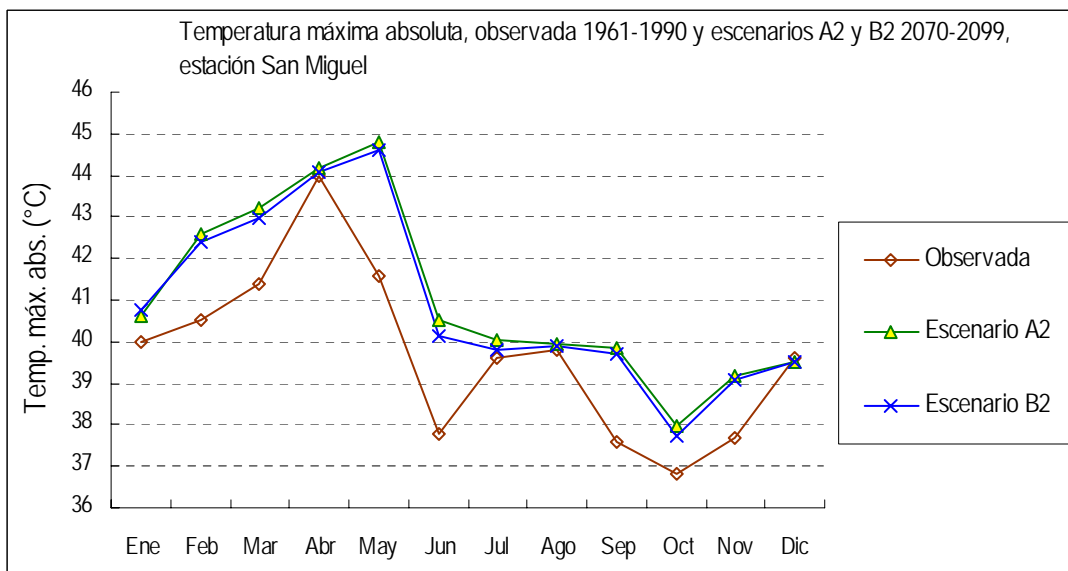


Figura 20. Comparación entre los escenarios futuros A2 y B2 de la temperatura máxima absoluta para 2085 y lo observado 1961-1990.

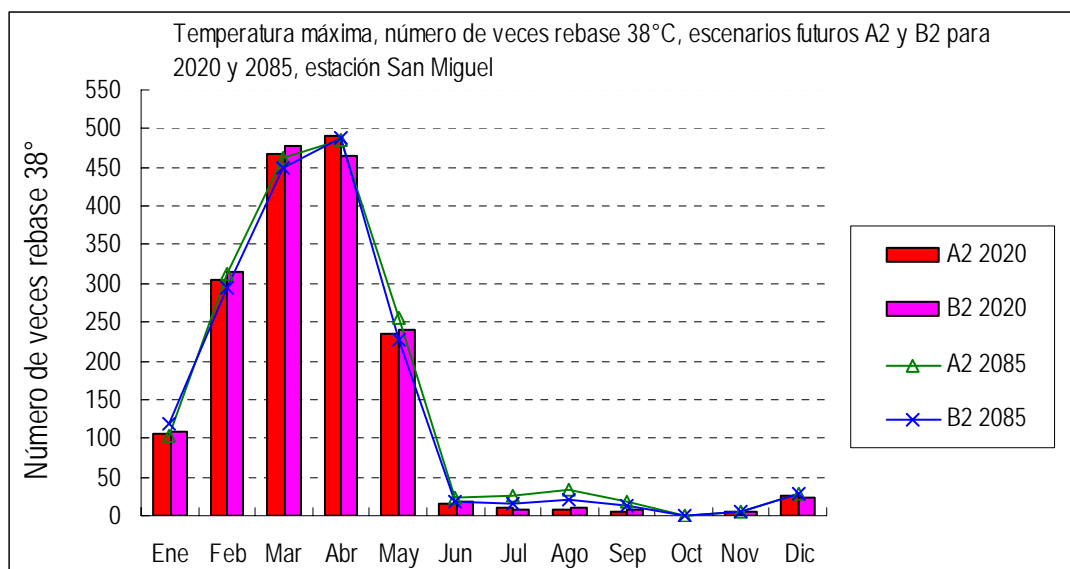


Figura 21: Comparación entre los escenarios futuros A2 y B2 del número de veces que la temperatura máxima sea de 38°C ó más para 2020 y 2085.

Mes	Número de veces rebase 38°C de la temperatura máxima diaria				
	Actual 1975 (1961-1900)	Cambio climático (número de veces)			
		2020 (2006-2035)		2085 (2070-2099)	
		A2	B2	A2	B2
Enero	64	0	-2	-2	8
Febrero	191	13	19	20	-3
Marzo	402	-7	2	-12	-25
Abril	414	10	-13	4	12
Mayo	140	3	9	23	-4
Junio	0	1	4	9	4
Julio	17	2	0	18	8
Agosto	15	0	1	26	12
Septiembre	0	2	4	14	10
Octubre	0	0	0	-1	0
Noviembre	0	1	-1	1	0
Diciembre	4	1	1	3	4
Anual	1247	25	23	103	27

Cuadro 11. Temperatura máxima diaria, número de veces rebase 38°C, climatología de referencia actual 1975 (1961-1990) y escenarios futuros A2 y B2 para 2020 (2006-2035) y 2085 (2070-2099), estación San Miguel.

VI. Precipitación

La variabilidad intranual de la precipitación en la planicie costera entre los departamentos de La Paz, San Vicente y Usulután, indica una época seca de noviembre a abril y una lluviosa de mayo a octubre. Se observa una estructura bimodal, caracterizada por la denominada canícula, la cual presenta un mínimo relativo de lluvia durante los meses de julio y agosto, respecto a los meses de junio y septiembre, los cuales son segundo y primer máximo principal de lluvia respectivamente durante la época lluviosa. Este régimen de lluvia se extiende a gran parte del territorio nacional, especialmente de toda la franja costera y zona oriental del país.

6.1. Comparación precipitación observada, modelo *NCEP* y escenarios A2 y B2, 1961-1990

Los modelos de reanálisis *NCEP* y de escenarios A2 y B2 del *SDSM* reproducen bien el patrón de la lluvia mensual (Figura 22), en lo que se refiere a la distribución intranual, tales como: la estacionalidad (estaciones lluviosa y seca), el período canicular de los meses de julio y agosto, los picos lluviosos correspondientes a los meses de junio y septiembre respecto a los otros meses de la estación lluviosa. Sin embargo, cuantitativamente tanto los resultados del *NCEP*, como los escenarios A2 y B2 generados para la climatología 1961-1990, sobrestiman los registros de la precipitación hasta 50% más de la lluvia anual, y en el caso de la mensual, hasta 57% más en el mes de mayo. En los meses de la estación seca, especialmente de diciembre a marzo, esas sobrestimaciones son mayores pero las cantidades de lluvias caídas, algunas de tipo invernal, son muy pequeñas, pero su impacto, debido al exceso o déficit de las mismas, no es menos importante especialmente durante los meses de transición de noviembre y abril entre las estaciones seca-lluviosa.

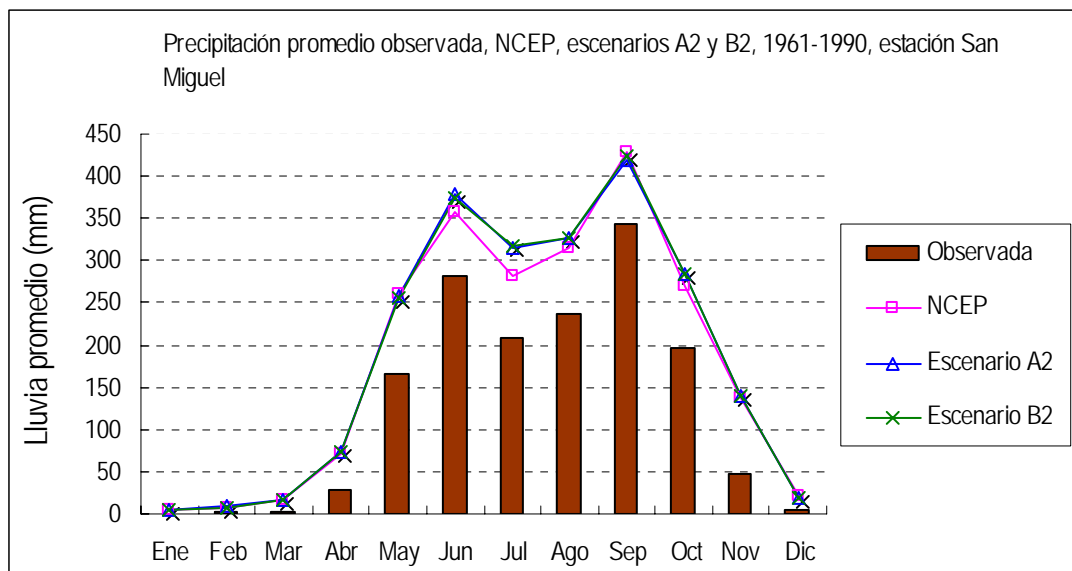


Figura 22. Comparación mensual lluvia acumulada entre observada y resultados *NCEP* y escenarios A2 B2, 1961-1990, estación San Miguel.

6.2. Comparación entre escenarios de precipitación A2 y B2 1961-1990 y futuros para años 2020 y 2085

Debido a la sobrestimación cuantitativa de las lluvias por los modelos de reanálisis *NCEP* y de escenarios A2 y B2, respecto a lo observado en la climatología 1961-1990, conviene evaluar la relación entre los escenarios futuros y los escenarios generados para el período climatológico 1961-1990. La relación entre escenarios actuales y futuros para 2020 se muestra gráficamente en la Figura 23, observándose que para el año 2020 (promedio 2006-2035) no habría cambios en el patrón de lluvia mensual. Sin embargo, los acumulados totales disminuirían en la mayoría de meses, aunque no significativamente, principalmente en el escenario B2 hasta un 4.9% en el mes de julio, estimándose una disminución de 1.3% en la precipitación promedio anual (Cuadro 12).

Para fines del presente siglo XXI (año 2085), tampoco se observa que hallan cambios en el patrón de lluvia mensual (Figura 24). Sin embargo, se evidencian un poco más las reducciones de lluvia, pero todavía no significativas, especialmente durante los meses de junio, julio y agosto. Las reducciones de lluvia serían mayores a partir del año 2020 en casi todos los meses, alcanzando hasta 8.9% menos en el escenario A2 en el mes de agosto (Cuadro 12) y -4.5% en la precipitación anual. En ambos casos las reducciones se encuentran dentro del rango de la variabilidad normal de la climatología de referencia 1961-1990.

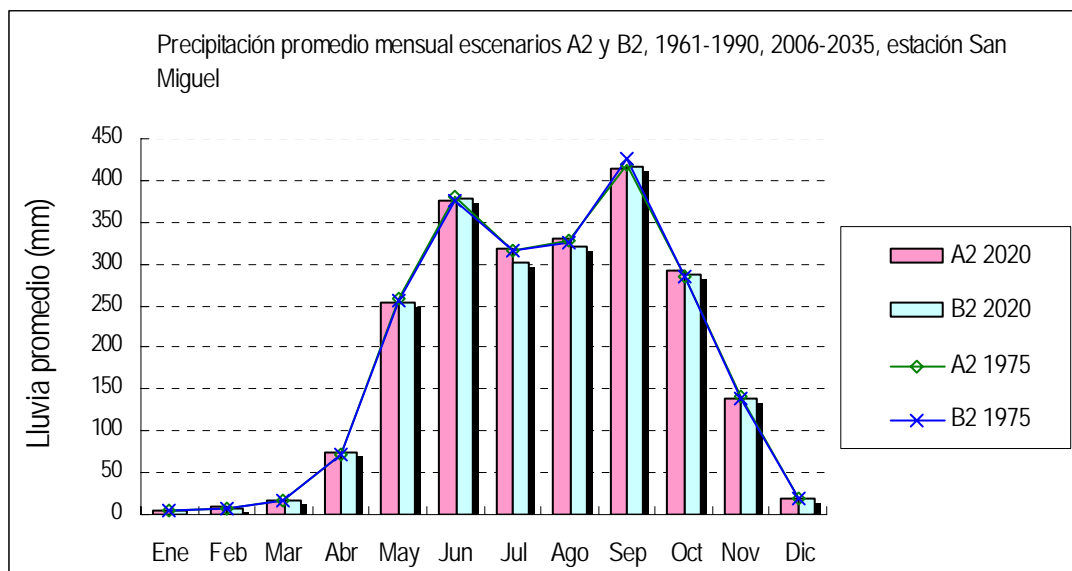


Figura 23. Comparación mensual de la lluvia acumulada entre escenarios A2 y B2 para 1961-1990 y 2006-2035, estación San Miguel.

Mes	Precipitación (mm) 1975 (1961-1900)	Cambio climático (%)			
		2020 (2006-2035)		2085 (2070-2099)	
		A2	B2	A2	B2
Enero	1	0.6	-0.4	-0.5	1.3
Febrero	2	1.6	0.3	0.1	0.4
Marzo	3	-0.1	-2.4	-1.3	-1.8
Abril	28	1.3	0.5	3.5	1.4
Mayo	166	-2.1	-1.5	-5.7	-2.9
Junio	281	-1.0	0.7	-7.7	-5.1
Julio	210	1.1	-4.9	-6.9	-4.9
Agosto	236	1.2	-1.6	-8.9	-5.7
Septiembre	343	-1.0	-1.7	-1.9	-2.6
Octubre	197	2.4	1.0	0.6	-3.1
Noviembre	46	-1.4	-0.9	-1.1	-0.7
Diciembre	5	-1.1	-1.4	0.2	0.6
Anual	1497	0.0	-1.3	-4.5	-3.6

Cuadro 12. Precipitación, escenarios futuros A2 y B2 para 2020 (2006-2035) y 2085 (2070-2099) menos escenarios generados 1975 (1961-1990), estación San Miguel.

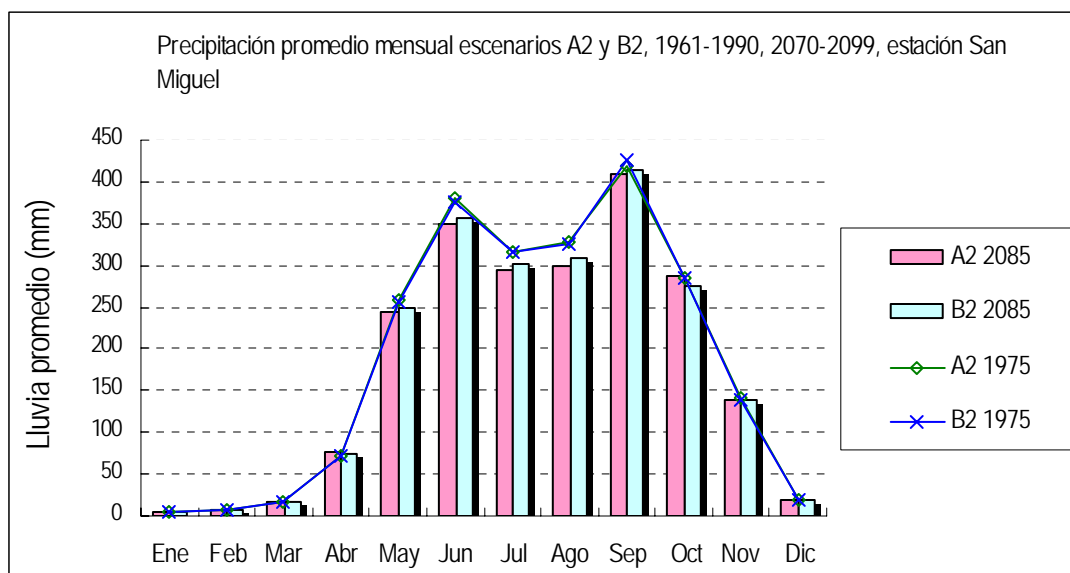


Figura 24. Comparación de la lluvia acumulada mensual entre los escenarios A2 y B2 generados 1961-1990 (1975) y los escenarios futuros para 2070-2099 (2085).

6.3. Rebase lluvias de 40 mm diarios

Precipitaciones de 40 mm ó más en un día se consideran lluvias extremas ubicadas en el rango por encima de lo normal. El mayor número de veces, que las cantidades de lluvia diaria son iguales o mayores de 40 mm, ocurre en los meses junio y septiembre, los más lluviosos de la época (Figura 25). Los datos de reanálisis *NCEP* y los escenarios A2 y B2 del *SDSM*, reproducen bien el patrón mensual; sin embargo, el número de veces de dicho rebase es subestimado significativamente, excepto, durante el mes de septiembre que es el máximo principal de lluvias. Las lluvias de 40 mm diarios ó más, ha sido registrado solamente durante la estación de las lluvias de mayo a octubre, y en cuanto mayor es número de rebases es cuando los modelos *NCEP* y de escenarios se ajustan mejor a lo observado.

Al evaluar el comportamiento actual, de los rebases antes descritos, considerando los escenarios A2 y B2 generados en el período 1961-1990 y los respectivos escenarios futuros, podemos observar que para 2020 durante el mes de septiembre el número de rebase se reduce (Figura 26) y para 2085 se reducen aún más, incluso, durante los meses de junio, julio y agosto (Figura 27), principalmente en el mes de junio. Las reducciones de estas cantidades de lluvia diarias, de 40 mm ó más (Cuadro 13), y los aumentos de rebases de 38°C de la temperatura máxima diaria, concuerdan con las disminuciones de las cantidades de lluvia mensual después de 2020 indicadas por ambos escenarios A2 y B2.

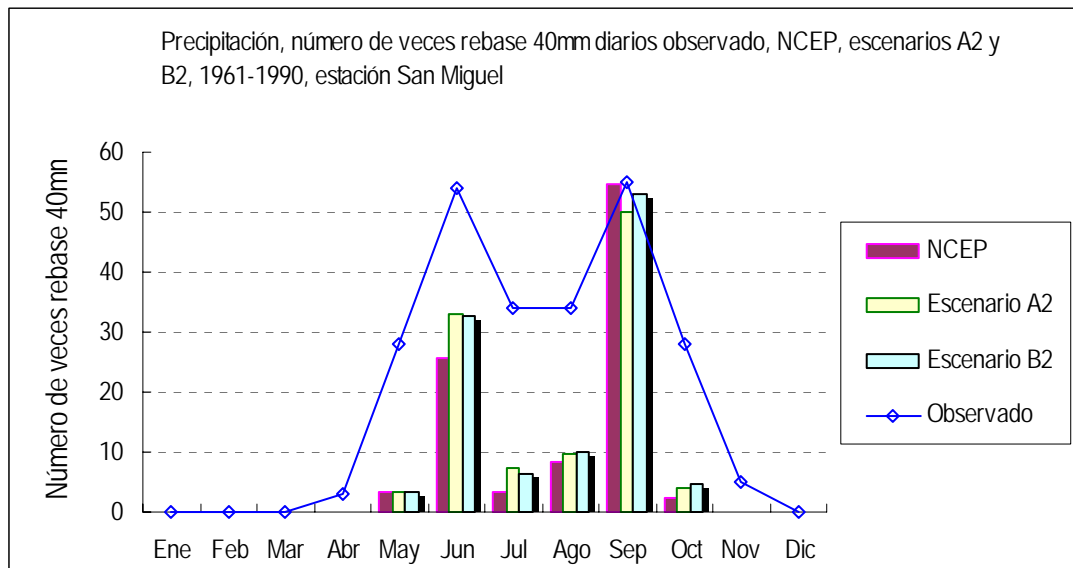


Figura 25. Número de veces en que la lluvia diaria ha sido observada igual o mayor de 40 mm, reanálisis *NCEP*, escenarios A2 Y B2, período 1961-1990, estación San Miguel.

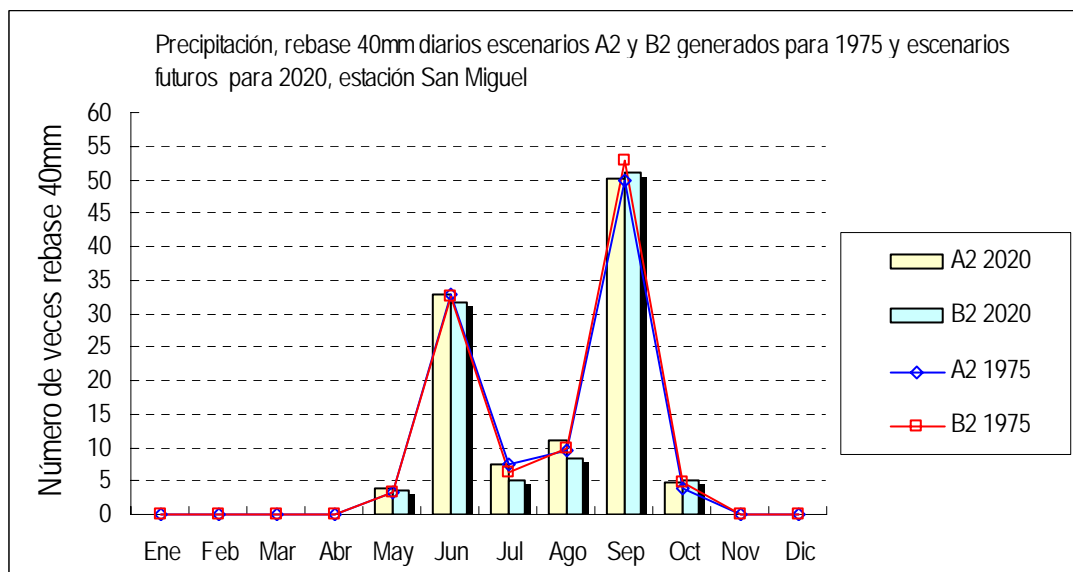


Figura 26. Número de veces en que el escenario de lluvia diaria rebase los 40 mm en el año 2020, estación San Miguel.

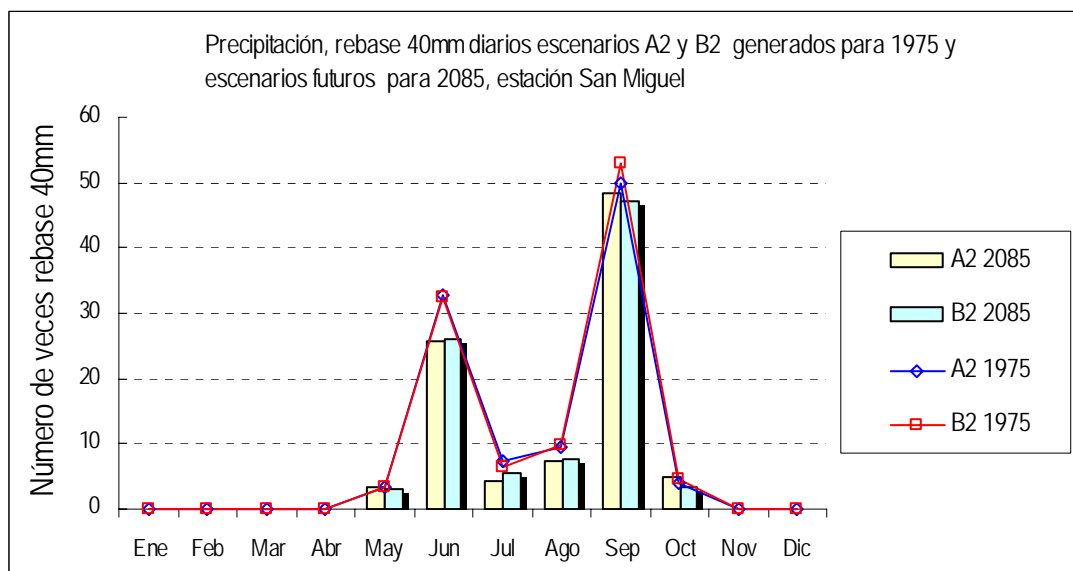


Figura 27. Número de veces en que el escenario de lluvia diaria rebase los 40 mm en el año 2085, estación San Miguel.

Mes	Número de veces rebase 40mm de la precipitación diaria				
	Actual 1975 (1961-1990)	Cambio climático (número de veces)			
		2020 (2006-2035)		2085 (2070-2099)	
		A2	B2	A2	B2
Enero	0	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0	0
Abril	3	0	0	0	0
Mayo	28	1	0	0	0
Junio	54	0	-1	-7	-7
Julio	34	0	-1	-3	-1
Agosto	34	1	-2	-2	-2
Septiembre	55	0	-2	-2	-6
Octubre	28	1	0	1	-1
Noviembre	5	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0	0
Anual	241	3	-5	-13	-17

Cuadro 13. Precipitación, número de veces rebase lluvias de 40 mm diarios, climatología de referencia actual 1975 (1961-1990) y escenarios futuros A2 y B2 para 2020 (2006-2035) y 2085 (2070-2099), estación San Miguel.

VII. Conclusiones

Los datos de los modelos reanálisis *NCEP* y de reducción de escala *SDSM* para los escenarios A2 y B2, reproducen bien lo observado de la temperatura mínima media, mínima absoluta y máxima media. Otros parámetros como la temperatura máxima absoluta, rebases de 38°C de temperatura diaria y de precipitación media mensual, son sobrestimados. En el caso de los rebases de 40 mm de lluvia diaria, éstos son subestimados, aunque en todos los casos el patrón de distribución mensual es bien reproducido.

Con base en el análisis de los resultados obtenidos en la aplicación de los modelos adoptados, a continuación se resumen las conclusiones principales.

1. Las temperaturas mínimas medias en el escenario A2 aumentarían en el mes de marzo hasta 0.5°C para 2020 y 1.0°C para 2085. Dicho aumento de la temperatura mínima después de 2020, sería una condición por encima de lo normal de uno de los meses más calurosos del año, según la climatología 1961-1990.
2. Para el año 2020 las temperaturas mínimas absolutas podrían aumentar hasta 1.8°C en el mes de abril, respecto al período 1961-1990; tanto para los escenarios A2 como B2. Para 2085, aumentaría hasta 2.3°C en el mismo mes.
3. Durante el período 1961-1990, el modelo de reanálisis *NCEP* reproduce muy bien todo el comportamiento de la climatología observada de la temperatura máxima media. Tal es el caso del período bastante caluroso entre los meses de marzo y abril, y del período canicular de julio y agosto, el

cual es menos caluroso. De igual manera, el modelo estadístico de reducción de escala *SDSM* describe bien lo observado, bajo ambos escenarios A2 y B2, excepto durante el mes de julio. En el comportamiento de las temperaturas máximas absolutas, el modelo difiere hasta 2°C respecto a lo observado; y lo mismo sucede con el comportamiento del número de veces rebase de 38°C de la temperatura máxima diaria.

4. Para el año 2020, los escenarios A2 y B2 indican que las temperaturas máximas medias aumentarían 0.3°C en promedio anual. Casi todos los meses experimentarían aumentos de temperatura hasta de 0.7°C en mayo, lo cual sería una condición por encima de lo normal con respecto a 1961-1990. Sólo en el mes de julio la temperatura disminuiría hasta 0.6°C (B2). Las diferencias entre los escenarios A2 y B2, son del orden de las décimas de grado Celsius, pero la mayoría de veces los valores del escenario A2 se presentan por arriba del B2.
5. Los escenarios para el año 2085 muestran que las temperaturas máximas medias aumentarían en promedio anual 0.2°C más que en el 2020 (A2). El comportamiento mensual para 2085 sería similar al escenario del 2020 en cuanto a tendencias, excepto, que la temperatura en el mes de julio también se incrementaría.
6. Para el año 2020, las temperaturas máximas absolutas serían en el mes de mayo, y no en abril como se ha venido registrando. Las temperaturas del mes de mayo experimentarían aumentos significativos hasta de 2.8°C. Al igual que en el caso de las temperaturas máximas medias, las máximas absolutas se presentarían por debajo de lo observado en el mes de julio. Asimismo, las veces que la temperatura máxima sea de 38°C ó más, sería superado significativamente en la mayoría de los meses de la época lluviosa, especialmente de junio a septiembre, hasta 26 veces más en el mes de agosto en el escenario A2 para 2085.
7. Para el siglo XXI se proyecta un aumento de la temperatura máxima media entre 0.5°C (A2) y 0.4°C (B2) en promedio anual para 2085. En ambos casos las condiciones de temperatura anual estarían arriba de lo normal. Las temperaturas máximas absolutas para el año 2085 casi llegarían a los 45°C en mayo, y no en abril como ha sido lo observado, y la temperatura mínima anual aumentaría en menor proporción respecto a la temperatura máxima (A2).
8. En cuanto a la precipitación, tanto el modelo de reanálisis *NCEP* como el modelo de escenarios A2 y B2, reproducen bien la distribución intranual en lo que respecta a la estacionalidad (época lluviosa y seca), el período de *canícula* durante julio y agosto, los picos lluviosos correspondientes a los meses de junio y septiembre respecto a los otros meses de la época lluviosa. Sin embargo, las mejores correlaciones encontradas fueron bajas, y se reflejaron en la sobreestimación de los valores de la precipitación mensual promedio observada hasta 50% más de la lluvia anual, y mensual hasta 57% más en el mes de mayo.
9. Los escenarios futuros indicarían disminuciones de la precipitación media anual hasta de 1.3% para 2020 (B2) y para 2085 hasta -4.5% (A2), con respecto a 1961-1990. Estas reducciones no son significativas ya que su variación se encontraría dentro de la variabilidad actual normal.
10. Los futuros escenarios A2 y B2 de los acumulados de lluvia mensual, para los años 2020 y 2085, muestran el mismo patrón actual del régimen de lluvia intranual. Sin embargo, dichos escenarios muestran reducciones de lluvia las cuales serían mayores después de 2020, hasta de -8.9% en el mes de agosto en el escenario A2 para 2085. Al igual que para la precipitación media anual, las disminuciones mensuales no son significativas, por encontrarse dentro de la variabilidad normal actual.

11. Anualmente el número de veces que la lluvia diaria sería de 40mm ó más disminuye ligeramente para 2020 y 2085. Sin embargo, a nivel mensual ese número disminuye hasta más del 10% para el mes de junio en ambos escenarios A2 y B2 para el año 2085. En general, para 2085 el número de rebases de 40 mm de lluvia diarios disminuiría.
12. Para el presente siglo XXI las temperaturas mínimas medias mensuales aumentarían y también las máximas y en mayor proporción que las mínimas. Lo anterior podría ser una señal de un mayor rango de oscilación de la temperatura diurna, con noches menos frescas y días más calurosos. En congruencia con esto, el número de rebases de 38°C de temperatura diaria aumentaría, especialmente en la época lluviosa.
13. En términos generales, si bien es cierto las precipitaciones presentarían disminuciones estadísticamente no significativas, los aumentos proyectados para las temperaturas podrían ser suficientes para producir eventuales alteraciones en el ciclo hidrológico, fundamentalmente en los niveles de evaporación, y por ende, disminuir la disponibilidad de agua. Por consiguiente, para desarrollar una representación del clima futuro a partir de las salidas del modelo *SDSM*, es necesario analizar de manera conjunta los efectos combinados de los cambios de las diferentes variables proyectadas. Sobre esa base, podría interpretarse que los niveles de precipitaciones no sean suficientes para compensar los impactos del incremento de las temperaturas sobre la disponibilidad del agua. Asimismo, podría preverse que las precipitaciones podrían estar mejor distribuidas en el tiempo, debido a que el número de veces que la lluvia diaria sería de 40 mm ó más se reduciría.

VIII. Bibliografía

- Aguilar, E., et Al., 2005: *Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003*.
- Centella, A., et Al., 1998: *Escenarios climáticos de referencia para la República de El Salvador*, 21 pp., MARN.
- Magaña, V., 2005: *Elaboración de Escenarios Climatológicos para la Región de México, Centroamérica y Cuba*, Informe de Trabajo, México.
- Watson, R. T., et Al, 2001: *Tercer Informe de Evaluación: Cambio Climático 2001, Informe de Síntesis*.