Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM
Núm. 47, 2002, pp. 59-76

Impacto de la deforestación en el microclima de la subcuenca río Corona, Tamaulipas, México

Wilver Enrique Salinas Castillo*
Eduardo Javier Treviño Garza**

Recibido: 29 de noviembre de 2001
Aceptado en versión final: 8 de mayo de 2002

Resumen. El objetivo de esta investigación fue evaluar los posibles impactos ocasionados en una subcuenca de la zona centro del estado de Tamaulipas, México, debidos a cambios acelerados en los usos del suelo y la cubierta vegetal, los cuales afectan la distribución de la radiación solar incidente en calor sensible y calor latente. Se encontró evidencia de que en algunas áreas de la subcuenca la redistribución del calor tuvo efectos en el microclima local impactando la superficie del suelo al favorecer procesos de desertificación. En el estudio se utilizó información disponible de mapas de uso del suelo de 1972 y una imagen de satélite Landsat de 1998, para establecer las tendencias generales en los cambios de la cubierta vegetal, y fue acompañado del modelamiento de series de tiempo y el análisis estadístico de datos de temperatura y precipitación de cinco estaciones meteorológicas localizadas en la zona de influencia de la cuenca, con registros históricos desde 1958.

Palabras clave: Imágenes, Landsat, microclima, modelamiento, series de tiempo.

Impact of deforestation on the microclimate of the Corona river basin, Tamaulipas, Mexico

Abstract. The research aims to evaluate the potential impacts derived from the accelerated changes in land use and vegetation cover affecting the distribution of incoming solar radiation into sensible and latent heat in a secondary basin located at the central portion of the Tamaulipas state, Mexico. Evidences were found that heat redistribution in some areas within the basin affected the local microclimate, impacting land by favoring desertification processes. The study used information from 1972 land-use maps and a 1998 Landsat satellite image to establish general trends in plant-cover changes. Additionally, time-series modelling and statistical analyses of temperature and rainfall were conducted for five meteorological stations located within the basin´s influence area with historical records since 1958.

Key words: Imagery, Landsat, microclimate, modeling, time series.

INTRODUCCIÓN

El efecto de las actividades humanas en el medio ambiente requiere ser evaluado en forma dinámica y periódica para obtener un conocimiento más completo de los procesos ecológicos que se afectan, de manera de estar en posibilidad de estimar sus condiciones futuras. En este sentido, uno de los factores de mayor impacto en los ecosistemas vegetales ha sido la deforestación, que sucede como resultado de las actividades productivas del desarrollo socioeconómico, debido principalmente a la expansión de la frontera agrícola. La remoción de la vegetación natural en grandes superficies tiene un impacto sobre la proporción de calor latente y sensible de la radiación solar incidente en una determinada zona (Goel y Norman, 1992:163). Esta modificación del equilibrio energético propicia cambios en el microclima local y regional los cuales, a su vez, impactan procesos a nivel de superficie, generando problemas de desertificación, pérdida de nutrientes en el suelo, alteración de ciclos de producción biológica y cambios en los procesos hidrológicos a nivel de cuenca (Charney, 1975:103). En los últimos años se han registrado anomalías climáticas en muchas regiones tropicales que están siendo correlacionadas con cambios en la temperatura de superficie del mar, es decir, con el fenómeno de "El Niño"; sin embargo, algunos autores sugieren que un incremento

* Unidad Académica Multidisciplinaria Agronomía y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Victoria, 87149, Cd. Victoria, Tamaulipas. E-mail: wsalinas@uamac.uat.mx
**Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Km 145 Carretera Nacional, 41 Linares Nuevo León. E-mail: ejtrevin@fcf.uanl.mx

de CO_2 en la atmósfera, debido a la deforestación que tiene lugar en muchas partes del mundo, tendrá como resultado impactos en la frecuencia y persistencia de dichas anomalías climáticas. Además de propiciar una reducción de los sumideros de carbono, la remoción significativa de áreas con cubierta vegetal propiciará un incremento del albedo de superficie con efectos adicionales en el microclima local (Lockwood, 1988:103).

Como en muchas otras partes de México, en el estado de Tamaulipas los procesos de deforestación se han debido, principalmente, a la expansión de la frontera agrícola, influida por las políticas agropecuarias en boga. La conversión de grandes extensiones de vegetación nativa en tierras de cultivo y pastoreo tiene necesariamente un efecto sobre las tasas de evapotranspiración y la temperatura a nivel del suelo, ya que reducen la superficie de sombras; comprender estos procesos es el objetivo de este trabajo. El estudio implicó un análisis de la variabilidad climática local mediante series de tiempo, para identificar las posibles tendencias de los principales parámetros microclimáticos, la determinación de las tasas de cambio registradas desde la década de los años setenta hasta 1998 y la influencia de los cambios de cobertura sobre los registros de temperatura de estaciones meteorológicas.

ANTECEDENTES

Dada la ubicación geográfica de nuestro país, México no escapa al incremento de la variabilidad de algunos parámetros climáticos, que está siendo observado en muchos lugares de la franja tropical debido al calentamiento global (Parry y Carter, 1988:9-10). Según Ortiz y Méndez (1999:68), citando a Maul (1993), el efecto local del cambio climático global en el Golfo de México y el Mar Caribe podría esperarse como un incremento de 1.5 °C en la temperatura del mar, según las proyecciones de un grupo de expertos del Programa Ambiental de Naciones Unidas (UNEP). A nivel global, el informe del Panel Inter-gubernamental sobre Cambio Climático llevado a cabo por la UNEP en 1995, señaló que de seguir las tendencias actuales de emisiones de CO_2 a la atmósfera, la temperatura media a nivel mundial aumentará entre 1.3 y 2.9 °C para el 2100. El uso de combustibles fósiles y la deforestación son, sin lugar a dudas, las causas del incremento progresivo y rápido de CO_2 a la atmósfera, fenómeno que ya había sido observado desde la década de los años cincuenta (Hall, 1994:287).

Algunos pronósticos sugieren que el incremento de temperatura resultante producirá inviernos más húmedos y estaciones de crecimiento más secas que las actuales, y ya que la distribución geográfica de los cambios proyectados no es uniforme, se estima que la temperatura se incrementará hacia el interior del continente y en latitudes altas (Hall, 1994:288). Otro efecto será el aumento de la variabilidad de algunos parámetros climáticos en regiones del trópico seco, como puede observarse en el noreste de México y el sur de Texas. North (1995:8-9) mencionó que la variación de la precipitación está incrementándose de un año a otro y que existe una tendencia a que los períodos secos perduren por más tiempo de lo que normalmente se esperaría en regiones como el sur de Texas. Considerando estos pronósticos, podría esperarse entonces que el fenómeno se intensifique localmente, debido a las alteraciones en los ciclos hidrológicos propiciadas por un aumento del albedo de superficie a nivel de cuenca. Conocer el nivel de variación es un elemento de suma importancia en la evaluación de los posibles impactos ambientales que están teniendo lugar, sin embargo, tal como apuntó Bartholomé (1991:201), las mediciones de variabilidad dependen de la calidad de las estimaciones de parámetros climáticos, la cual está en función de la

veracidad de los registros de estaciones meteorológicas y de la adecuada distribución de la red de puntos de observación para captar la variación es-pacial del fenómeno que pretende medirse.

Por otro lado, la evaluación de tendencias climáticas puede tener una dimensión temporal mayor a los registros disponibles más antiguos en zonas del trópico seco. Stahle y Claveland (1998:72) reconstruyeron el Índice de Severidad de Sequía de Palmer para dos regiones de Texas, de 1698 a 1980, mediante técnicas dendroclimáticas y análisis de series de tiempo utilizando modelos autorregresivos. La serie fue calibrada con los registros climáticos disponibles de 1931 a 1980 y explicó un 60% de la varianza del comportamiento de sequías del registro histórico de estaciones climáticas disponibles, siendo junio el mes más adecuado para la determinación del índice de sequía de Palmer. Aunque los 50 años de observaciones meteorológicas fueron generalmente representativos de la media, la varianza y probabilidades recurrentes durante los pasados 283 años evidencian ciclos de sequía mayores a 50 años. La ocurrencia estimada de las tres sequías más severas por década (1770, 1860 y 1950), sugiere que la frecuencia aproximada de episodios extremos de sequía podría ser de uno cada 100 años. Trabajos similares, pero en latitudes más altas, son los de Stahle *et al.* (1998:1517-1519).

A nivel de cuenca, las cantidades relativas de agua retirada del suelo por evaporación y transpiración son críticas, especialmente en regiones de lluvias limitadas. El establecimiento claro de la diferencia entre las pérdidas por evapotranspiración es indispensable para poder determinar si los cambios en la cubierta vegetal podrían incrementar el orden de los escurrimientos de una cuenca; en este sentido, los trabajos de Rider (1957), Hewlett y Hibbert (1961), citados por Kramer (1974:385), dan evidencia de los efectos de los cambios de cubierta vegetal en el balance hídrico de cuencas. Por último, cambios microclimáticos y su efecto en los balances hídricos tendrán necesariamente un efecto sobre la biodiversidad de comunidades vegetales (Fairbanks *et al.*, 1996:135; Kittel *et al.*, 1996:293).

ÁREA EN ESTUDIO Y MATERIALES

Según el sistema de clasificación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1982), la zona en estudio corresponde a la subcuenca río Corona, localizada en la Región Hidrológica No. 25, con una extensión de 1 505 km^2. La subcuenca abarca principalmente las superficies de los municipios de Victoria, Güémez y, en menor proporción, los municipios de Padilla e Hidalgo (Figura 1). La cobertura vegetal para los años setenta se obtuvo a partir de la digitalización de las cartas de uso de suelo y vegetación del INEGI disponibles a una escala 1:50 000. Las tasas de cambio hasta 1998 se obtuvieron a partir de una imagen *Landsat Thematic Mapper path 27 row 44* del 21 de octubre y con apoyo de recorridos de campo y fotografías aéreas de la zona, de un vuelo alto a una escala 1:75 000 realizado en 1996 por el INEGI.

El procesamiento de la escena, así como el manejo de información cartográfica digital, se llevó a cabo utilizando el sistema ERDAS *Imagine* 8.3.1 para Windows NT y el sistema de información geográfica ARC/INFO 7.2 para estación de trabajo SUN. La información climática correspondió a las estaciones meteorológicas Barretal, Corona, Guémez, Padilla y Victoria, ubicadas en el área de influencia de la subcuenca. Los registros históricos disponibles para el análisis de series de tiempo comprenden 35 años, como mínimo, en algunas de las estaciones y hasta el año de 1997 (Cuadro 1). En la Figura 1 se presenta la ubicación en coordenadas UTM de las estaciones disponibles para el área de trabajo, las cuales se

localizan en la parte plana debajo de los 400 msnm, donde son posibles las actividades productivas. La subcuenca cuenta con un área importante de relieve accidentado hacia su porción poniente, ya que por ella corre la Sierra Madre Oriental, por lo que no se cuenta con estaciones climáticas.

La información climática de las cinco estaciones utilizada en el estudio, procedió de una base de datos de la Comisión Nacional del Agua (CNA) con registros diarios de una red de 158 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el estado. El análisis probabilístico de las series de tiempo de las variables climáticas; temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, se llevaron a cabo mediante el programa ARIMA (*Autorregresive Integrated Moving Average*) del paquete estadístico SAS versión 6.0

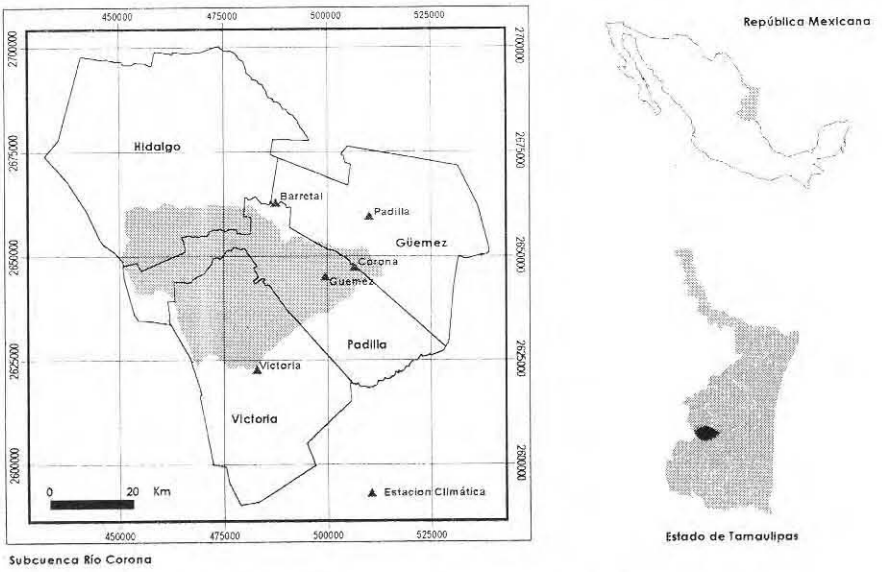

Figura 1. Localización de la subcuenca río Corona.

Cuadro 1. Coordenadas y número de años de registro de las estaciones meteorológicas

Estación	Coordenadas UTM (X, Y)	Altitud (m)	Año de inicio	Años de registro
Barretal	487 633 – 2 662 936	210	P	38
Corona	506 530 – 2 647 340	150	1968	40
Güémez	499 548 – 2 645 063	202	1963	35
Padilla	510 167 – 2 659 613	154	1963	35
Victoria	483 011 – 2 622 717	350	960	38

Fuente: Comisión Nacional del Agua.

METODOLOGÍA

El procesamiento de la información climática consistió primeramente en identificar datos faltantes en las series a nivel diario de los parámetros de temperatura máxima, mínima y media, así como de precipitación de las cinco estaciones, utilizados en el estudio, para posteriormente generar cuadros de concentración de promedios mensuales y anuales para cada estación y variable climática. Dado que las estaciones seleccionadas han sido mantenidas regularmente por la CNA, el problema de datos faltantes no fue un aspecto limitativo en la construcción de las series y, cuando se presentó, se llevó a cabo un proceso de estimación. En el caso de los registros de temperatura, éstos se ajustaron mediante regresión lineal simple, con base en un modelo probabilístico obtenido de una estación tipo, mientras que para la precipitación se utilizó el método del Servicio Climático Nacional de los Estados Unidos (Romero, 1998). Este último utilizó los datos de al menos tres estaciones circundantes, para estimar los datos perdidos o faltantes, el proceso fue ponderar los valores observados de una cantidad de lluvia *(W_i)*, igual al recíproco del cuadrado de la distancia *(Di)* entre cada estación vecina y la estación a corregir:

$$W_i = [\,1 / (D\,i)^2\,]$$

De la ecuación anterior se deriva el dato de lluvia estimado *(P_x)* mediante la siguiente fórmula:

$$P_x = \Sigma\,(P_i * W_i)\ /\ \Sigma\,W_i$$

La selección de las tres estaciones circundantes para la corrección de datos faltantes en los casos en los que se presentó, incluyó tanto a las cinco estaciones definidas para el estudio como aquellas más allá del perímetro de la subcuenca, pero aproximadas a las estaciones utilizadas en el estudio.

La generación de los modelos de las series de tiempo involucró la identificación del tipo de proceso estocástico presente en los datos, la estimación de los parámetros del modelo, la verificación del mismo y el pronóstico (SAS, 1991:35-108). Los modelos utilizados fueron:

Modelos Autorregresivos (p)

$$Y_t - \mu = \varphi 1\,(Y_{t-1} - \mu) + \varepsilon_t$$

donde:

μ es el parámetro constante,
$\varphi 1$ es el parámetro autorregresivo AR de primer orden
Y_{t-1} = es el valor de la serie de tiempo en el período anterior,
ε_t = es el término de error no correlacionado sobre el tiempo.

Modelos de Promedios Móviles (q)

$$Y_t = \theta_0 + \varepsilon 1 + \theta_1\,\varepsilon_{\tau-1}$$

donde:

θ_0= es el parámetro de intercepto,
ε_τ= es el error aleatorio para el período actual,
θ_1 es el parámetro del promedio móvil de primer orden,
$\varepsilon_{\tau-1}$ = es el error aleatorio para el período de tiempo previo.

Modelos Mixtos (p y q)

$$Y_t = \theta_0 + \varphi_1\,Y_{t-1} + \varphi_2\,\Psi_{\tau-2} + \ldots\ldots\ldots + \varphi_\pi\,\Psi_{\tau-\pi} - \theta_1\,\varepsilon_{\tau-1} - \theta_2\,\varepsilon_{\tau-2} - \ldots\ldots\ldots - \theta_\theta\,\varepsilon_{\tau-\theta} + \varepsilon_\tau$$

Donde *(φ_1), (φ_2),....., (φ_p)* son los parámetros autorregresivos asociados con los valores de la serie de tiempo, y *(θ_1), (θ_2),....., (θ_q)* son los parámetros de promedios móviles asociados con los términos de error.

Todas las series fueron transformadas (logarítmica y primera diferencia) para mantener su estacionaridad, es decir, si $\mu_t = \mu$ para todo *t*, y $\sigma^2_t = \sigma^2$ para todo *t*, entonces la serie es estacionaria. Mediante el estadístico *Q*, el cual es una aproximación a una *Ji-Cuadrada* (X^2), se evaluó la significancia de la hipótesis nula de *ruido blanco* en cada modelo, la cual implicó determinar si una serie en particular no es demasiado aleatoria para ser modelada. Cuando *Q* es significativa la serie no es únicamente "ruido". Con las series que tuvieron significancia, se procedió a evaluar la autocorrelación de los residuales para identificar problemas de ajuste con los modelos. Los casos en que la prueba estadística fue no significativa, implicó que el modelo ajustó bien a los datos y se procedió a evaluar la estimación de parámetros. Cuando alguno de los parámetros del modelo resultó no significativo en la razón de *t*, se evidenció que el modelo tuvo demasiados parámetros *(overfitting)* y debió ser nuevamente ajustado con un número menor.

La información de usos del suelo de los años setenta se obtuvo a partir de la digitalización de las nueve cartas 1:50 000 del INEGI de Uso de Suelo y Vegetación, que abarcaron el área de la subcuenca. Se digitalizó la totalidad de los polígonos con las claves originales de la leyenda de los mapas del INEGI, posteriormente se efectuó un proceso de reclasificación en categorías más generales, ya que el nivel de detalle del mapa original no era necesario para los objetivos del estudio, por último, se procedió a disolver los polígonos que compartieron la misma clave de uso de suelo y tipo de vegetación. Al generarse la topología de la cobertura de polígonos se obtuvo el área de cada rodal por tipo general de vegetación y uso del suelo para los años setenta. Como la generación de la cartografía temática 1:50 000 se basó en la interpretación de fotografías aéreas de 1972, se tomó este año como el año 0 de la comparación setenta-noventa. La información de los años noventa se obtuvo a partir de una clasificación digital no supervisada de la imagen Landsat TM de 1998, la cual fue georreferida con la misma proyección que la cartografía INEGI y remuestreada a un tamaño de píxel de 30 m.

El proceso de clasificación de la escena de 1998 fue realizado siguiendo un esquema estratificado de interpretación, ya que no se efectuó una clasificación de toda la escena, sino que fue llevado a cabo de manera independiente para cada clase de cobertura, las cuales fueron previamente definidas a partir de la digitalización, reclasificación y disolución de polígonos de los mapas de uso del suelo y vegetación del INEGI de los años setenta. El propósito fue dividir la superficie de estudio en áreas homogéneas comparables, a fin de tener una estimación más precisa de los cambios, ya que la interpretación se circunscribió a límites de rodales de uso de suelo y vegetación claramente identificados. Este método, sugerido por Treviño (2000:57-59), tuvo la ventaja de trabajar con pequeñas cantidades de datos y redujo los problemas asociados de confusión de firmas espectrales debidos a una orografía compleja (montañas), tipos de agricultura (riego, temporal, cultivos anuales y perennes), coberturas densas agrícolas (cítricos) *versus* coberturas densas naturales (selvas y bosques de galería).

A partir de la sobreposición de la cobertura de polígonos definida para los años setenta sobre la imagen Landsat de 1998, se generaron máscaras numéricas para extraer subescenas por cada clase de uso. En cada subimagen se obtuvieron diez clases, las cuales fueron agrupadas en tres categorías de densidad de cobertura, siguiendo la metodología propuesta por Treviño (2000:57-59); cerrado, abierto y desnudo. La categoría cerrado se consideró a las áreas de vegetación natural que presentaron una cobertura con doseles sobrepuestos unos a otros. La

categoría abierto se consideró como una categoría heterogénea con diversas distancias entre doseles. Por último, la clase desnudo implicó elementos aislados de doseles de vegetación o inclusive ninguno en el caso de áreas agrícolas. Después de obtener las categorías por densidad de cobertura se procedió a evaluar la tendencia general de cambios de uso de suelo durante el período 1972-1998. Los criterios de agrupamiento de las diez clases espectrales dentro de cada categoría de densidad (denso, abierto, desnudo) se apoyaron en el análisis de la información gráfica y tabular contenida en los mapas de uso de suelo y vegetación del INEGI, la interpretación de fotografía aérea del INEGI de 1996 proveniente de un vuelo alto a 1:75 000, recorridos de campo con GPS en función de la dinámica de cambio observada en la imagen de satélite, así como el análisis de los valores de reflectancia de una composición en falso color utilizando las bandas 5,4,7 (RGB) infrarrojo medio, infrarrojo cercano e infrarrojo medio. El objetivo fue resaltar el componente de biomasa en la escena, facilitando la evaluación de la densidad de cubierta vegetal natural y agrícola.

RESULTADOS

Los modelos autorregresivos *(p)*, de promedios móviles *(q)* y mixtos *(p y q)* estadísticamente significativos de las series de tiempo, obtenidos para parámetros y estaciones climáticas se presentan en el Cuadro 2. Como puede observarse en dicho cuadro, algunos parámetros fueron demasiado aleatorios para ser modelados, evidenciando la variabilidad existente en ciertas estaciones y la complejidad del modelamiento microclimático, sin embargo, dado que no es posible trabajar con la gran variación y abruptas discontinuidades en los datos reales, la elaboración de modelos de series de tiempo basados en un riguroso método analítico de identificación de procesos subyacentes no únicamente "ruido", la estimación estadística de parámetros de modelos y el diagnóstico de su significancia, permitió suavizar las observaciones mediante una función de ajuste, a fin de estar en posibilidad de observar visualmente patrones claros y el pronóstico de su comportamiento futuro con una base estadística.

Aunque en general el orden de las ecuaciones de predicción fue de grado 1, a excepción del modelo mixto para precipitación en la estación Victoria, que tuvo un grado 2 en PM (Promedio Móvil), la importancia de parámetros no consecutivos para explicar el comportamiento de los datos evidenció la presencia de ciclos de *(n)* períodos en la variable precipitación, no así en las temperaturas máximas y mínimas. La notación de *n* entre paréntesis es la opción del programa ARIMA para indicar el ajuste de modelos con parámetros de períodos específicos no tomando en consideración los valores intermedios. El caso más extremo se presentó en la estación Güémez en la parte autorregresiva del modelo mixto elaborado, donde el valor registrado de lluvia de cinco años atrás fue el mejor período previo anterior encontrado para estimar el valor actual de precipitación. Las gráficas de las series de datos observados y estimados de precipitación indicaron que, en términos generales, sólo en la estación Victoria la lluvia ha seguido un patrón estable de distribución a lo largo del período, en el resto de las estaciones se observó una tendencia a mantener un ambiente de sequedad en la zona. En todas las gráficas se presenta el pronóstico de cada parámetro hasta el año 2000 (Figuras 2 a 5).

La aleatoriedad de las series de temperatura máxima y mínima sólo permitió generar dos modelos para cada parámetro climático. A diferencia de la precipitación, fueron modelos simples, no mixtos y con procesos subyacentes del tipo autorregresivo de grado 1.

Para el caso de la temperatura máxima en la estación Padilla (Figura 6) no se aprecia una tendencia de incrementos a lo largo de todo el período, de hecho las temperaturas más altas se registraron en la década de los años sesenta. El comportamiento de la temperatura máxima en la estación Corona se mantuvo de manera general en la banda de los 29-31 °C hasta 1993, a partir de aquí los registros de los últimos cuatro años fueron los más altos de toda la serie; sin embargo, las estimaciones para el año 2000 indican un regreso a la banda tipo de temperaturas (Figura 7).

Cuadro 2. Modelos de parámetros climáticos obtenidos por estación meteorológica

Parámetro	Estación	Tipo de proceso 1/	Orden p	q 2/	Tipo de transf.. 3/	Modelo
Precipitación	Barretal	AR PM	1 1(3)		DIF	$Y_t = -14.8065 + Y_{t-1} - 0.5582\ (Y_{t-1} - Y_{t-2}) + 0.3644\ \varepsilon_{t-3}$
	Corona	AR PM	1 1(3)		DIF	$Y_t = -9.8840 + Y_{t-1} - 0.4639\ (Y_{t-1} - Y_{t-2}) + 0.2135\ \varepsilon_{t-3}$
	Güémez	AR PM	1(5)	1	DIF	$Y_t = 0.2553 + Y_{t-1} - 0.2892\ (Y_{t-5} - Y_{t-6}) - 0.3954\ \varepsilon_{t-3}$
	Victoria	AR PM	1(2)	2	LOG	$Y_t = 2.0091 + 0.7031\ Y_{t-2} + 0.4418\ \varepsilon_{t-1} - 0.5235\ \varepsilon_{t-2}$
Tmax	Corona	AR	1		LOG	$Y_t = 1.6845 + 0.5060\ Y_{t-1}$
	Padilla	AR	1		DIF	$Y_t = -0.0406 + Y_{t-1} - 0.5988\ (Y_{t-1} - Y_{t-2})$
Tmin	Barretal	AR	1		LOG	$Y_t = 1.7257 + 0.3949\ Y_{t-1}$
	Corona	AR	1		LOG	$Y_t = 0.8954 + 0.6834\ Y_{t-1}$

1/ AR: Autorregresivo; PM: Promedio Móvil.
2/ ( ) El valor en paréntesis indica el número de períodos (años) no consecutivos utilizados para *p* y *q*
3/ DIF: Transformación de la Primera Diferencia; LOG: Transformación Logarítmica.

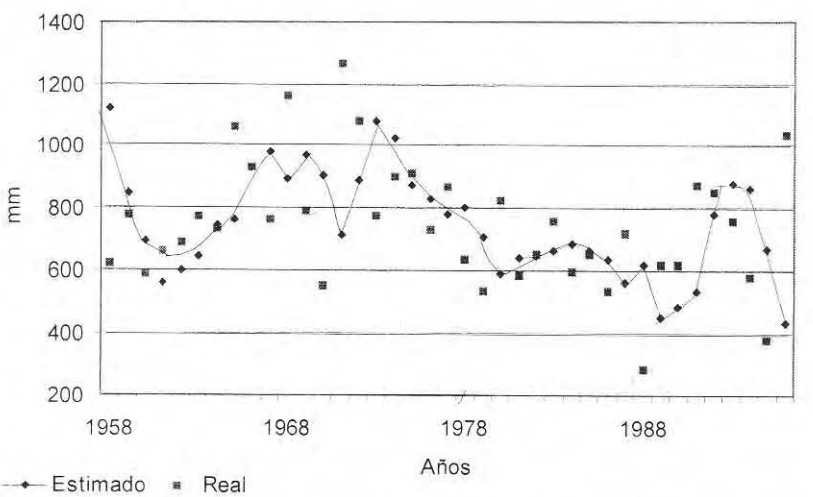

Figura 2. Serie de tiempo de precipitación total anual. Estación Corona, 1958-1997.

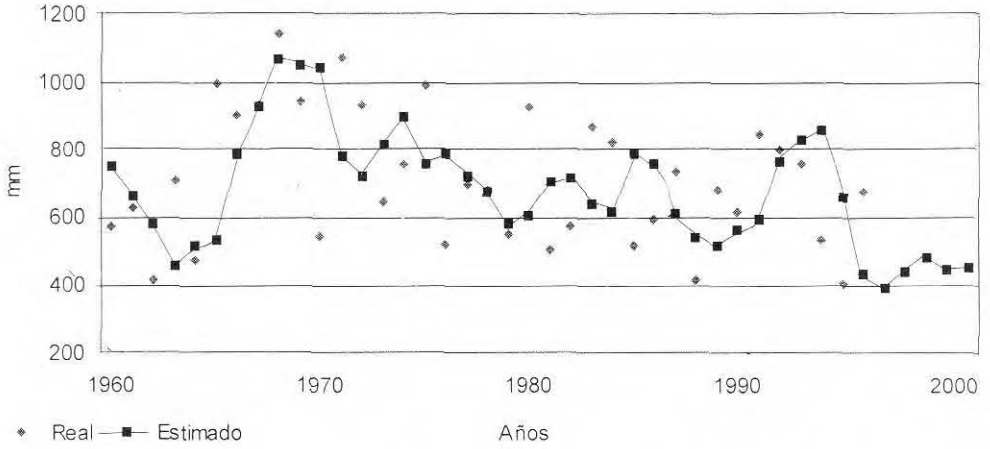

Figura 3. Serie de tiempo de precipitación total anual. Estación Barretal, 1960-1997.

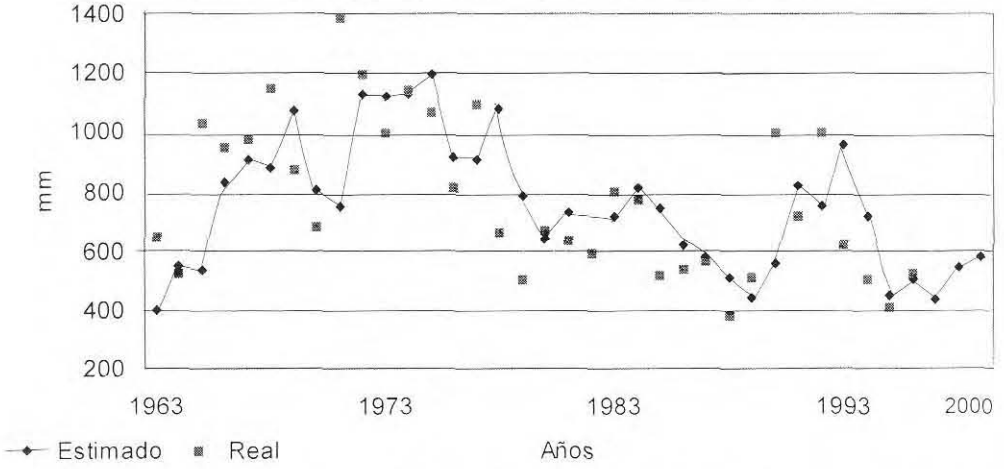

Figura 4. Serie de tiempo de precipitación total anual. Estación Güémez, 1963-1997.

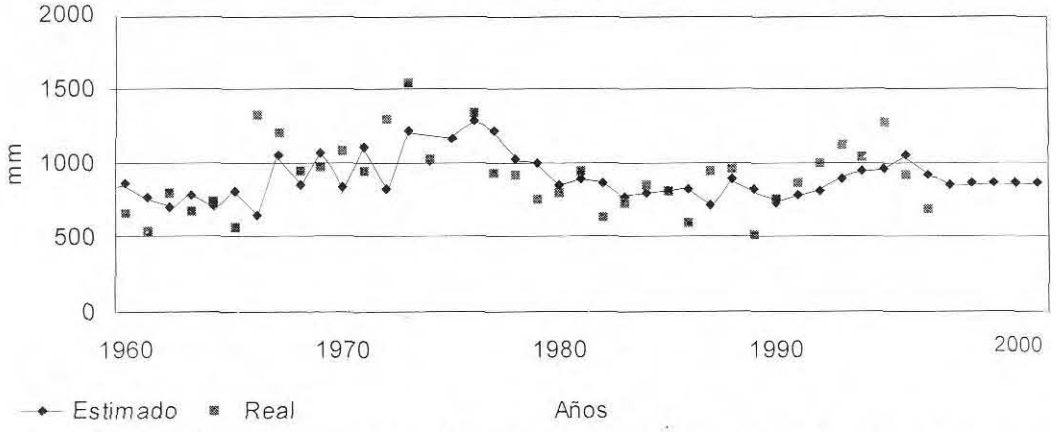

Figura 5. Serie de tiempo de precipitación total anual. Estación Victoria, 1960-1997.

Aunque no se pudo modelar la temperatura máxima para la estación Barretal, es conveniente mencionar que dicha estación está inserta en una zona citrícola, la cual ha tenido en los últimos años un incremento muy importante de la actividad, por lo que se esperaría que existiera algún efecto en los registros de temperatura, dado que el área ha aumentado su densidad general de cobertura y, por consiguiente, la proporción de sombra sobre el suelo. En la Figura 8 se muestran los datos reales de temperatura máxima normalizados a un valor *Z* que resulta de restar cada promedio anual de la media de la serie y dividiendo el resultado por la desviación estándar, obteniendo con ello una representación gráfica de anomalías arriba o abajo del comportamiento medio de esta variable a lo largo de todo el período de observación. Tal como se observa en la Figura 8 ha habido un relativo enfriamiento a partir de 1984, lo que da indicios del efecto de la densidad de cobertura en el área de influencia de la estación Barretal, aunque desafortunadamente este patrón de comportamiento no pudo ser modelado probabilísticamente.

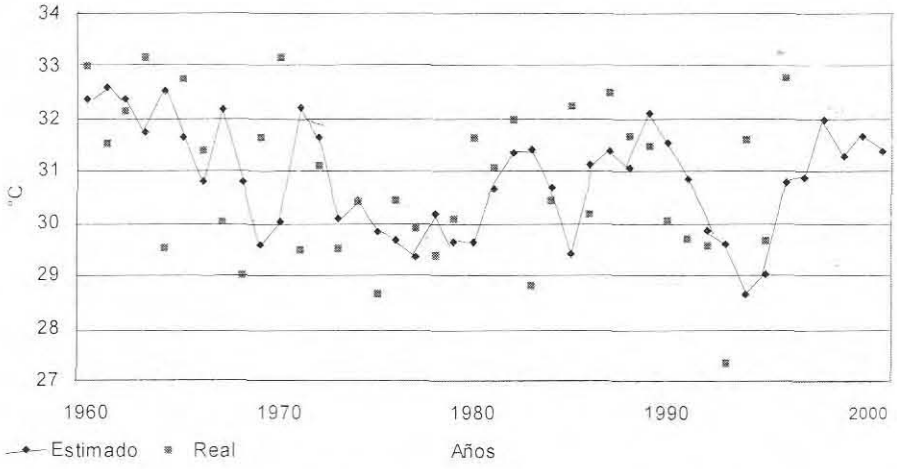

Figura 6. Serie de tiempo de temperatura máxima promedio anual. Estación Padilla, 1960-1997.

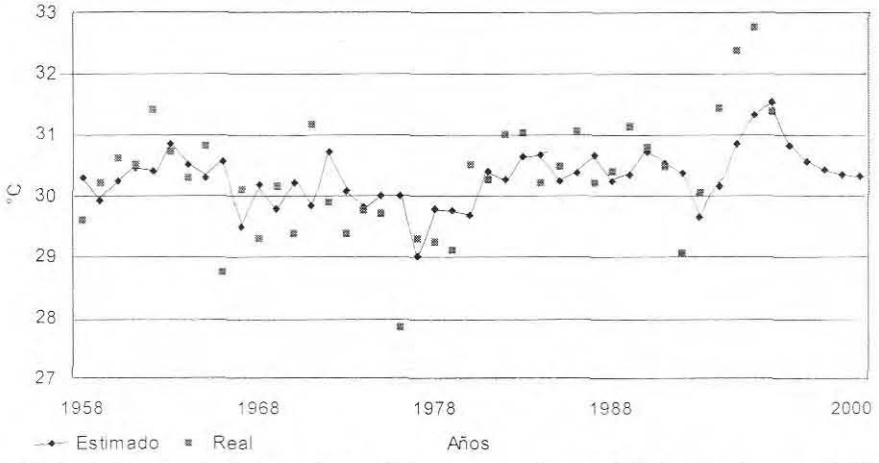

Figura 7. Serie de tiempo de temperatura máxima promedio anual. Estación Corona, 1958-1997.

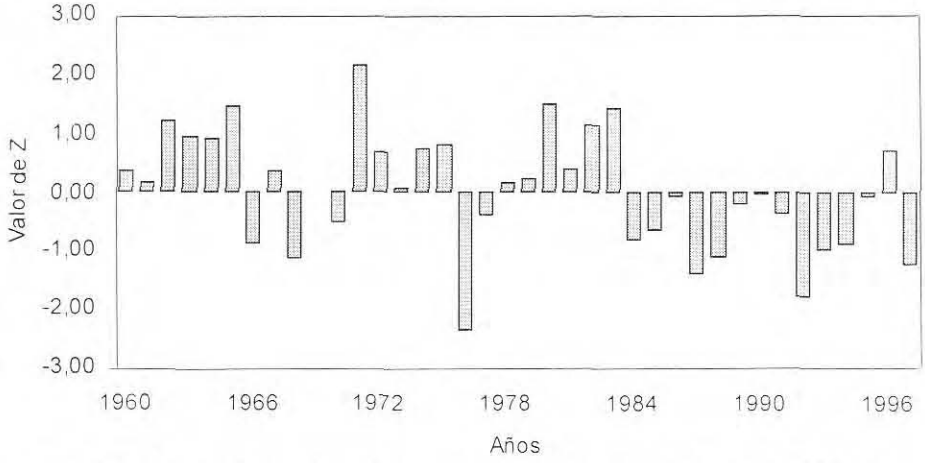

Figura 8. Temperatura máxima promedio anual normalizado. Estación Barretal.

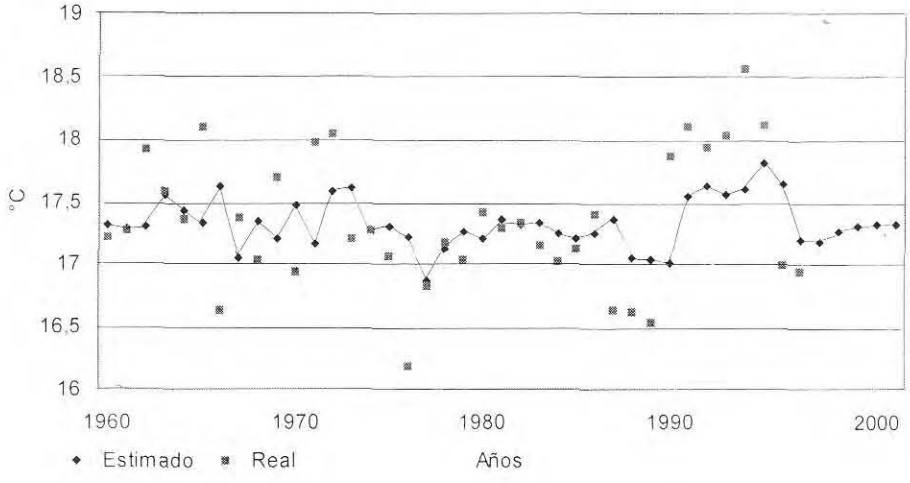

Figura 9. Serie de tiempo de temperatura mínima promedio anual. Estación Barretal, 1960-1997.

En las Figuras 9 y 10 se presentan los resultados de los modelos para la temperatura *mínima y puede observarse que, aunque en* la estación Barretal el comportamiento de esta variable no presentó tendencias claras de incrementos, ya que el modelo generado se mantuvo de manera general en la banda de los 17-18 °C, en la década de los noventa se registraron las temperaturas mínimas más altas de todo el período.

En el caso de la estación Corona se encontró un cambio muy abrupto en nivel de temperaturas mínimas de 2 C° a partir de 1980. Dado que la estación no ha sido cambiada de lugar y que, además, es considerada co*mo una estación de referencia importante* para la CNA, la posibilidad de datos erróneos es reducida. Una causa atribuible a este comportamiento es el hecho de que la zona donde se encuentra ubicada la estación Corona ha tenido cambios importantes de usos de suelo de agricultura a pastizales, debido a problemas de salinidad y baja productividad, así como el desmonte en comunidades de matorrales para ser convertidas en zonas ganaderas. Aunque esta situación se observa claramente en un radio aproximado de 2 a

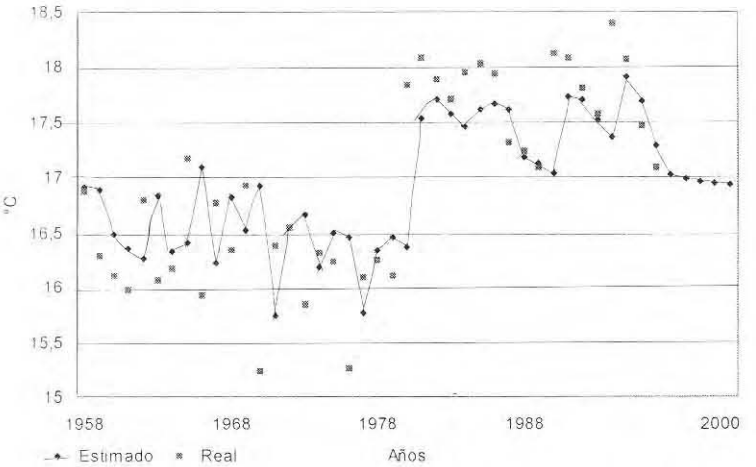

Figura 10. Serie de tiempo de temperatura mínima promedio anual. Estación Corona, 1958-1997.

3 km alrededor de la estación, los procesos han sido generalizados en toda el área de influencia de la misma,

En la Figura 11 se observan los cambios de uso de suelo a pastos, registrados alrededor de la estación Corona, apreciándose, además de un problema de sequedad persistente en la zona, tal como lo demuestran los registros de precipitación de la misma estación, un problema de salinidad que se identifica por los manchones sin vegetación dentro de la pradera.

Para tener una idea precisa de los patrones de cambio que se dieron en la subcuenca río Corona y su posible influencia en los registros de las estaciones, se generaron estadísticas de usos y cobertura de suelo del período 1972-1998. El mapa resultante, producto de la digitalización de las cartas de uso del suelo de 1972 del INEGI, se muestra en la Figura 12. Las superficies de cada rodal del mapa de 1972 aparecen en el Cuadro 3, junto con el resultado de la clasificación estratificada de 1998.

Las tendencias de uso para las áreas agrícolas durante 1998 tuvieron comportamientos distintos, en el caso de cultivos anuales de temporal se observó un ligero cambio a pastizales (1 506 ha), así como el abandono de tierras, lo que favoreció el desarrollo del matorral secundario en algunos sitios. En las áreas de riego anual existió un cambio importante hacia plantaciones de cítricos en huertas de diferentes edades lo que se reporta como denso y abierto (6 845 ha). La fecha de la imagen (octubre) permitió la discriminación de suelos desnudos, ya que en esa fecha las tierras están en preparación para el ciclo tardío.

La agricultura con cultivos permanentes tuvo un comportamiento interesante.

La zona tuvo en los años setenta una vocación hacia la producción de henequén, pero la aparición de fibras sintéticas afectó considerablemente el mercado nacional y local, ocasionando que muchas áreas se abandonaran y se estableciera nuevamente el matorral denso y abierto (5 443 ha); otras fueron reconvertidas a praderas (3 498 ha). Las huertas citrícolas incluidas en los polígonos de 1972 se mantuvieron para 1998 tal como se reporta en el Cuadro 3, adicionalmente puede observarse una expansión de esta actividad agrícola en la zona.

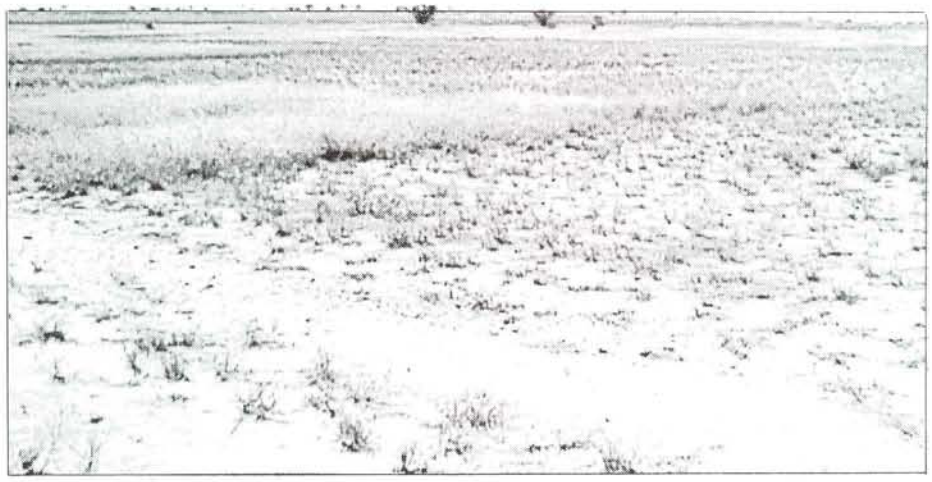

Figura 11. Cambios de uso de suelo a pastizales registrados en el área de influencia de la estación Corona.

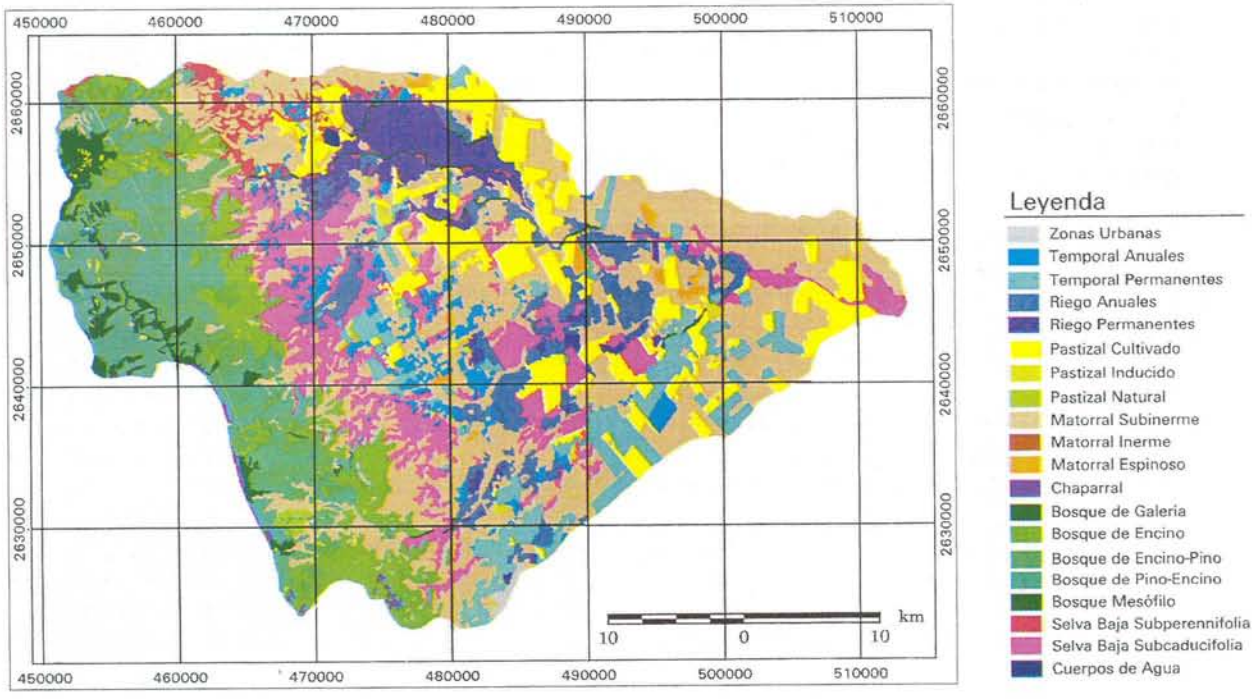

Figura 12. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca Rio Corona 1972.

Cuadro 3. Superficies de uso y cobertura de suelo y tendencias de cambios (1972-1998)

Cobertura y Usos del Suelo 1972	Sup. Ha	Estratificación de Cobertura 1998	Sup. Ha	Tendencias de Cambios 1998
Temporal Anuales	5 092	Denso Abierto Desnudo	365 1 506 3 221	Matorral Pastizal Agricultura
Temporal Permanentes	8 941	Denso Abierto Desnudo	1 093 4 350 3 498	Matorral Agricultura Pastizal
Riego Anuales	9 810	Denso Abierto Desnudo	4 537 2 308 2 965	Agricultura Agricultura Agricultura
Riego Permanentes	6 145	Denso Abierto Desnudo	6 145 - -	Agricultura - -
Pastizal Cultivado	14 020	Denso Abierto Desnudo	364 6 392 7 264	Matorral Pastizal Pastizal
Pastizal Inducido	1 452	Denso Abierto Desnudo	432 461 559	Matorral Pastizal Pastizal
Pasto Natural	314	Denso Abierto Desnudo	72 48 194	Matorral Pastizal Pastizal
Matorral Subinerme	47 178	Denso Abierto Desnudo	5 322 14 513 27 343	Matorral Matorral Agricultura
Matorral Inerme	237	Denso Abierto Desnudo	48 72 117	Matorral Matorral Agricultura
Matorral Espinoso	948	Denso Abierto Desnudo	291 196 461	Matorral Pastizal Agricultura
Chaparral	428	Denso Abierto Desnudo	97 194 137	Matorral Matorral Agricultura
Bosque de Galería	880	Denso Abierto Desnudo	735 145 -	Bosque Bosque -
Bosque de Encino	11 557	Denso Abierto Desnudo	5 700 4 010 1 847	Bosque Bosque Pastizal
Bosque de Encino-Pino	9 038	Denso Abierto Desnudo	5 492 1 675 1 871	Bosque Bosque Pastizal
Bosque de Pino-Encino	12 145	Denso Abierto Desnudo	8 287 1 652 2 206	Bosque Bosque Pastizal
Bosque Mesófilo	3 593	Denso Abierto Desnudo	2 111 996 486	Bosque Bosque Pastizal
Selva Baja Subcaducifolia	15 683	Denso Abierto Desnudo	8 287 858 6 538	Selva Pastizal Agricultura
Selva Baja Subperennifolia	2 205	Denso Abierto Desnudo	340 461 1 404	Selva Pastizal Agricultura
Cuerpos de Agua 1/	128	Denso Abierto Desnudo	 128	- - Cuerpos de Agua
Zona Urbana 2/	297	Denso Abierto Desnudo	- - 297	- - Zona Urbana
Total	*150 091*		*150 091*	

1/ La superficie se refiere al polígono de 1972, la superficie real en 1998 fue de 198 ha.
2/ La superficie se refiere al polígono de 1972, la superficie real en 1998 fue de 1 237 ha.

En el caso de los pastizales, éstos se mantuvieron en términos generales, aunque se observó el avance del matorral secundario en algunas praderas que no tuvieron un manejo adecuado. Los matorrales, al igual que las selvas, han sido los tipos de vegetación más afectados por los desmontes; de las 47 178 ha reportadas con matorral subinerme para 1998, se habían utilizado para actividades agrícolas 27 343 ha, la misma tendencia se observa en la selva baja subcaducifolia, siendo dedicadas 6 538 ha a uso agrícola, de un total de 15 683 ha reportadas inicialmente. En el caso de los bosques, los más afectados por la actividad silvícola fueron los de encino, encino-pino y pino-encino (5 923 ha), mientras que los de galería se mantuvieron estables. El bosque mesófilo tuvo una superficie en la categoría de desnudo de 486 ha. El corte de árboles en superficies continuas propició el establecimiento de pastos, mientras que el corte selectivo promovió una tendencia en la categoría de abierto, debe mencionarse no obstante que en este último caso es difícil inferir deforestación por el hecho de que dichos bosques también se encuentran en diferentes etapas de crecimiento, lo cual crea confusión en la interpretación de tendencias.

Por último, las clases de uso Cuerpos de Agua y Zonas Urbanas, sólo hacen referencia a la tendencia dentro de los límites definidos por los polígonos de dicha clase en los años setenta. En los noventa, estas clases rebasaron los límites definidos para la clasificación estratificada de la imagen Landsat de 1998, por ello, el cálculo de sus tendencias siguió métodos alternativos. Para el caso de los cuerpos de agua se segmentó y umbralizó el histograma de un NDVI (*density slicing*) generado de la imagen de 1998, enfatizando el contraste agua-tierra. La estimación del crecimiento de la mancha urbana se obtuvo de una clasificación no supervisada realizada a una subimagen únicamente del área de Ciudad Victoria. En el Cuadro 4 se presentan los cambios de uso de suelo a nivel de las principales clases generales de cobertura durante el período 1972-1998 y elaborado con base en el Cuadro 3.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Aunque se encontró evidencia estadística de algunas tendencias climáticas que pudieran aportar elementos sobre las consecuencias en el microclima del cambio acelerado de uso del suelo en la subcuenca río Corona, la variación entre los mismos parámetros por estación parece manifestar el posible efecto que tiene en los registros climáticos el tipo de cobertura presente alrededor de las estaciones.

Cuadro 4. Estadísticas de cambios de uso y cobertura de suelo (1972 – 1998)

Clase general de uso del suelo	Superficie (ha) 1972	Superficie (ha) 1998	Diferencia absoluta (ha)	Diferencia porcentual (%)	Tasa anual de cambio (%)
Matorrales	48 791	22 863	-25 928	-53.14	-2.04
Bosques	37 213	30 803	-6410	-17.22	-0.66
Selvas	17 888	8 627	-9 261	-51.77	-1.99
Agricultura	29 988	59 526	29 538	98.50	3.78
Pastizales	15 786	27 847	12 061	76.40	2.94

Al observar los ambientes circundantes obtenidos de los cambios de usos de suelo para 1998 y su relación con la ubicación de las estaciones Barretal y Corona, algunos de sus parámetros indicaron este efecto. El incremento de las temperaturas máxima y mínima en la estación Corona parece estar asociado a cambios de uso de suelo con cubiertas de bajo porte (pastizales), los cuales propiciaron un calentamiento del aire a nivel de superficie que se detectó en la estación. Por el contrario, la ubicación de la estación Barretal en una zona con una vocación citrícola, ya reportada desde los setenta, y con un incremento importante de la superficie dedicada a esta actividad a partir de los ochenta, da indicios del efecto que tiene el aumento de la densidad de cobertura alrededor de una determinada estación, ya que un aumento en la superficie de sombras producirá un enfriamiento relativo del aire que es registrado en la misma.

Aunque no pudo validarse un modelo sobre esta disminución de temperatura registrada de manera normalizada en esta estación, los resultados encontrados tanto en Barretal como en Corona alientan a conducir análisis de mayor detalle sobre la determinación de zonas de influencia de diferentes tamaños alrededor de estaciones y en función de la densidad de cobertura.

Los resultados obtenidos para las estaciones Güémez y Padilla pueden explicarse por el hecho de estar localizadas en un ambiente heterogéneo de coberturas, desde pastos hasta cítricos, pasando por tierras de cultivos anuales, lo que dificulta identificar patrones de comportamiento en las variables climáticas. Por consiguiente, para poder evaluar si existe una relación entre los cambios de cobertura y el microclima será necesario homogenizar la densidad de cobertura. En posteriores trabajos se evaluará la utilidad de los índices de vegetación provenientes de imágenes de satélite, empleando el nivel de biomasa obtenido como referencia de la densidad de cobertura, para tratar de reducir el efecto del tipo de cultivo existente alrededor de la estación. Por último, en la estación Victoria, por estar ubicada en un ambiente eminentemente urbano, los cambios fueron reducidos y podrían considerarse de poca influencia en los parámetros climáticos evaluados, sin embargo, al no encontrar patrones estadísticos significativos de temperatura, no pudo ser tomada como un punto de referencia de microambientes de poco cambio, a excepción de la precipitación, que denota el efecto que tiene la Sierra Madre Oriental en la distribución de la misma.

El aumento del albedo en las áreas debajo de los 400 msnm de la subcuenca es un hecho tangible, tal como lo demuestran las tasas de cambios obtenidas para los 26 años de evaluación. La transformación de importantes superficies de vegetación natural por cultivos de bajo porte y de baja resistencia al aire, tenderá a incrementar la temperatura de superficie, como lo demuestran los registros de la estación Corona. En lo que respecta a la lluvia, el impacto de la remoción de cubiertas vegetales sobre la variabilidad de la precipitación no pudo ser determinado. La persistencia de sequedad en la zona indicó la existencia de patrones de circulación importantes más allá del componente local de humedad, la falta de un patrón claro en los registros de precipitación podría estar indicando, además, la existencia de ciclos mayores al período de observación disponible.

El modelado de los parámetros climáticos demostró las limitaciones de evaluar cambios únicamente con los datos de estaciones meteorológicas, sin tomar en cuenta la relación de dichos parámetros con la biomasa alrededor de la estación y el efecto que pudiera tener el relieve. Los procesos de diagnóstico y verificación llevados a cabo en la construcción de las series de tiempo, evidenciaron violaciones a los supuestos

estadísticos de los modelos probabilísticos de varianza y media constante. La no-estacionaridad presente en algunas series significó que fueron demasiado aleatorias para ser modeladas. A pesar de esto, se obtuvo información con los datos de las estaciones Corona y Barretal, que sustentan la hipótesis de que el tipo y extensión de cobertura que rodea a una determinada estación tiene influencia sobre los registros de temperatura del aire que llegan a la misma.

El impacto que ejerce el cambio de uso de suelo en los patrones climáticos en México necesita ser evaluado y desarrollado, se requiere generar mucha información y deberá ser enriquecido con niveles de mayor detalle a nivel de cuenca, así como con evaluaciones a la escala del paisaje.

REFERENCIAS

Anónimo, SAS (1991), *Time series modeling and forecasting, financial reporting and loan analysis, SAS/ETS software: applications guide 1 version 6.0*, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.

Anónimo ERDAS (1997), Erdas field guide versión 8.3.1, Erdas Inc. Atlanta, Georgia, USA.

Bartholomé, E. (1991), *Remote sensing and agricultural production monitoring in Sahelian countries, Remote sensing and geographical information systems for resource magement in developing countries*, ECSC, EEC, EAEC, The Netherlands.

Charney, J.,G. (1975), "Dynamics of deserts and drought in the Sahel", *Journal of the Real Meteorology Society*, no. 101, pp.193-202.

Fairbanks, D., McGwire, K., Cayocca, K., LeNay, J. y Estes, J. (1996), "Sensitivity to climate change of floristic gradients in vegetation communities, Model GIS integration and data set development to assess terrestrial ecosystem vulnerability to climate change", *Gis and environmental modeling: progress and research issues*, Ed. GIS World Inc., Fort Collins, CO.

Goel, N. S. y Norman, J. M. (1992), "Biospheric models, measurements and remote sensing of vegetation", ISPRS, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, no. 47, pp. 163-188.

Hall, F. G. (1994), Adaptation of NASA remote sensing technology for regional-level analysis of forested ecosystems, Remote sensing and GIS in the ecosystem management, *American Forests*, Forest Policy Center, Ed. Island Press. Washington, DC.

Hord, R. (1982), *Digital image procesing of remotely sensed data*, Academic Press. New York.

Kittel, T. G. F., D. S. Ojima, D. S. Schimel, R. McKeown, J. G. Bromberg, T. H. Painter, N. A. Rosenbloom, W. J. Parton y F. Giorgi (1996), Model GIS integration and data set development to assess terrestrial ecosystem vulnerability to climate change, *GIS and environmental modeling: progress and research issues*, Ed. GIS World Inc., Fort Collins, CO.

Kramer, P. J. (1974), *Relaciones hídricas de suelos y plantas: una síntesis moderna*, Ed. Edutex, México, D. F.

Lockwood, J. G. (1988), "Climate and climatic varaiability in semi-arid regions at low latitudes. Assesments in semi-arid regions" *The impact of climatic variations on agriculture*, vol. 1, International Institute for Applied Systems Analisys, United Nations Environment Programme. The Netherlands.

North, G. (1995), "Climate change and the . Texas region. The changing climate of Texas: *predictability and implications for the future*", *Geobooks*, Cartographics, Texas A&M University, Collegue Station, Tx.

Ortiz P., M. A. y Méndez L., A. P. (1999), "Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe", *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm. 39, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 68-81.

Parri, M. L. y Carter, T. R. (1988), "The assessment of effects of climatic variations on

agriculture: a summary of results from studies in semi-arid regions", *The impact of climatic variations on agriculture*, vol. 1, International Institute for Applied Systems Analisys, United Nations Environment Programme. The Netherlands.

📖 Romero R., M. (1998), *Pronóstico e impacto de la sequía en los distritos de riego del norte de Tamaulipas*, tesis de licenciatura, UAM Agronomía y Ciencias, UAT, Cd. Victoria, Tamaulipas.

📖 Stahle, D. W. y Cleaveland, M. K. (1998), "Texas drought history reconstructed and analyzed from 1698 to 1980", *Journal of Climate*, vol. 1, American Meteorological Society, pp. 59-74.

📖 Stahle, D. W., Cleaveland, M. K. y Hehr, J. G. (1998), "North Carolina climate changes reconstructed from tree rings: A.D. 372 to 1985", *Science*, vol. 240, American Association for the Advancement of Science, pp. 1517-1519.

📖 Treviño Garza, E. J. (2000), "Estratificación de la información en el procesamiento digital de imágenes de satélite aplicado a la cartografía de los bosques de *Pinus sembroides*", *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm. 44, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 54-63.

📖 UNEP, (1995), United Nations Environmental Program, International Panel on Climate Change, www.UNEP/IPCC.