

La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático

Recibido: 12 de agosto de 2010. Aceptado en versión final: 7 de marzo de 2011.

Domitilo Pereyra Díaz*

Dulce Guadalupe Cruz Torres*

José Antonio Agustín Pérez Sesma*

Resumen. En este estudio se analizó el comportamiento de la evapotranspiración real (ETR) para la cuenca del río La Antigua, ubicada en la porción suroeste del Golfo de México. Para esto se construyeron mapas de ETR para el escenario base (1961-1990), así como mapas para los escenarios futuros A2 y B2 ante el cambio climático, para las décadas de los años veinte y los cincuenta. La información se tomó de los registros de 16 estaciones climatológicas, las cuales tenían un mínimo de 15 años en el periodo (1961-1990). Los escenarios de temperatura y precipitación para el cálculo de ETR se tomaron de las salidas de los modelos numéricos globales ECHAM, GFDLR y del modelo regional PRECIS. Al aplicar los modelos de Turc, Coutage y Hargreaves, para

los escenarios A2 y B2 se observó un aumento en la evapotranspiración con respecto al escenario base. Estos resultados muestran que, ante el aumento de la temperatura proyectada por los modelos globales para las décadas de los veinte y los cincuenta, la ETR aumentará en toda la cuenca del río La Antigua teniendo los valores máximos en la parte baja y los valores mínimos en la zona de montaña. El aumento de la ETR en la cuenca deberá ser considerado en la administración y aprovechamiento de los recursos hidráulicos para fines agrícolas, industrial y urbano.

Palabras clave: Evapotranspiración, La Antigua, cuenca, cambio climático, escenario base.

The real evapotranspiration (ETR) in the La Antigua river basin, Veracruz: current state and facing scenarios of climate change

Abstract. In this study is analyzed the real evapotranspiration (ETR) for La Antigua river basin, which is located in the southwestern portion of the Gulf of Mexico. For ETR were constructed maps for the base scenario (1961-1990), as well as maps for the future scenarios A2 and B2 facing the climatic change, for the decades of 20's and 50's. The information was gathered from the registries of 16 climatologic stations, which has a minimum of 15 years within the period (1961-1990). The scenarios of temperature and precipitation for the calculation of ETR were taken from the exits of global numerical models ECHAM, GFDLR, and from the regional model PRECIS. When applying the Turc, Coutage y Hargreaves models, to the scenes A2 and B2, an

increment in evapotranspiration with respect to the base scenario was observed. These results show that, considering increment in the projected temperature by the global models for the 20's and 50's decades, the ETR will be increased in all the La Antigua river basin having the maximum values in the low part of the basin, and the minimum values in the zone of mountain. The increase of the ETR in the watershed will have to be considered in the administration and advantage of the hydraulic resources with agricultural aims, industrialist and urban.

Key words: Evapotranspiration, La Antigua, basin, climatic change, base scenario.

* Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana, Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91000 Xalapa, Veracruz, México. E-mail: dpereyra@uv.mx; aguperez@uv.mx

INTRODUCCIÓN

Se sabe que en el último siglo las variaciones en el clima se han acelerado de manera anómala, de tal forma que afectan la vida planetaria. Según el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, por sus siglas en inglés), (2007), hay un aumento en las evidencias que pueden representar un mundo que se está calentando. La temperatura global de la superficie terrestre se ha incrementado durante el siglo XX entre 0.2 y 0.6° C desde 1861; estos cambios son atribuibles al uso de combustibles fósiles y a los procesos de deforestación, principalmente. Otros cambios observados permiten concluir que el nivel del mar ha aumentado al igual que el contenido de calor. El registro de mareas indica que el aumento promedio global ha sido de 0.1 a 0.2 m durante el siglo XX. En cuanto a la precipitación, es muy probable que se haya incrementado en los últimos cien años entre 0.5 y 1% por década sobre las latitudes medias y altas de los continentes del hemisferio Norte. Asimismo, en las áreas tropicales (entre 10° N y 10° S), es muy probable que la precipitación se haya incrementado entre 0.2 y 0.3% por década y que ésta haya decrecido en las regiones subtropicales (10 a 30° N) en 0.3% por década. Para México las observaciones instrumentales de los últimos 38 años (periodo 1941-2008) muestran que la temperatura media anual se ha elevado 0.6° C en promedio y en los últimos diez años este incremento ha sido de 0.7° C; con respecto a la precipitación, hasta julio del 2008 se había observado un déficit de 18% en promedio para el país, por lo que los sectores económicos como la agricultura de temporal y suministro de agua a la población se ha visto afectada (INE-Semarnat, 2010).

Uno de los principales efectos del cambio climático global podría ser una alteración del ciclo termo-hidrológico regional, acompañado de cambios en el escurrimiento, así como en la disponibilidad y almacenamiento del agua en presas (Mendoza *et al.*, 1997). En este sentido, estudios recientes descritos en la sección 4.3 del INE-Semarnat (2010) reportan, con base en los resultados de los escenarios regionalizados de cambio climático para México, que se esperaría una reducción en la disponibilidad natural media del agua, la cual se

verá afectada por una mayor evapotranspiración, menos lluvia, así como por la disminución de su calidad. A nivel internacional diferentes autores involucran la evapotranspiración en las evaluaciones del recurso agua (Pérez y Castevellí, 2002; Sánchez, 2005). Para México se han realizado estudios sobre el posible impacto del cambio climático en el recurso agua de algunas cuencas hidrológicas (Mundo y Martínez, 1994; Mendoza *et al.*, 1997; Magaña y Conde, 2000). En el mismo sentido Raynal y Rodríguez (2007) en su estudio “Posibles escenarios de impacto del cambio climático sobre la evapotranspiración potencial (ET) en la cuenca del río Conchos, México”, encontraron que para un incremento de la temperatura de 1° C la evapotranspiración se incrementará entre 3 y 3.5% con respecto al valor actual, generando un déficit de humedad del suelo entre 9 y 40%. Para un incremento de la temperatura del aire de 3° C la ET se incrementará entre 8.8 y 10%, incrementándose el déficit de humedad del suelo de 27.5 a 116%. En cuanto al estado de Veracruz, Moteroso *et al.* (2007), en un estudio para la zona central del estado de Veracruz, encontraron que los escenarios de cambio climático sugieren disminuciones en la precipitación, con rangos que van del 10 al 20% respecto a los valores observados, y que la temperatura se incrementará desde 1° C al año 2020 hasta los 4° C para el 2050, en promedio para la región, repercutiendo en la capacidad de infiltración de agua disponible para los cultivos de la región y sugiriendo una mayor vulnerabilidad para la producción agrícola. Pereyra *et al.* (2008), al realizar el balance hídrico para las cuatro regiones hidrológicas del estado de Veracruz, destacan que para conocer el estado que guardan los recursos hídricos es necesario hablar del ciclo hidrológico, térmico que incluye los procesos de evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de humedad en nubes, precipitación, acumulación en el suelo o cuerpos de agua, y re-evaporación.

Debido a que se ha reportado un incremento en la temperatura promedio del planeta (IPCC, 2007), así como para el territorio mexicano (INE-Semarnat, 2010), se cree que la evapotranspiración real (ETR) aumentará, por lo que este grupo de trabajo se abocó a generar escenarios de ETR para la cuenca del río La

Antigua, bajo condiciones de los escenarios futuros SRES (IPCC, 1994) A2 y B2 ante el cambio climático, para las décadas de los veinte y los cincuenta. Se eligieron los escenarios A y B ya que han sido utilizados en estudios de impacto por cambio y variabilidad climática para Veracruz, México, teniendo buenos resultados (Conde y Palma, 2006; Palma *et al.*, 2008). Lo anterior con el objeto de conocer el comportamiento futuro de la evapotranspiración real, ya que un incremento disminuirá la disponibilidad de agua, afectando a los sectores agrícola, urbano y, en menor escala, el industrial. La importancia del estudio radica en que en esta cuenca se practica la agricultura de temporal y de riego (teniendo como principales cultivos la caña de azúcar, café, maíz, mango, limón, entre otros), suministra agua a las ciudades de Xalapa, Coatepec, Cardel, principalmente, así como a algunas industrias instaladas en la zona (Coca Cola, Nestlé, entre otros).

ÁREA EN ESTUDIO

La cuenca del río La Antigua es una de las más importantes del centro del estado de Veracruz

(Figura 1), abarca un área de 2 827 km²; se ubica entre los 19°05' y 19°34' de latitud norte, 96°06' y 97°16' de longitud oeste; pertenece a la región hidrológica número 28 del río Papaloapan y se localiza en la porción sudoccidental del Golfo de México (CONAGUA, 2001). Esta cuenca es de gran importancia por la agricultura, en ella se cultiva café, caña de azúcar, maíz, mango, entre otros; pero además es la fuente principal de agua de las ciudades de Xalapa y Coatepec. El río La Antigua nace en la Sierra Madre Oriental, con el nombre de río Resumidero, a una altitud de 3 350 msnm, en el estado de Puebla. Fluye hacia el sureste en terreno montañoso y pasa por varias poblaciones como Jalcomulco y Apazapan donde se practica el deporte acuático (rápidos), (Pereyra *et al.*, 2006).

La cuenca del río La Antigua se caracteriza por suelos del tipo feozem, vertisol, rendzina y luvisol. Dentro de los tipos de vegetación cuenta con: bosque de pino-encino, bosque mesófilo, selva baja caducifolia, vegetación riparia, cafetales, pastizal inducido y cultivado. La parte norte del área es actualmente un paisaje rural donde solo se observan remanentes de la vegetación original (bosques de coníferas y mesófilos de montaña), y

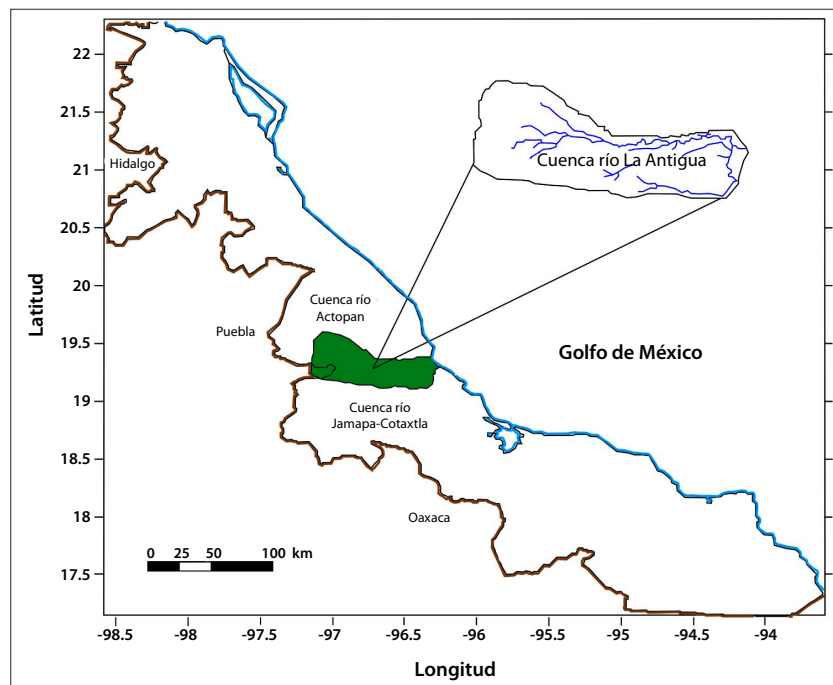


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del río La Antigua, Veracruz.

hacia el sur existe un segmento de vegetación altamente conservado (Navarrete *et al.*, 2006). Según los registros climatológicos considerados en este estudio, periodo 1961 a 1990 (SMN, 2008), la temperatura media anual es 22.3° C y oscila entre los 18.7 y 25.2° C. En los meses de abril y mayo se presentan los valores más altos y en noviembre, diciembre, enero y febrero las temperaturas más bajas. La precipitación media anual es de 1 393 mm con valores altos en la parte alta de la cuenca, en la zona montañosa, mayores a 2 000 mm, y valores bajos en la parte central, entre 900 y 1 000 mm. La evaporación media anual es de 1 340 mm, en los meses de marzo a mayo es más intensa, y en el mes de diciembre se presenta el valor mínimo. En cuanto al escurrimiento de la cuenca, en la desembocadura de ésta, al Golfo de México, escurren anualmente 1 789.66 millones de metros cúbicos (CONAGUA, 2008).

METODOLOGÍA

Para estimar la evapotranspiración real (ETR), primero se ubicaron las 16 estaciones climatológicas en la cuenca con la ayuda del software Surfer 7 (SMS, 1999), (Figura 2).

Estas 16 estaciones climatológicas contaban con, al menos, 15 años de registro (Tabla 1). Las variables utilizadas fueron: temperatura media

mensual y la precipitación mensual; las cuales se bajaron de las Normales Climatológicas 1961-1990 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que se encuentran en línea (SMN, 2008).

Debido a la falta de datos de humedad relativa (HR) en cada una de las estaciones utilizadas en el estudio, ésta se obtuvo por medio de una regresión lineal múltiple entre la precipitación, temperatura y evaporación de los observatorios de las ciudades de Xalapa y Veracruz para el periodo 1961-1990 (360 datos), (*Ibid.*) con la ayuda del Software Statistica 6.0 (StatSoft, 1999), la ecuación que se utilizó para realizar el cálculo de cada uno de los coeficientes tiene la forma:

$$HR = a + bP + cT + dE \quad (1)$$

Las ecuaciones generadas para los observatorios fueron de Xalapa y Veracruz, fueron:

$$HR_{Xal} = 74.785 + 0.013815P + 0.115211T + 0.139416E \quad (1a)$$

Con R=0.9265 y Variación explicada de 85.84%.

$$HR_{Ver} = 123.3652 + 0.028071P + 0.132346E \quad (1b)$$

Con R=0.8799 y Variación explicada de 77.42%.

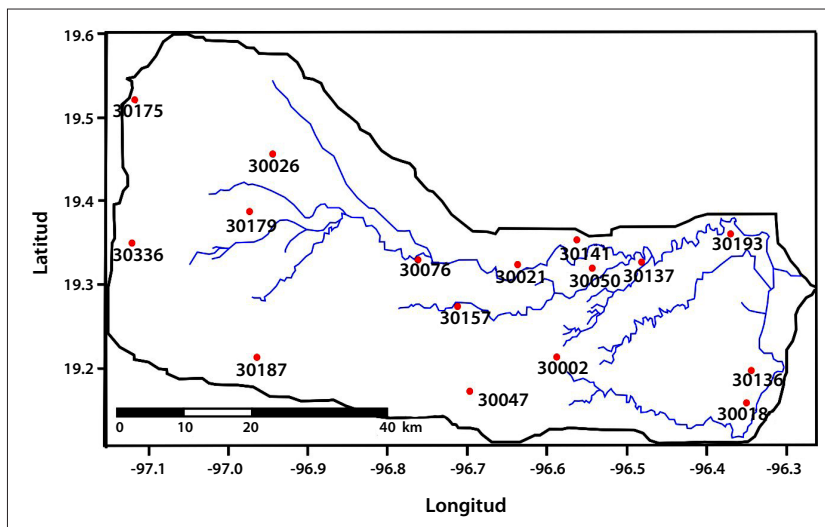


Figura 2. Estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca del río La Antigua (tomada de CONAGUA, 2001 y modificada por Pereyra *et al.*, 2008).

Tabla 1. Estaciones climatológicas utilizadas en el área en estudio (SMN, 2008)

Clave	Estación y Municipio	COORDENADAS		
		Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (MSNM)
30002	Acazónica, Paso de Ovejas.	19°12'	-96°35'	410
30018	El Buzón, Manilio Fabio.	19°09'	-96°21'	50
30021	Carrizal, Emiliano Zapata.	19°19'	-96°38'	250
30026	Coatepec, Coatepec.	19°27'	-96°56'	1250
30047	El Coyol, Comapa.	19°10'	-96°41'	610
30050	El Faisán, Paso de Ovejas.	19°19'	-96°32'	20
30076	Jalcomulco, Jalcomulco.	19°19'	-96°45'	335
30136	Puente Julia, Paso de Ovejas.	19°11'	-96°20'	45
30137	Puente Nacional, Pte. Nac.	19°19'	-96°28'	110
30141	Rinconada, Emiliano Zapata.	19°21'	-96°33'	313
30157	Santa María Tetetla, Jalcom.	19°16'	-96°42'	350
30175	Tembladeras, Xico.	19°30'	-97°07'	3160
30179	Teocelo, Teocelo.	19°23'	-96°58'	1218
30187	Totutla, Totutla.	19°12'	-96°57'	1446
30193	José Cardel, La Antigua.	19°21'	-96°22'	28
30336	Ixhuacán de Los Reyes, Ix. Reyes	19°21'	-97°07'	1785

donde: $HR_{x_{ab}}$ HR_{ver} es la Humedad relativa se cada observatorio (%); P es la Precipitación (mm); T es la Temperatura media del aire (°C) y E es la Evaporación (mm).

La ecuación (1a) se utilizó para calcular la humedad relativa de la parte alta de la cuenca en donde se localizan las siguientes estaciones: Coatepec, El Coyol, Jalcomulco, Santa María Tetetla, Tembladeras, Teocelo, Totutla e Ixhuacan de Los Reyes; para calcular la humedad relativa en la parte baja se aplicó la ecuación (1b) para las siguientes estaciones: Acazónica, El Buzón, Carrizal, El Faisán, Puente Julia, Puente Nacional, Rinconada y Cardel.

Para llevar a cabo el análisis de la ETR, se construyeron gráficas del escenario base (1961-1990); así como de los escenarios futuros A2 y B2 para las décadas de los años veinte y los cincuenta las cuales se muestran en la sección de resultados. Las variaciones de temperatura, precipitación y humedad relativa para el cálculo de ETR se tomaron

de las salidas de los modelos numéricos globales ECHAM, GFDLR, y del modelo regional PRECIS. Los dos primeros modelos fueron elegidos por que se encuentran entre los cuatro (de catorce) modelos que mejor se ajustan para generar escenarios de cambio climático para México (Conde, 2003). El tercer modelo (PRECIS) desarrollado por el Centro Hadley, UK, y adaptado para el Caribe, cuenta con una resolución típica de un modelo regional de alrededor de 50 km en la horizontal (resolución de 0.44° x 0.44°), tiene la ventaja de que puede ser adaptado a cualquier región del mundo.

Para la elaboración del escenario futuro de temperatura para cada uno de los modelos y décadas se obtuvo mediante la ecuación (2).

$$T_{fut} = T_{esc\ base} \pm \text{variación} \quad (2)$$

donde: $T_{esc\ base}$ es la temperatura del escenario base (°C) y T_{fut} es la temperatura del escenario fu-

turo (°C). En el caso de la precipitación el escenario futuro de los modelos se realizó con las siguientes expresiones, aclarando que las salidas del modelo regional PRECIS proporciona las variaciones de la precipitación en mm/día (ecuación 3); mientras que las salidas de los modelos: ECHAM y GFDLR, proporcionan el porcentaje de cambio respecto al periodo 1961-1990 (ecuación 4), (Palma *et al.*, 2008):

$$Pcp_{futura} = \frac{Pcp_{esbase}}{\text{Número de días del mes}} + Pcp_{PRECIS} \quad (3)$$

$$\Delta p = \left(\frac{\text{Salida del MCG}}{100} \right) \left(\frac{Pcp_{esbase}}{\text{Número de días del mes}} \right)$$

$$Pcp_{futura} = Pcp_{esbase} \text{ (mm/día)} + \Delta p \text{ (mm/día)} \quad (4)$$

Uno de los aspectos más importantes en estudios de hidrología y climatología es la determinación de la evapotranspiración, pero la evaluación de este parámetro es complicada (Sánchez, 2005). Por este motivo, durante las últimas décadas, existe una gran variedad de métodos para su estimación, desde los clásicos que permiten obtenerla a escala regional, a partir de medidas de campo, hasta los más recientes basados en teledetección (Kustas y Norman, 1996; Sánchez y Chuvieco, 2000; Sánchez y Caracho, 2006). En este estudio los métodos utilizados para evaluar la ETR fueron tres y se describen a continuación:

a) Ecuación de Turc:

A partir de observaciones realizadas en 254 cuencas, distribuidas por todos los climas del mundo (cálido, templado, frío), Turc obtuvo la siguiente expresión (Remenieras, 1974; Custodio y Llamas, 2001):

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{.P^2}{L^2} \right)}} \quad (5)$$

Siendo, P la precipitación media anual en mm, $L = 300 + 25T + 0.05T^3$, T es la temperatura media anual en °C y ETR la evapotranspiración real anual en mm.

b) Ecuación de Coutagne:

Coutagne propuso dos fórmulas en función de la temperatura media anual, la primera para latitudes comprendidas entre 30° y 60°N y la segunda fue deducida para cuencas tributarias del océano Atlántico; para este estudio se utilizó la segunda la cual se expresa de la siguiente forma (Campos, 1996):

$$ETR = 255 + 33T \text{ (para una precipitación aproximadamente 1000 mm)} \quad (6)$$

donde ETR es la evapotranspiración real anual en mm y T la temperatura media anual en grados centígrados.

c) Ecuación de Hargreaves

Hargreaves considera a la evapotranspiración como un proceso físico, que puede computarse con base en las temperaturas medias mensuales, la humedad relativa media mensual, registrada al mediodía, y la duración de los días del mes, utilizando la siguiente expresión (Gavande, 1982).

$$e = cd(t - 32) \quad (7)$$

donde: e es la evaporación mensual en pulgadas, t es la temperatura media mensual (°C), d es el coeficiente diurno mensual (función de la latitud), c es un factor climático, que depende de la humedad y en menor grado de la rapidez del viento, y se expresa como,

$$c = (0.38 - 0.038HR) \quad (8)$$

siendo HR es la humedad relativa mensual registrada al mediodía (%). Por lo que el uso consuntivo o evapotranspiración potencial, para un periodo dado, U (en mm) se expresa como,

$$U = \sum ke \quad (9)$$

donde $\sum e$ = suma de las evaporaciones mensuales del periodo y k es un coeficiente empírico que depende del cultivo.

RESULTADOS

Las figuras siguientes fueron construidas con el software Surfer 7, versión 1999. La Figura 3 muestra el comportamiento espacial de la ETR en la cuenca del río La Antigua para el escenario base 1961-1990. En la Figura 3a se observa que para el modelo de Turc se presentan dos máximos de evapotranspiración, uno en la parte alta y otro en la parte baja, y Coutagne (Figura 3b) sólo muestra un máximo en la parte baja, para las proyecciones de los escenarios futuros veinte A2 y cincuenta B2, ante el cambio climático. Como era de esperarse el modelo de Hargreaves (Figura 3c) presenta valores más altos que los otros dos modelos, ya que éste estima la evapotranspiración potencial.

La Figura 4 muestra el comportamiento espacial de la ETR, proyectada para la década de los veinte por el modelo ECHAM para el escenario A2. En el modelo de Turc (Figura 4a) observan dos máximos (parte alta y parte baja) y Coutagne (Figura 4b), se observa solo un máximo en la parte baja de la cuenca; mientras que con la fórmula de Hargreaves (Figura 4c) es de gran importancia un máximo en la parte baja, pero nuevamente los valores de ET son mayores a los otros dos modelos.

Para el escenario futuro B2 el comportamiento de la ETR, proyectada para la década de los veinte por el modelo ECHAM (Figura 5) nos muestra que para el método de Turc (Figura 5a) las variaciones son máximas en dos puntos (parte alta y parte baja), mientras que para el método de Coutagne (Figura 5b) estas variaciones son muy ligeras en toda la cuenca; y para la evapotranspiración potencial calculada por el método de Hargreaves (Figura 5c) los valores siguen siendo más altos, principalmente para la parte baja de la cuenca.

En la Figura 6 se presenta el escenario futuro A2 de la evapotranspiración real para la década de los cincuenta con el modelo ECHAM. La ETR calculada por el método de Turc (Figura 6a) muestra dos máximos (parte alta y parte baja), en cambio el método de Coutagne (Figura 6b) presenta un máximo en la parte baja y Hargreaves (Figura 6c) presenta un máximo en la parte baja con valores más altos que los generados por los otros modelos.

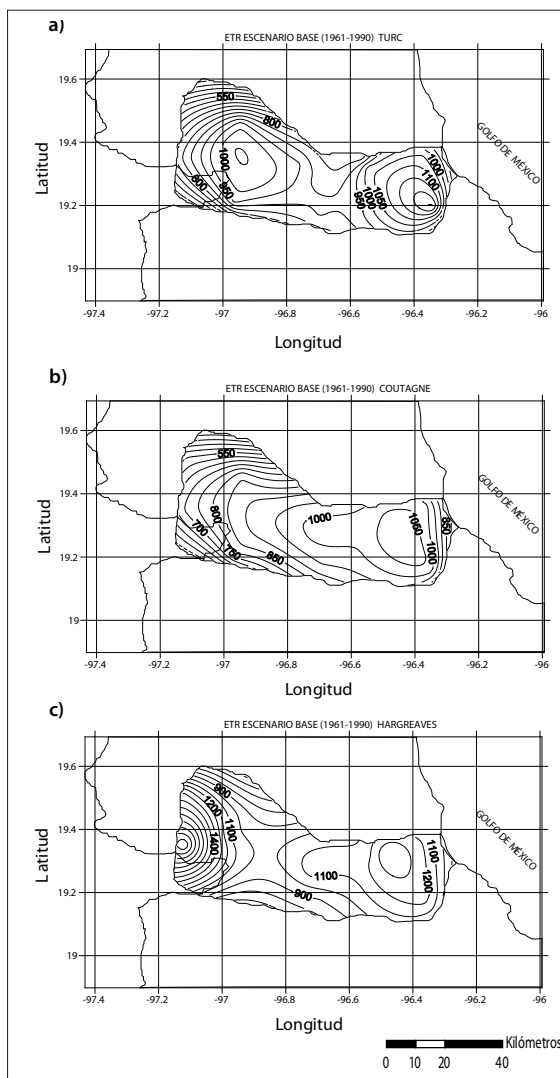


Figura 3. Escenario base del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) utilizando: a) Turc, b) Coutagne y c) Hargreaves, a partir de la Normales Climatológicas 1961-1990.

Para el escenario B2 el comportamiento de la evapotranspiración real, fue proyectado para la década de los cincuenta por el modelo ECHAM (Figura 7). El método de Hargreaves (Figura 7c) presenta un máximo significativo cercano a la región 96.45W y 19.35N, mientras que para los otros métodos Turc (Figura 7a) presenta dos máximos (parte alta y parte baja) y Coutagne (Figura 7b) presenta sólo un máximo.

Las Figuras 8 nos muestran las proyecciones para el escenario futuro A2 de ETR para la década de los

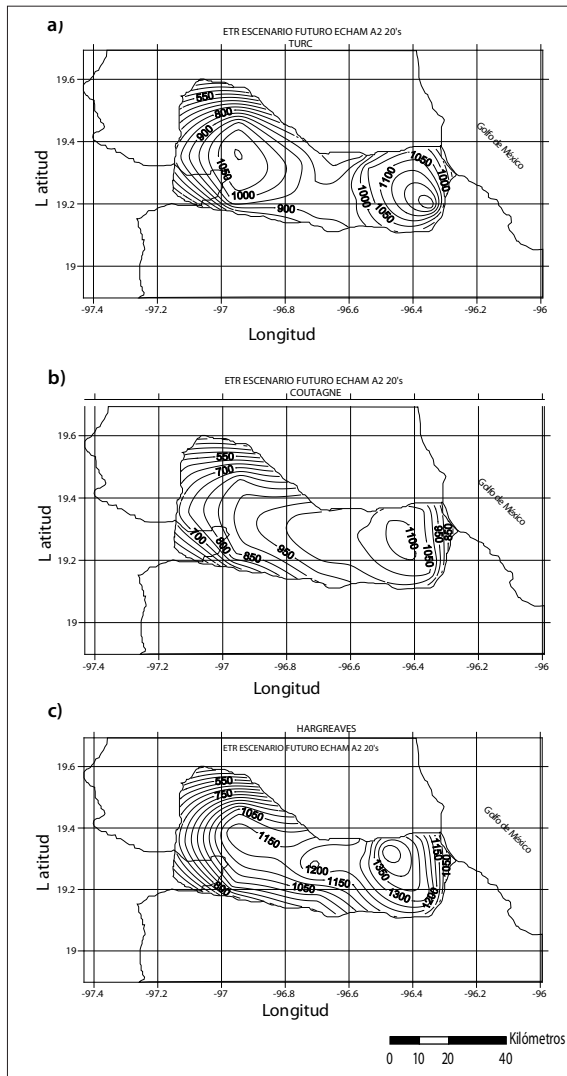


Figura 4. Escenario futuro A2 del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) para la década de los veinte con el modelo ECHAM.

veinte por el modelo GFDLR. El método de Coutagne (Figura 8b) muestra un máximo en la parte baja, mientras que en el método de Turc (Figura 8a) destaca el fuerte gradiente en la región cercana a los 96.3W y 19.2N parte baja de la cuenca y otro gradiente ligero en la 96.9W y 19.3N ubicado en la parte alta.

Para el escenario futuro B2 el comportamiento de la ETR, proyectado para la década de los veinte por el modelo GFDLR (Figura 9), muestra que en el método de Coutagne (Figura 9b) se presenta un

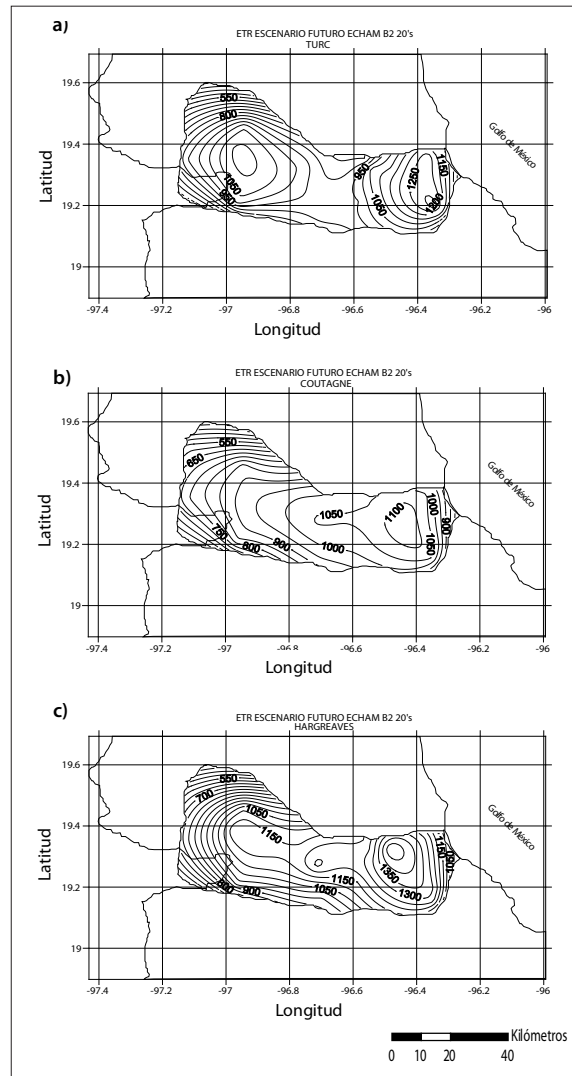


Figura 5. Escenario futuro B2 del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) para la década de los veinte con el modelo ECHAM; a) Fórmula de Turc, b) Fórmula de Coutagne y c) Fórmula de Hargreaves.

máximo (parte baja), y el método de Turc (Figura 9a), dos máximos significativos en la parte alta y baja.

En la Figura 10 se muestran los escenarios A2 de ETR para la década de los cincuenta según el modelo GFDLR; para los métodos de Turc (Figura 10a) y Coutagne (Figura 10b) se destacan dos puntos máximos a lo largo de la cuenca, uno en la parte alta y el otro en la baja, el comportamiento en ambos métodos sigue el mismo patrón.

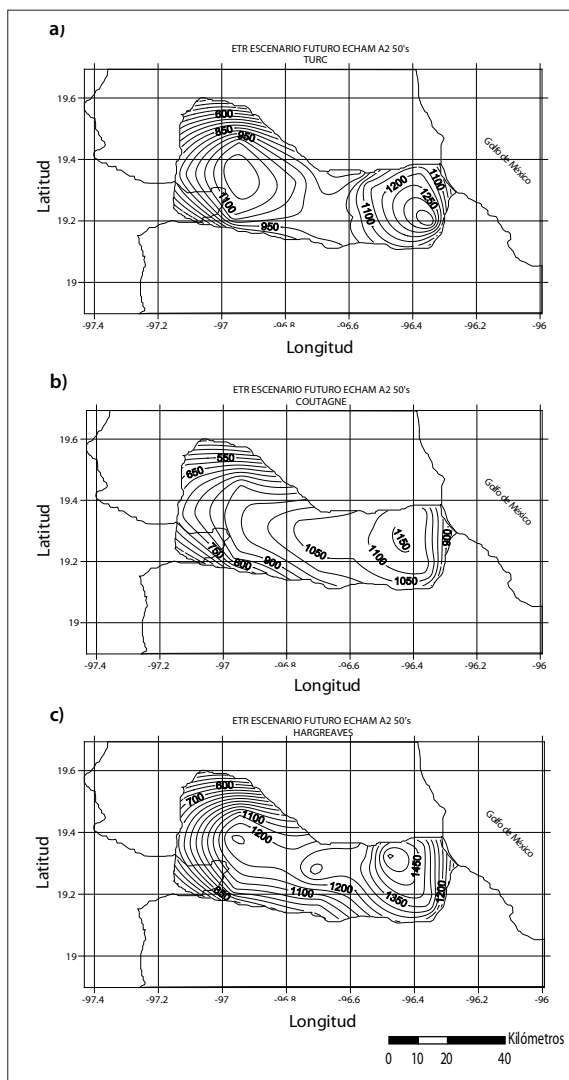


Figura 6. Escenario futuro A2 del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) para la década de los cincuenta con el modelo ECHAM; a) Fórmula de Turc, b) Fórmula de Coutagne y c) Fórmula de Hargreaves.

Para el escenario futuro B2 el comportamiento de ETR fue proyectado para la década de los cincuenta por el modelo GFDLR (Figura 11). El método de Turc (Figura 11a) presenta dos puntos máximos con coordenadas 96.37W, 19.2N y 96.95W, 19.35N, y el método de Coutagne (Figura 11b) muestra variaciones menores.

La Figura 12 presenta las proyecciones de los escenarios A2 del comportamiento de la evapotranspiración real para la década de los veinte por el mo-

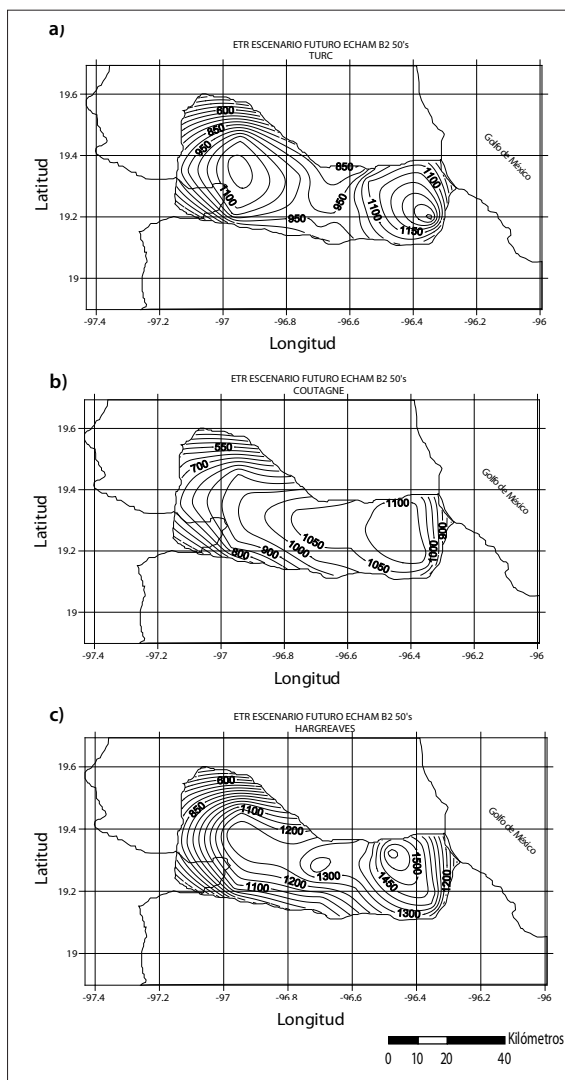


Figura 7. Escenario futuro B2 del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) para la década de los cincuenta con el modelo ECHAM; a) Fórmula de Turc, b) Fórmula de Coutagne y c) Fórmula de Hargreaves.

delo regional PRECIS; en esta figura se observa, que la evapotranspiración estimada por el método de Turc (Figura 12a), que existen dos puntos máximos (96.38W, 19.2N y 96.9W, 19.38N), mientras que los métodos de Coutagne (Figura 12b) muestran variaciones menores y Hargreaves (Figura 12c), un máximo significativo en la parte baja.

Para el escenario futuro A2 el comportamiento de la ETR proyectado para la década de los cincuenta por el modelo regional PRECIS (Figuras 13),

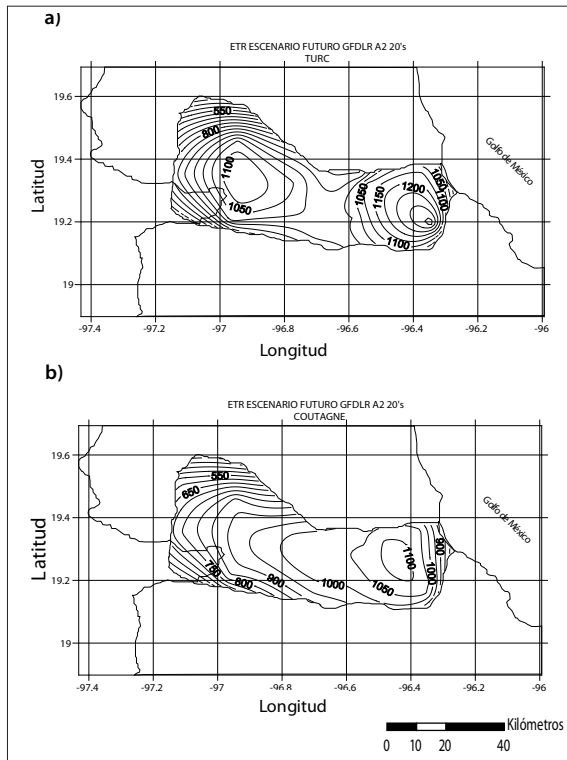


Figura 8. Escenario futuro A2 del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) para la década de los veinte con el modelo GFDLR; a) Fórmula de Turc y b) Fórmula de Coutagne.

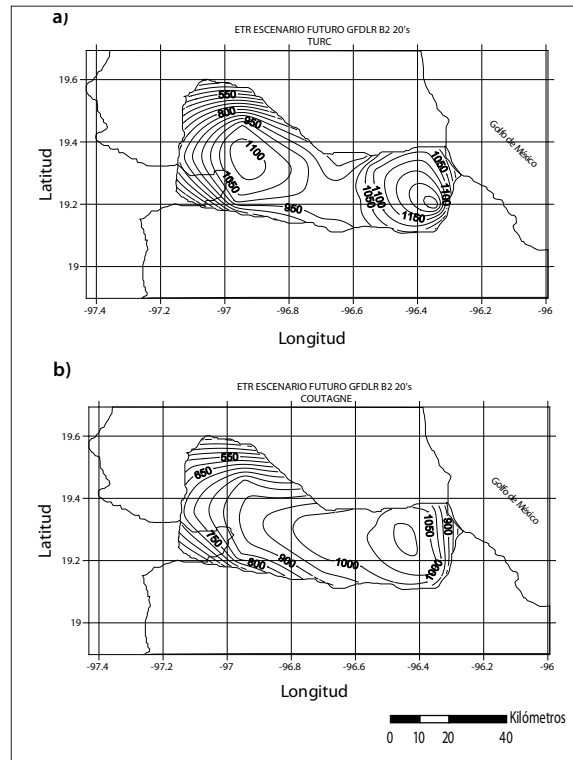


Figura 9. Escenario futuro B2 del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) para la década de los veinte con el modelo GFDLR; Fórmula de Turc, Fórmula de Coutagne.

para el método de Turc (Figura 13a) se localizan dos puntos máximos a lo largo de la cuenca con coordenadas (96.9W, 19.39N y 96.37W, 19.25N), mientras que el método de Coutagne (Figura 13b) presenta un máximo en la parte baja, y Hargreaves presenta dos máximos uno en la parte alta y otro en la parte baja.

De acuerdo con los resultados del comportamiento futuro de la evapotranspiración real en la región de estudio, se puede concluir para cada uno de los escenarios lo siguiente:

- *Escenario A2 20's* (Figuras 4,8,12): los modelos ECHAM, GFDLR y PRECIS coinciden en proyectar un aumento hacia la porción sureste de la cuenca en todos los métodos por los cuales se calculó dicha variable, teniendo valores más altos en el modelo de Hargreaves (como era de esperarse, ya que siempre será mayor o igual a

la ETR); las estaciones que se encuentran en esta porción son: Acazónica, El Buzón, Carrizal, el Faisán, Puente Julia, Puente Nacional, Rinconada y Cardel.

- *Escenario B2 20's* (Figuras 5,9): para el método de Turc, el modelo ECHAM y GFDLR presentan dos puntos máximos en las porciones noroeste y sureste de la cuenca, mientras que para los otros dos métodos solo se localiza un incremento hacia la porción sureste de la misma.
- *Escenario A2 50's* (Figuras 6,10,13): los modelos ECHAM y PRECIS arrojan valores mayores al calcular la evapotranspiración por el método de Hargreaves, lo cual resulta lógico, ya que estima la evapotranspiración potencial, que siempre será mayor o igual a la ETR. El modelo GFDLR coincide con los otros dos modelos al evaluar dicha variable con los métodos de Turc

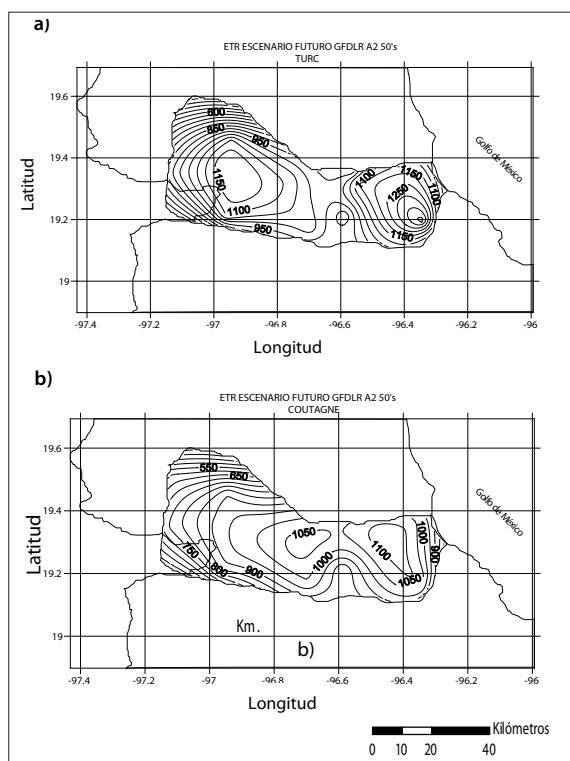


Figura 10. Escenario futuro A2 del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) para la década de los cincuenta con el modelo GFDLR; a) Fórmula de Turc y b) Fórmula de Coutagne.

y Coutagne, obteniendo un incremento hacia la región sureste.

- *Escenario B2 50's* (Figuras 7,11): el modelo ECHAM y GFDLR proyectan incrementos en la evapotranspiración hacia la parte sureste de la cuenca para los métodos de Turc y Coutagne.

En cuanto a las ecuaciones utilizadas para determinar la ETR, se observó que la ecuación de Turc predice un incremento promedio de hasta 9.2% para los años veinte y 13.2% para los cincuenta (Tabla 2). Por lo que respecta a Coutagne esta ecuación predice un incremento de hasta 3.3% para los veinte y 6.7% para los cincuenta (Tabla 2). En cuanto a la de Hargreaves esta ecuación predice un incremento de hasta 7.0% para los veinte y 12.0% para los cincuenta (Tabla 2).

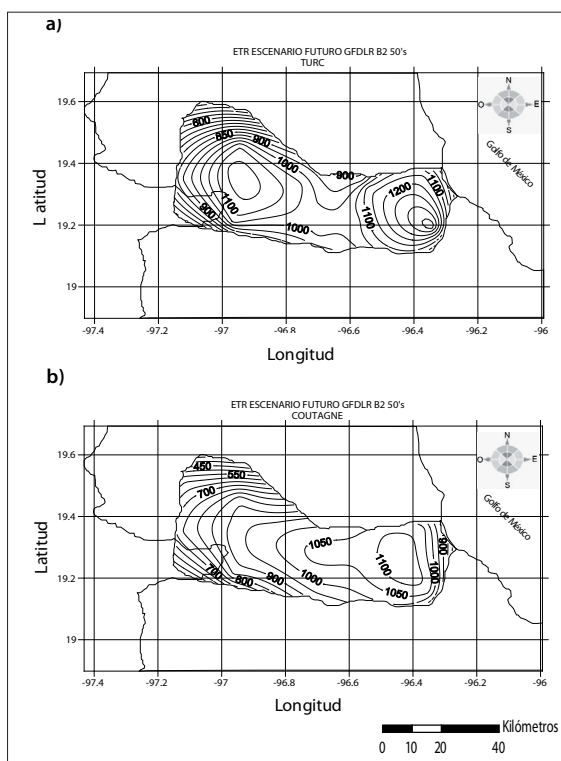


Figura 11. Escenario futuro B2 del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) para la década de los cincuenta con el modelo GFDLR; a) Fórmula de Turc, b) Fórmula de Coutagne.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el comportamiento de la evapotranspiración tuvo cambios marcados, al aplicar los modelos numéricos globales ECHAM, GFDLR y PRECIS, con los escenarios A2 y B2. Estos cambios muestran un incremento de la ETR, con respecto al escenario base, para las décadas de los años veinte y los cincuenta, resultados que coinciden con lo encontrado por otros investigadores para México (Mundo y Martínez, 1994; Mendoza *et al.*, 1997; Raynal y Rodríguez, 2007). Este incremento de la ETR, en toda la cuenca del río La Antigua, tendrá los valores máximos en la parte baja y los valores mínimos en la zona de montaña. Este aumento en ETR causará un déficit en la humedad del suelo, lo que aunado a la disminución de la precipitación, que encontró Monterroso *et al.* (2007) para la zona bajo escenarios de cambio

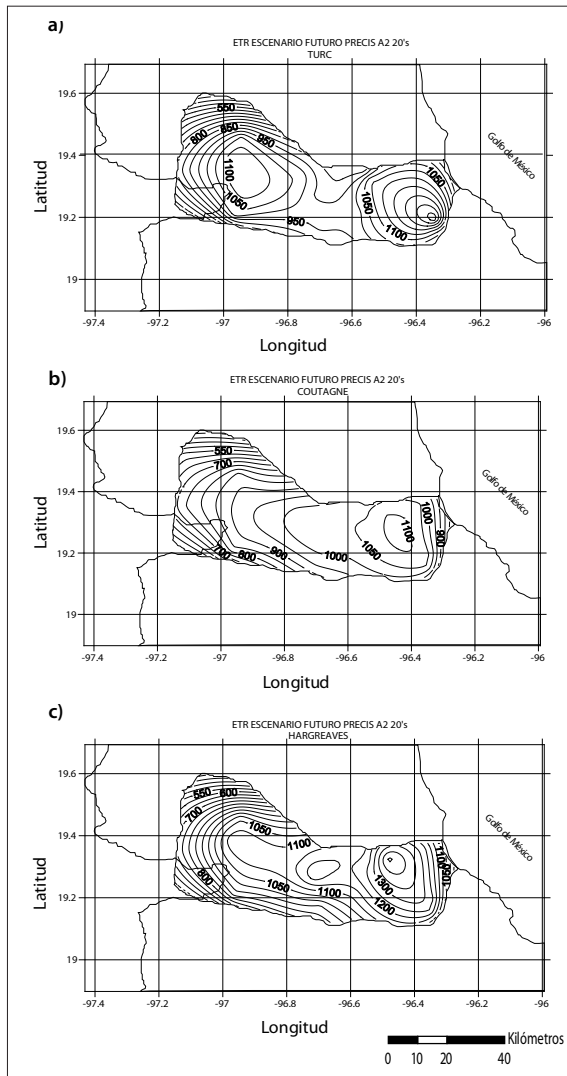


Figura 12. Escenario futuro A2 del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) para la década de los veinte con el modelo PRECIS; a) Fórmula de Turc, b) Fórmula de Coutagne y c) Fórmula de Hargreaves.

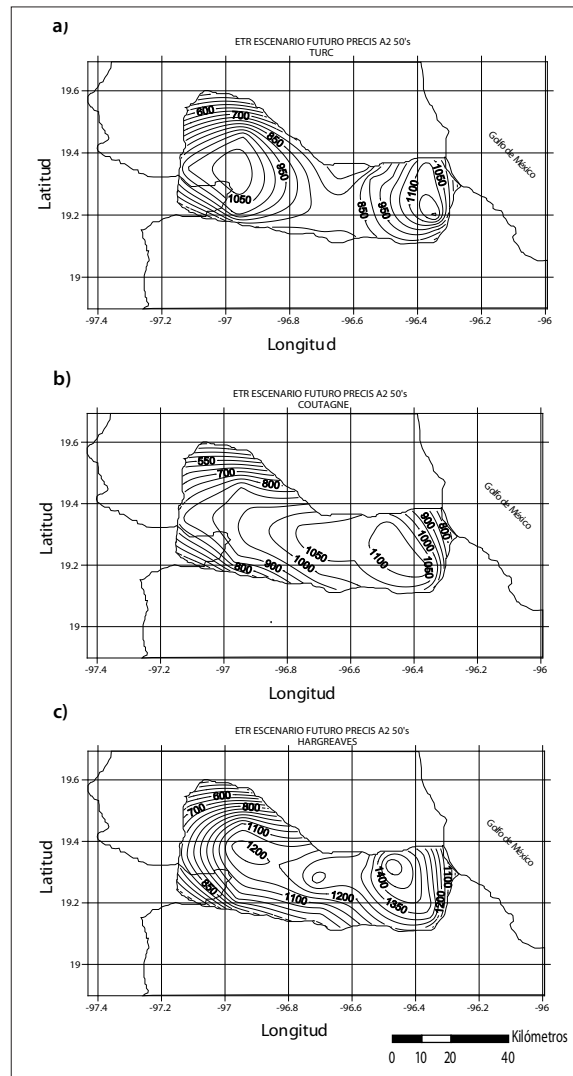


Figura 13. Escenario futuro A2 del comportamiento de la evapotranspiración real (mm/año) para la década de los cincuenta con el modelo PRECIS; a) Fórmula de Turc, b) Fórmula de Coutagne y c) Fórmula de Hargreaves.

Tabla 2. Anomalías de ETR (%) ante escenarios de cambio climático, a partir de las normales climatológicas 1961-1990

MCG	ETR-Turc				ETR-Coutagne				ETR-Hergreaves			
	A2		B2		A2		B2		A2		B2	
	20's	50's	20's	50's	20's	50's	20's	50's	20's	50's	20's	50's
ECHAM	3.1	10.8	4.7	8.0	3.1	6.7	3.7	6.7	7.0	5.0	4.7	12.0
GFDLR	9.2	13.2	7.0	10.9	3.3	5.7	2.6	4.8				
PRECIS	2.9	6.1			3.1	6.6			2.0	9.0		
HADLEY			-6.9	-1.6			3.2	6.6				

Fuente: SMN, (2008)

climático, será necesario suministrar más agua a los cultivos agrícolas. Los modelos ECHAM, GFDL y PRECIS coinciden en que el mayor incremento de la evapotranspiración real se presentará en la región sureste de la cuenca (parte baja). En esta región se encuentra el distrito de riego 035 (La Antigua), en el que se siembran más de 10 000 hectáreas de cultivo (principalmente, caña de azúcar y maíz). Este incremento de ETR hará más crítica la demanda de agua, que de por sí ya lo es durante los meses de estiaje (marzo a mayo), por lo que se requerirá de una buena administración del recurso por parte de la CONAGUA, así como planear el almacenamiento del escurrimiento excedente durante la época de lluvia. En cuanto a la parte alta de la cuenca, el aumento de ETR agudizará el estiaje, lo que aunado al crecimiento poblacional originará que se incremente el tandeo por colonias (del agua entubada para uso doméstico) de las ciudades de Xalapa y Coatepec.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACyT y al Gobierno del Estado de Veracruz por haber financiado este estudio, como parte del proyecto “Instalación de red hidroluviométrica en la cuenca del río La Antigua y transmisión de datos en tiempo real con fines de alerta temprana” clave: 037529.

REFERENCIAS

- Campos, A. D. F. (1996), *Procesos del ciclo hidrológico*, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.
- CONAGUA (2001), *Regiones y Cuencas Hidrológicas*. Sistema de Información Geográfica del Agua de la Región Golfo Centro de la CONAGUA, Carta 1:700 000.
- CONAGUA (2008), “Disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas de los Ríos Actopan, La Antigua, Jamapa, Cotaxtla, Jamapa-Cotaxtla y llanuras de Actopan”, *Diario Oficial de la Federación* 03-11-2008 [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA/Noticias/dof_03-11-2008.pdf].
- Conde A., A. C. (2003), *Cambio y variabilidad climática. Dos estudios de caso en México*, tesis de Doctorado en Ciencias (Física de la Atmósfera), UNAM, México.
- Conde, C., y B. Palma (2006), “Escenarios de riesgo para el territorio veracruzano ante un posible cambio climático”, en Tejeda, A. y C. Welsh R. (eds.), *Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz*, Universidad Veracruzana, Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología, pp. 285-299.
- Custodio, E. y M. R. Llamas (2001), *Hidrología Subterránea*, Ediciones Omega, 2ª. edición, Barcelona, España.
- Gavande, A. S. (1982), *Física de suelos. Principios y aplicaciones*, Limusa, México.
- INE-Semarnat (2010), *México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología, México.
- IPCC (1994), “IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations”, prepared by Working Group II [Carter, T. R., M. L. Parry, H. Harasawa and S. Nishioka (eds.)] and WMO/UNEP. CGER-IO15-'94. University College -London, UK and Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan.
- IPCC, WGII (Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group II), (2007), *Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, McCarthy, J. J., O. F. Canziani, N. A. Leary, F. J. Dokken and K.S. White (eds.), Cambridge University Press.
- Kustas, W. P. and J. M. Norman (1996), “Use of a remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces”, *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 41, pp. 495-516.
- Magaña, V. O. and C. Conde (2000), “Climate and freshwater resources in Northern Mexico: Sonora, a case study”, *Environmental Monitoring and Assessment*, no. 61, pp. 167-185.
- Mendoza, V. M., E. E. Villanueva and J. Adem (1997), “Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change”, *Climate Research*, no. 9, pp. 139-145.
- Monterroso Rivas, A., A. C. Conde Álvarez, J. D. Gómez Díaz y J. López García (2007), “Vulnerabilidad y riesgo en agricultura por cambio climático en la Región Centro del estado de Veracruz, México”, *Zonas Áridas*, Lima, Perú, vol. 11, núm. 1, pp. 47-60.
- Mundo M., M. D. y A. P. Martínez (1994), “El cambio climático y sus efectos potenciales en los recursos hídricos y la agricultura del valle del Yaqui, Sonora”, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 9, núm. 1, pp. 13-33.
- Navarrete, V. S., P. E. Díaz y H. A. Gutiérrez (2006), *Descripción hidrográfica e ictiológica de la parte alta de la cuenca del río La Antigua, Veracruz*, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de

- Querétaro [http://www.ine.gob.mx/dgioece/cuencas/descargas/congnalo6/tema03/32 saul navarrete. Pdf: 7 de marzo de 2008].
- Palma, B., C. Conde, R. E. Morales y G. Colorado (2008), "Escenarios climáticos", en Tejeda Martínez, A., M. E. Guadarrama Olivares y C. M. Welsh Rodríguez, volumen 4: "Impactos en el Medio Ambiente", *Estudio para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*, Embajada Británica de México, Instituto Nacional de Ecología y Universidad Veracruzana (versión preliminar), [cd-rom].
- Pereyra, D. D. y J. A. A. Pérez Sesma (2006), "Hidrología de superficie y precipitaciones intensas 2005 en el estado de Veracruz", en Tejeda Martínez, A. y C. M. Welsh Rodríguez (eds.), *Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz*, Universidad Veracruzana y Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología, pp. 81-99.
- Pereyra Díaz, D., J. A. A. Pérez Sesma y A. D. Contreras Hernández (2008), "Escenarios futuros de los recursos hídricos", en Tejeda Martínez, A., M. E. Guadarrama Olivares y C. M. Welsh Rodríguez (eds.), volumen 4: "Impactos en el Medio Ambiente", *Estudio para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*, Embajada Británica de México, Instituto Nacional de Ecología y Universidad Veracruzana (versión preliminar), [cd-rom].
- Pereyra Díaz, D., J. A. A. Pérez Sesma, C. Hoyos Reyes, J. Sánchez Orea y F. Javier González Martínez (2008), *Instalación de red hidroluviométrica en la cuenca del río La Antigua y transmisión de datos en tiempo real con fines de alerta temprana*, Informe Final, Universidad Veracruzana-COVECYT.
- Pérez, J. P. y F. Castellví (2002), "Análisis de la evapotranspiración a escala local y regional en Cataluña", *Ingeniería del Agua*, vol.9, núm. 1, pp. 59-72.
- Remenieras, G. (1974), "Evaporación, transpiración y déficit de escurrimiento", Capítulo V, en *Tratado de Hidrología Aplicada*, Editores Técnicos Asociados, 2ª. edición, Barcelona, España, pp. 205-300.
- Raynal Villaseñor, J. A. and J. A. Rodríguez Pineda (2007), "Possible scenarios of impacts of climate change on potential evapotranspiration in the watershed of the Conchos River, Mexico", *Fall Meeting 2007 of American Geophysical Union*, Abstract #H21G-0816.
- Sánchez, M. y E. Chuvieco (2000), "Estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET₀, a partir de imágenes NOAA-AVHRR", *Revista de Teledetección*, vol. 14, pp. 11-21.
- Sánchez, M. y L. Caracho (2006), "Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAAAVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins", *Revista de Geografía Norte Grande*, Santiago de Chile, núm. 36, pp. 49-60.
- Sánchez T., J. M. (2005), "Cálculo de la evapotranspiración real diaria en la zona norte de Finlandia empleando técnicas de teledetección", *GeoFocus* (Artículos), núm. 5, pp. 278-300.
- SMN (2008). *Normales climatológicas 1961-1990*, Servicio Meteorológico Nacional, México.
- SMS (1999), "Surfer Version 7", *Surface Mapping Sytem*, Golden Software, Inc, USA.
- StatSoft, Inc. (1999), *Statistica 6 for Windows*, Tulsa, OK 74104, USA.